
LES TECHNIQUES ACTUELLES D'ESTIMATION DE LA COMPOSITION CORPORELLE DES BOVINS :

ETUDE PRATIQUE DE DEUX METHODES UTILISANT LES ULTRASONS

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

DIPLOME D'ÉTAT

*présentée et soutenue publiquement en 2003
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par

Frédéric, Hervé PAULUZZI
Né, le 15 juillet 1978 à AUCH (Gers)

Directeur de thèse : M. le Professeur Roland DARRÉ

JURY

PRESIDENT :
M. Jean PARINAUD

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEUR :
M. Roland DARRÉ
Mme Nicole HAGEN-PICARD

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE
Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Partie 1/2

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PÊCHE
ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE DE TOULOUSE

Directeur	: M.	P. DESNOYERS
Directeurs honoraires.....	: M.	R. FLORIO
	M.	J. FERNEY
	M.	G. VAN HAVERBEKE
Professeurs honoraires.....	: M.	A. BRIZARD
	M.	L. FALIU
	M.	C. LABIE
	M.	C. PAVAU
	M.	F. LESCURE
	M.	A. RICO
	M.	A. CAZIEUX
	Mme	V. BURGAT
	M.	D. GRIESS

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

- M. **CABANIE Paul**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- M. **CHANTAL Jean**, *Pathologie infectieuse*
- M. **DARRE Roland**, *Productions animales*
- M. **DORCHIES Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- M. **GUELFY Jean-François**, *Pathologie médicale des Equidés et Carnivores*

PROFESSEURS 1^{ère} CLASSE

- M. **AUTEFAGE André**, *Pathologie chirurgicale*
- M. **BODIN ROZAT DE MANDRES NEGRE Guy**, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*
- M. **BRAUN Jean-Pierre**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- M. **EECKHOUTTE Michel**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
- M. **EUZEBY Jean**, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*
- M. **FRANC Michel**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- M. **MARTINEAU Guy**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*
- M. **MILON Alain**, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*
- M. **PETIT Claude**, *Pharmacie et Toxicologie*
- M. **REGNIER Alain**, *Physiopathologie oculaire*
- M. **SAUTET Jean**, *Anatomie*
- M. **TOUTAIN Pierre-Louis**, *Physiologie et Thérapeutique*

PROFESSEURS 2^e CLASSE

- Mme **BENARD Geneviève**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
- M. **BERTHELOT Xavier**, *Pathologie de la Reproduction*
- M. **CORPET Denis**, *Science de l'Aliment et Technologies dans les industries agro-alimentaires*
- M. **DUCOS DE LAHITTE Jacques**, *Parasitologie et Maladies parasitaires*
- M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
- Mme **KOLF-CLAUW Martine**, *Pharmacie -Toxicologie*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*
- M. **LIGNEREUX Yves**, *Anatomie*
- M. **PICAVET Dominique**, *Pathologie infectieuse*
- M. **SHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*

PROFESSEUR ASSOCIÉ

- M. **HENROTEAUX Marc**, *Médecine des carnivores*

INGÉNIEUR DE RECHERCHES

- M. **TAMZALI Youssef**, *Clinique équine*

PROFESSEURS CERTIFIES DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

- Mme **MICHAUD Françoise**, *Professeur d'Anglais*
M. **SEVERAC Benoît**, *Professeur d'Anglais*

MAITRE DE CONFERENCES HORS CLASSE

- M. **JOUGLAR Jean-Yves**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*

MAITRES DE CONFERENCES 1^{ère} CLASSE

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*
M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
Mme **BOUCRAUT-BARALON Corine**, *Pathologie infectieuse*
Mlle **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Physiologie et Thérapeutique*
Mme **BRET-BENNIS Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
Mlle **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
M. **DUCOS Alain**, *Zootechne*
M. **DOSSIN Olivier**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la Reproduction*
M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*
M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **MESSUD-PETIT Frédérique**, *Pathologie infectieuse*
Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*
Mme **RAYMOND-LETRON Isabelle**, *Anatomie pathologique*
M. **SANS Pierre**, *Productions animales*
Mlle **TRUMEL Catherine**, *Pathologie médicale des Equidés et Carnivores*
M. **VALARCHER Jean-François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*
M. **VERWAERDE Patrick**, *Anesthésie, Réanimation*

MAITRES DE CONFERENCES 2^e CLASSE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
Mlle **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie*
Mme **CAMUS-BOUCLAINVILLE Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
Mme **COLLARD-MEYNAUD Patricia**, *Pathologie chirurgicale*
M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie du Bétail*
M. **GUERIN Jean-Luc**, *Productions animales*
M. **MARENDA Marc**, *Pathologie de la Reproduction*
M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*

MAITRES DE CONFERENCES CONTRACTUELS

- M. **DESMAIZIERES Louis-Marie**, *Clinique équine*
M. **REYNOLDS Brice**, *Pathologie chirurgicale*

ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

- Mme **MEYNADIER-TROEGELER Annabelle**, *Alimentation*
M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*
M. **MONNEREAU Laurent**, *Anatomie, Embryologie*

A Monsieur le Professeur Jean PARINAUD

Professeur des Universités
Praticien hospitalier
Biologie du développement et de la Reproduction

Qui nous a fait l'honneur de présider notre jury de thèse.
Hommages respectueux.

A Monsieur le Professeur Roland DARRE

Professeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Productions animales

Qui nous a proposé ce travail et soutenu dans sa réalisation.
Qu'il trouve ici l'expression de nos remerciements et de nos sentiments respectueux.

A Madame le Docteur Nicole HAGEN-PICARD

Maître de Conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Pathologie de la Reproduction

En remerciement pour son aide et pour l'intérêt qu'elle a porté à notre travail.

A mes parents,
Vous qui m'avez transmis votre passion pour l'élevage et votre sens du travail.
Je vous remercie de tout mon cœur pour votre constante présence à mes côtés.

A Céline,
Pour le soutien et le bonheur que tu m'apportes chaque jour. Tu comptes tellement pour moi.

A Jean-Luc, Nathalie, Marlène et Thomas,
Votre gaieté anime les moments que nous passons ensemble.

A ma grand-mère,
Dont le souvenir reste présent en moi.

A Brassac, Manimal et à tous mes amis,
Pour ce que nous avons vécu et vivrons encore ensemble.

A Frédéric Huart et Laurent Senechau de Montardon, à Laurent Journaux de l'Institut de
l'Elevage ainsi qu'à Charles Magnoac de Midatest pour leur aide et leur disponibilité.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	15
-------------------	----

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE.....	17
-----------------------------	----

I. INTERET DU SUIVI DE LA COMPOSITION CORPORELLE DES BOVINS.....	17
A. Vache allaitante.....	17
1) Gestion des réserves énergétiques des vaches allaitantes au niveau du troupeau	17
2) Limites de l'utilisation des réserves corporelles des vaches allaitantes.....	17
3) Bilan : nécessité de suivre l'état corporel du troupeau.....	18
B. Vache laitière : utilisation de la note d'état corporel dans la conduite du troupeau laitier.....	18
C. Bovins destinés à la boucherie.....	20
1) Situation actuelle de la consommation de viande bovine et attente des consommateurs.....	20
2) Notion de qualité de la viande et intérêt de la connaissance de l'état d'engraissement.....	21
3) Atouts de la Blonde d'Aquitaine dans ce contexte.....	23
D. Amélioration génétique.....	24
II. PHYSIOLOGIE DU TISSU ADIPEUX ET CINETIQUE DES DEPOTS DE GRAS.....	25
A. Développement du tissu adipeux.....	25
1) Structure du tissu adipeux.....	25
2) Rôle métabolique de l'adipocyte.....	25
3) Ontogenèse et différenciation de la cellule adipeuse.....	26
4) Croissance cellulaire du tissu adipeux des bovins.....	26
B. Régulation du métabolisme lipidique.....	27
1) Régulation nutritionnelle du métabolisme lipidique tissulaire.....	27
2) Régulations hormonales.....	28
C. Croissance et développement des bovins.....	28
1) Notion de coefficient allométrique.....	28
2) Répartition des dépôts adipeux chez les bovins.....	30
3) Illustrations zootechniques des variations de la composition corporelle des bovins.....	34
III. TECHNIQUES ACTUELLES D'ESTIMATION DE LA COMPOSITION CORPORELLE DES BOVINS.....	38
A. Note d'état d'engraissement.....	38
1) Méthode de notation des vaches laitières.....	39
2) Méthode de notation des bovins de races à viande.....	39
3) Validité de la méthode.....	41
B. Méthodes utilisant la technologie des ultrasons.....	41
1) Echographie.....	41
2) VOS.....	53

C. Méthodes réservées au domaine de la recherche.....	60
1) Estimation de l'état d'engraissement des bovins vivants à partir de la taille des cellules adipeuses	60
2) Estimation de la composition de la carcasse des taurillons à partir de la composition de la sixième côte	61
3) Dosage sérique de leptine.....	61
4) Estimation de la composition corporelle des bovins à partir de l'espace de diffusion de l'eau lourde	62
5) Impédancemétrie	63

PARTIE EXPERIMENTALE 66

I. PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....	66
A. Matériel et méthode VOS.....	66
1) Matériel	66
2) Sites de mesures.....	66
3) Réalisation des mesures	67
B. Schéma expérimental à Pépieux	67
1) Animaux	67
2) Logement.....	67
3) Durée de l'expérimentation	67
4) Mesures	68
5) Traitement des données	68
C. Matériel et méthode de l'échographe.....	68
1) Matériel	68
2) Sites de mesures.....	69
3) Réalisation des mesures	69
4) Traitement informatique des images.....	69
D. Schéma expérimental à Montardon	71
1) Animaux	71
2) Période d'étude	71
3) Logement.....	72
4) Alimentation	72
5) Mesures	72
II. ANALYSE DES RESULTATS.....	72
A. Cinétique des mesures VOS	72
1) Taurillons de Pépieux.....	72
2) Vaches de Montardon	74
B. Cinétique des variables mesurées par échographie	74
1) Luminosité de l'épaule	74
2) Luminosité du filet	74
3) Epaisseur de gras sous-cutané	75
C. Relation entre mesures échographiques et VOS au site de l'épaule sur les taurillons limousins et les vaches blondes d'Aquitaine	75
D. Relation entre les mesures VOS précédant l'abattage et les pointages carcasses	76

E.	Relation entre mesures in vivo des vaches (VOS et échographe) avec les analyses de carcasses	77
1)	Corrélations entre mesures in vivo et le poids des gras de rognons	77
2)	Corrélations entre mesures in vivo et le rapport gras/viande de la 6 ^{ème} côte	78
3)	Corrélations entre mesures in vivo et le pourcentage de lipides intramusculaires de la noix d'entrecôte.....	79
F.	Détermination du meilleur paramètre de prédiction de l'état d'engraissement	80
1)	Indice de précision d'une variable prédictive.....	80
2)	Résultats	81
III.	DISCUSSION	82
A.	VOS.....	82
B.	Echographe.....	83
CONCLUSION.....		84

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLEAUX

Tabl. 1 : Paramètres de la qualité aux différents stades de la filière (source : Langlois, 1991).	22
Tabl. 2 : qualité des carcasses d'animaux de différents types et races (source : Langlois, 1991).	24
Tabl. 3 : coefficients d'allométrie de jeunes bovins limousins entre 9 et 19 mois (source : Robelin <i>et al.</i> , 1977).	29
Tabl. 4 : grille de notation de l'état corporel des bovins de races à viande (source : Agabriel, 1986).	40
Tabl. 5 : coefficients de détermination entre les mesures échographiques et les paramètres abattoir	78
Tabl. 6 : bilan des coefficients de détermination des mesures in vivo et des analyses post- mortem.	79
Tabl. 7 : caractéristiques de chaque variable prédictive.	81
Tabl. 8 : valeurs individuelles de la variable EPVOS pour les taurillons de Pépieux.	102

GRAPHIQUES

Graph. 1 : état corporel conseillé pour la vache laitière au cours du cycle de production (source : Parker, 2002).	20
Graph. 2 : évolution de la composition corporelle d'un jeune bovin laitier de 200 à 550 kg de poids vif (source : Micol <i>et al.</i> , 1993).	30
Graph. 3 : évolution de l'état d'engraissement des taurillons en fonction de la masse corporelle selon la race (source : Robelin, 1978).	32
Graph. 4 : effet de la durée d'engraissement sur la composition de vaches de réforme Charolaises (source : Dumont <i>et al.</i> , 1991).	37
Graph. 5 : effet de la durée d'engraissement sur la composition du gain de poids de carcasse de vaches de réforme Charolaises (source : Dumont <i>et al.</i> , 1991).	37
Graph. 6 : cinétique de la variable EPVOS des taurillons (courbes individuelles).	73
Graph. 7 : cinétique de l'épaisseur de gras sous-cutané des vaches (courbes individuelles). ...	75
Graph. 8 : corrélation entre les paramètres VOS et échographiques au site de l'épaule	76
Graph. 9 : cinétique de la variable FVOS (moyennes par lots).	100
Graph. 10 : cinétique de la variable EPVOS (moyennes par lots).	101
Graph. 11 : cinétique de la variable EPVOS (courbes individuelles).	104
Graph. 12 : cinétique de la variable LUMÉPAUL des vaches (courbes individuelles).	105
Graph. 13 : cinétique de la variable LUMFIL des vaches (courbes individuelles).	106
Graph. 14 : corrélations des variables VOS avec le rapport gras/viande de la côte.	107
Graph. 15 : corrélations des variables échographiques avec le rapport gras/viande de la côte.	108

FIGURES

Fig. 1 : schéma de l'appareil VOS.....	54
Fig.2 : différences des principes de fonctionnement entre un échographe et le VOS.	55
Fig. 3 : calcul de l'indice de précision.....	80

PHOTOGRAPHIES

Photo 1 : image échographique du filet.....	70
Photo 2 : image échographique de l'épaule.....	71

INTRODUCTION

L'appréciation de la composition corporelle des bovins est depuis longtemps un paramètre essentiel de la gestion des troupeaux, qu'ils soient laitiers ou allaitants. Les éleveurs évaluent régulièrement l'état des réserves de leurs animaux et y adaptent leur conduite en terme d'alimentation, de reproduction et d'engraissement.

En pratique, l'appréciation de l'état corporel des bovins se fait couramment par observation et maniement des animaux. Mais, cette méthode étant subjective et relativement peu précise, on a cherché d'autres moyens d'estimer la composition corporelle des bovins. Avec les progrès de la physique, la technologie des ultrasons a été adaptée à cette utilisation : d'une part pour obtenir des images des tissus internes (c'est l'échographie), d'autre part en étudiant la vitesse de ces ondes, celle-ci variant selon la composition du milieu traversé (c'est le système VOS : Velocity Of Sound). Ces méthodes sont plus coûteuses mais aussi plus précises et permettent de limiter les erreurs dues à l'interprétation visuelle.

Notons qu'il existe d'autres méthodes telles que la mesure de la taille des adipocytes qui sont très précises et fiables ; elles sont cependant réservées au domaine expérimental, compte tenu de la lourdeur du protocole et de leur prix.

C'est pourquoi nous nous sommes intéressés aux deux techniques utilisant les ultrasons, celles-ci étant déjà le sujet de nombreuses publications et ayant été étalonnées sur le terrain, aux Etats-Unis majoritairement pour l'échographie, au Royaume-Uni et en France par l'Institut de l'Elevage pour le VOS.

Nous allons donc présenter tout d'abord les multiples situations où il est intéressant de connaître la composition corporelle des bovins puis les bases physiologiques de ses variations.

Ensuite nous étudierons les moyens actuels d'appréciation de l'état corporel en précisant leur mise en œuvre, leur validité et leur intérêt particulier.

Enfin, dans la partie expérimentale, nous nous consacrerons à l'utilisation pratique et aux performances de l'échographe et du VOS en les comparant à la méthode de référence mise au point par l'INRA : la dissection anatomique de la 6^{ème} côte. Dans ce cadre, nous avons travaillé sur deux types de bovins de races à viande : des taurillons Limousins et des vaches de réforme Blondes d'Aquitaine.

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

I. INTERET DU SUIVI DE LA COMPOSITION CORPORELLE DES BOVINS

Une des manières d'apprécier la composition corporelle des bovins est d'estimer leurs réserves adipeuses ; la technique la plus simple de notation de l'état corporel des bovins est celle des maniements ; cette méthode (qui sera décrite ultérieurement) consiste à attribuer une note d'état d'engraissement allant de 0 à 5 par observation et palpation de la vache. Dans cette partie, les références à des notes d'état d'engraissement seront toutes issues de ce système de notation.

A. Vache allaitante (77)

1) Gestion des réserves énergétiques des vaches allaitantes au niveau du troupeau

Dans les systèmes d'élevage français notamment, les vaches allaitantes connaissent une période annuelle hivernale de restriction alimentaire qu'elles sont capables de supporter grâce à leurs réserves corporelles accumulées pendant la saison de pousse maximale de l'herbe.

Ces réserves corporelles constituées principalement de lipides sont un moyen d'adaptation aux ressources et permettent à l'éleveur de réaliser des économies alimentaires sans affecter les performances de ses animaux, ceci jusqu'à un certain point.

Ces économies alimentaires s'expliquent par le fait qu'une vache sous-alimentée est capable de réduire ses besoins d'entretien.

Dans ces conditions, grâce à la mobilisation des réserves, ni la vitalité, ni le poids du veau à la naissance, ni la production laitière de la mère et donc la croissance de son veau ne seront affectés. Il est pourtant nécessaire de préciser que ceci est applicable aux multipares uniquement et que les primipares ont des besoins supérieurs, que les réserves ne suffisent pas à couvrir.

L'effet de ces restrictions hivernales sera gommé au printemps par le fait que plus une vache a perdu pendant l'hiver, plus elle reconstitue vite ses réserves lors de la remise à l'herbe.

2) Limites de l'utilisation des réserves corporelles des vaches allaitantes

Réaliser des économies sur l'alimentation a pourtant des limites qui résident en ses conséquences sur la reproduction : l'état corporel joue un rôle majeur dans la reproduction de

la vache à viande. Un point d'état corporel en moins à la fin de l'hiver se traduit par un retard de la première ovulation et des premières chaleurs, ceci aboutissant à l'allongement de l'intervalle vêlage-vêlage.

Agabriel *et al.* (2) ont observé des vaches Limousines et Charolaises pendant deux années et on remarqué que l'intervalle vêlage-vêlage (IVV) s'accroît quand l'état d'engraissement diminue en dessous d'une note seuil variant de 1.5 pour les vêlages tardifs à 3 pour les vêlages précoces. L'effet d'un point d'écart à la fin de l'hiver se traduit par un allongement de l'IVV variant de 0 à 30 jours selon l'âge, la race et la précocité du vêlage : plus le vêlage est précoce, le bilan alimentaire déficitaire et la vache jeune, plus l'IVV augmente.

Enjalbert (30) confirme ces observations : un déficit énergétique entraînant une perte de note d'état supérieure ou égale à 1.5 point retarde les premières ovulations et atténue fortement l'expression des chaleurs ce qui, par voie de conséquence, aboutit à l'allongement de l'IVV.

Mialon (65) précise ces observations sur des Charolaises : une augmentation de l'état corporel de 1.5 à 4.5 entraîne une diminution de l'intervalle vêlage-premières chaleurs de 10 jours.

Enfin, Gary *et al.* (36) ont étudié les résultats de reproduction de 55 élevages de Blondes d'Aquitaine du sud-ouest et ont aussi noté la sensibilité de cette race aux périodes de restriction alimentaire : le délai de restauration de l'activité ovarienne dépend d'abord de l'évolution du poids avant vêlage et de l'état corporel au moment du part. La suralimentation après vêlage ne semble alors économiquement intéressante que pour des vaches maigres au moment de la mise-bas (état corporel entre 1 et 2).

3) Bilan : nécessité de suivre l'état corporel du troupeau

Il est donc intéressant de profiter de ces caractéristiques des vaches allaitantes mais, pour les exploiter correctement, il est nécessaire de connaître l'état de leurs réserves en début d'hivernage et en tout cas quelques mois avant le vêlage pour arriver à un état corporel correct à la mise bas. Des réserves suffisantes au vêlage ainsi qu'une réalimentation abondante concomitante à la mise à l'herbe assureront une bonne lactation et une saison de reproduction fertile.

Evaluer les réserves des vaches allaitantes aux moments clés du cycle de production est donc un outil indispensable à la conduite de l'alimentation et de la reproduction qui sont les bases de la rentabilité du troupeau.

B. Vache laitière : utilisation de la note d'état corporel dans la conduite du troupeau laitier

Selon Parker (73), il y a six époques clés dans le cycle de production annuelle des vaches laitières où leur état corporel doit être évalué : au milieu du tarissement, lors du vêlage et après 45, 90, 180 et 270 de lactation. Ces dates correspondent aux moments où l'on doit prendre des décisions importantes en terme d'alimentation, de reproduction et de gestion sanitaire des vaches.

Tarissement

La note d'état corporel idéale pour une vache tarie est de 3.5 ; il est important de se situer entre 3 et 4 pour éviter les problèmes au vêlage et au début de lactation. Le tarissement permet de niveler les écarts creusés pendant la lactation et non rattrapés à la fin de celle-ci.

Début de lactation

C'est lors de cette période que la plupart des problèmes liés à l'état corporel peuvent survenir. La vache trop grasse au vêlage (note d'état > 4) sera prédisposée au syndrome de la vache grasse : vêlage difficile, rétention placentaire, métrite, mammites, déplacement de caillette, cétose et fièvre vitulaire.

En revanche une vache trop maigre (note d'état < 3) produira moins de lait et sera plus sujette à des problèmes de fertilité.

Durant les deux premiers mois de lactation, une vache adulte moyenne perd entre 0.5 et 1 point d'état corporel pour se stabiliser à une note de 3 vers la dixième semaine. La reprise de poids est alors favorable à de bonnes performances de reproduction.

Milieu de lactation

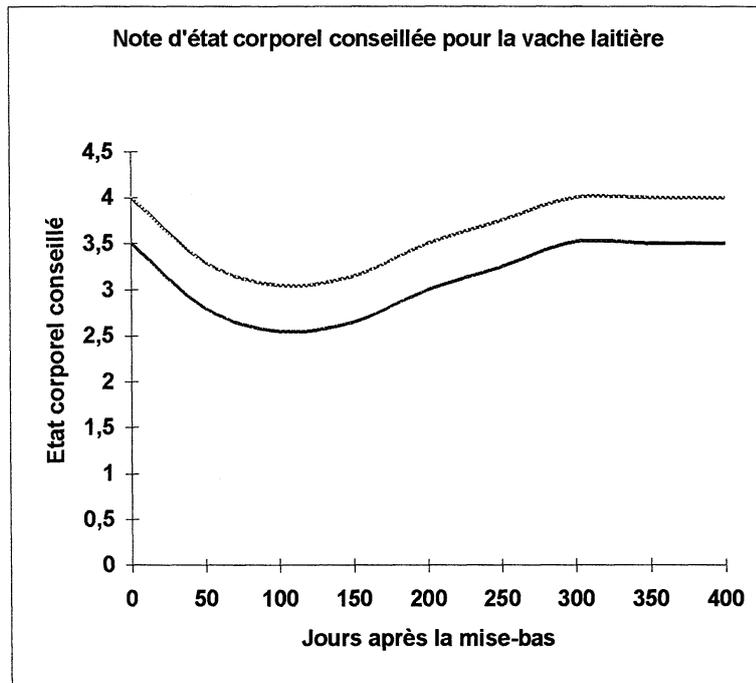
Vers le 180^{ème} jour de lactation, les vaches doivent avoir commencé à reconstituer leurs réserves et remonter à une note de 3 à 3.5. Il faut alors surveiller celles qui sont déjà au-delà de 3.5 pour éviter qu'elle ne prennent trop d'embonpoint.

Fin de lactation

La note moyenne à 270 jours de lactation doit être de 3.5 ; on prendra garde à ce que les primipares reconstituent leurs réserves pour ne pas les épuiser dès leur première lactation et compromettre leur avenir.

Le graphique suivant illustre les propos précédents en présentant l'état corporel conseillé en fonction de la période du cycle de production.

Graph. 1 : état corporel conseillé pour la vache laitière au cours du cycle de production (source : Parker, 2002).



C. Bovins destinés à la boucherie (4), (24)

1) Situation actuelle de la consommation de viande bovine et attente des consommateurs

Après une croissance régulière au cours des années 1950 à 1980, la consommation de viande semble atteindre un point de saturation dans beaucoup de pays développés. En France, la consommation de viande de bœuf a diminué de 1 % par an dans les années 1980 puis de 1.5 % de 1990 à la première crise de l'ESB en 1996 (23).

La découverte d'un cas de « vache folle » dans la boucherie d'un abattoir français le 21 octobre 2000 a provoqué une crise plus profonde et plus durable que la crise importée du Royaume-Uni en 1996. En 2002, cette crise n'est pas encore complètement surmontée en France.

Elle a obligé la filière bovine à resserrer la traçabilité de la viande bovine et à augmenter le niveau de sécurité alimentaire notamment grâce au dépistage ESB systématique à l'abattoir sur les animaux de plus de deux ans. Ceci a eu pour effet d'augmenter les coûts de production de l'ensemble de la filière (60) mais a surtout rassuré le consommateur et la consommation actuelle de viande bovine atteint 95 % de celle de 1999.

Dans ce contexte, le consommateur français s'est orienté vers une consommation de vaches allaitantes et on a observé une augmentation de la part de marché du jeune bovin au détriment des vaches laitières. Toutefois, la consommation de vaches de réforme laitières semblerait augmenter ces derniers mois.

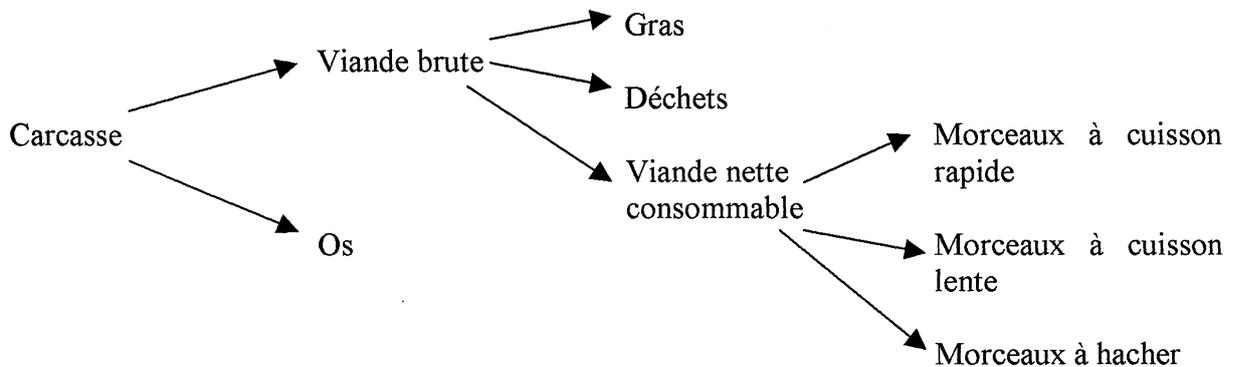
Par conséquent, à la sortie de cette crise, le consommateur recherche en premier lieu la sécurité alimentaire. Ensuite il s'intéresse au prix et aux qualités organoleptiques de la viande (jutosité, saveur, tendreté, couleur). La filière bovine doit donc fournir des produits de qualité. Or la notion de qualité appliquée à la viande bovine recouvre différentes facettes que l'on va préciser pour le critère qui nous concerne : l'état d'engraissement de la carcasse.

2) Notion de qualité de la viande et intérêt de la connaissance de l'état d'engraissement

Pour essayer de définir le terme de qualité de la viande, nous nous appuyerons sur le rapport de Quilichini (78).

(a) Les étapes conduisant de la carcasse à la viande (45)

La carcasse est parée, découpée et désossée. Les morceaux subissent ensuite un parage complet par le boucher de façon à les rendre aptes à la vente en l'état. On peut ensuite classer les morceaux en 3 catégories : les morceaux à cuisson rapide, les morceaux à cuisson lente et les morceaux à hacher.



(b) Qualité pour l'éleveur

L'éleveur vend sa bête en négociant son prix au kilogramme de carcasse, c'est pourquoi il préfère bien finir ses animaux afin qu'ils prennent du poids en muscle et en graisse.

(c) Qualité pour le transformateur

Le transformateur évite les carcasses trop grasses (notées 4 et 5 sur la grille EUROP) afin d'économiser des frais de parage et de découpe supplémentaires. De plus un état d'engraissement trop important gêne le refroidissement de la carcasse. Une carcasse trop grasse entraîne une diminution du rendement en viande commercialisable de la carcasse. Le transformateur recherche aussi des carcasses bien conformées, de façon à avoir un meilleur rendement à la découpe et obtenir le plus possible de morceaux nobles. La préoccupation de

connaître la composition et en particulier le pourcentage de dépôts adipeux de la carcasse est réelle et son évaluation passe pour l'instant par la notation de l'état corporel des bêtes ou par les pointages et pesée des carcasses.

Pourtant, certaines entreprises françaises, soucieuses de mieux évaluer la composition de la carcasse, ont mis en place un jugement à la coupe réalisé après la découpe de gros des carcasses. Cette méthode permet d'améliorer la précision mais est tardive (24 à 48 heures après l'abattage).

(d) Qualité pour le consommateur

La position du consommateur varie selon ses priorités : la plupart des consommateurs mettent en avant des critères diététiques et de ce fait préfèrent une viande peu grasse : une enquête de l'Institut de l'Élevage a d'ailleurs montré qu'un consommateur sur deux achète des morceaux sans trace de gras apparent. Toutefois, il reste des amateurs de viande qui la préfèrent plus grasse afin qu'elle ait plus de saveur.

(e) Synthèse sur la notion de qualité de la viande

Un animal bien fini est intéressant pour l'éleveur et pour un amateur de viande aux qualités gustatives supérieures mais l'est moins pour le transformateur ce qui, au final engendre un prix élevé pour ce type de viande. Un animal plus maigre plaît davantage au transformateur et correspond plus à la tendance générale évoluant vers des régimes alimentaires moins gras ; ces viandes sont en général vendues moins cher.

On constate donc que la notion de qualité de viande varie entre les différents maillons de la filière bovine (cf. tableau 1), c'est pourquoi il serait intéressant de posséder un moyen précis d'évaluer l'état d'engraissement des animaux afin que chacun puisse trouver la qualité de viande qu'il recherche et donc d'orienter précocement un animal vers un marché donné.

De nombreux travaux sont menés dans ce sens au niveau de la production et de l'amélioration génétique afin de mieux adapter la production à la demande. Notre étude entre dans ce cadre, dans le sens où prédire la quantité de gras d'une carcasse permet de s'adapter aux exigences des transformateurs de la filière bovine et des consommateurs.

Tabl. 1 : Paramètres de la qualité aux différents stades de la filière (source : Langlois, 1991).

PRODUCTEUR	TRANSFORMATEUR	DISTRIBUTEUR	CONSOMMATEUR
Poids	Rendement en viande	Présentation : <ul style="list-style-type: none"> • couleur • gras • poids des morceaux 	Qualités organoleptiques
Classement : <ul style="list-style-type: none"> • conformation • gras 	Pourcentage de morceaux à cuisson rapide	Conservation	Qualités diététiques

3) Atouts de la Blonde d'Aquitaine dans ce contexte (45), (58)

Les études de l'Institut de l'Élevage sur les qualités bouchères de la Blonde d'Aquitaine confirment l'adaptation de cette race au marché.

Les génisses étudiées âgées de 27 mois en moyenne ont été finies avec deux régimes alimentaires à base de maïs : le premier était composé de maïs grain, de soja et de foin, le second associait 40% d'ensilage de maïs et 60% de concentré.

Cette expérience fait apparaître les points forts de la Blonde d'Aquitaine en comparaison à d'autres races françaises (cf. tableau 2):

Sur la carcasse :

- les carcasses sont lourdes (388 kg de poids chaud en moyenne pour des génisses de 27 mois).
- elles sont bien conformées : classement U en conformation et 3+ en note de gras.
- elles présentent peu de dépôts adipeux : les gras de rognons et de parage sont peu développés.
- leur rendement à la découpe est très bon (cf. tableau 2): elles comportent peu d'os, peu de gras et peu de déchets ce qui aboutit à un rendement en viande nette excellent de 74%.
- la proportion de morceaux à cuisson rapide (beefsteaks, rôtis) est très élevée, ce qui permet de mieux valoriser la carcasse.

Sur la viande :

- la viande est de couleur claire, ce qui est une qualité pour l'exportation mais plutôt un défaut pour le marché français ; il faut quand même préciser que ceci est surtout valable pour les animaux jeunes, les vaches donnant une viande de couleur comparable aux autres races.
- la viande ne présente pas beaucoup de persillé, ce qui attire l'œil de la majorité des consommateurs, ceux-ci préférant des morceaux d'apparence peu grasse.
- la viande de génisse est très tendre ; or la tendreté est la qualité organoleptique la plus recherchée par le consommateur.
- la viande de génisse est aussi savoureuse que celle de vaches de réforme.

Tabl. 2 : qualité des carcasses d'animaux de différents types et races (source : Langlois,1991).

TYPE	JEUNES BOVINS						GENISSES	
Race	Blonds	Limousins	Parthenais	Charolais	Normands	Maine-Anjou	Blondes	Limousines
Age	18mois	24 mois	19 mois	24 mois	17 mois	18mois	24 mois	30 mois
CARACTERISTIQUES DES CARCASSES								
Poids	445	424	443	405	361	405	388	304
Confor.	U	U=	U-	U=	R=	R=	U=	R+
Gras	2+	2=	2+	3-	2+	3=	3+	3+
COMPOSITION DES CARCASSES								
% os	15.2	13.3	14	15.7	16.3	16.4	13.5	14.1
% gras + déchets	10.4	10.5	8.8	13.5	14.1	14.1	12.7	13.6
% viande nette	74.4	76.1	77.2	70.8	69.6	69.5	73.8	72.3
% viande cuisson rapide	55.1	54.4	53.4		53.0	53.3	58.6	58.1

D. Amélioration génétique (83)

Dans les programmes d'amélioration génétique des races bovines destinées à la production de viande, le contrôle individuel des jeunes taureaux est une étape essentielle pour améliorer les aptitudes bouchères. La variabilité d'origine génétique de ces dernières est en effet suffisamment élevée pour qu'une sélection de ces jeunes taureaux sur leurs propres performances permette d'améliorer les aptitudes des descendants.

En station de contrôle individuel, on mesure donc la croissance pondérale et la morphologie de ces candidats à l'insémination artificielle en vue d'évaluer *in vivo* leur composition corporelle confirmant leur forte croissance musculaire. Cette étude montre en effet que la sélection sur la croissance musculaire sera d'autant plus efficace qu'elle inclura une mesure de la composition corporelle.

D'autre part, en station de contrôle sur descendance, il serait intéressant de mesurer *in vivo* la composition corporelle des taurillons fils des taureaux d'insémination artificielle en testage en vue de préciser les données apportées par leur abattage. A l'heure actuelle, les seules données apportées par le contrôle sur descendance sont les pesées et pointages *in vivo* ainsi que post mortem. Par conséquent, une méthode de mesure de la composition corporelle *in vivo* serait profitable à la sélection des races bouchères sur la croissance musculaire.

II. **PHYSIOLOGIE DU TISSU ADIPEUX ET CINETIQUE DES DEPOTS DE GRAS**

Quelques points sur la physiologie du tissu adipeux et le mode de constitution des réserves corporelles des bovins sont nécessaires à la compréhension des techniques d'évaluation de la composition corporelle.

A. Développement du tissu adipeux (91)

1) Structure du tissu adipeux

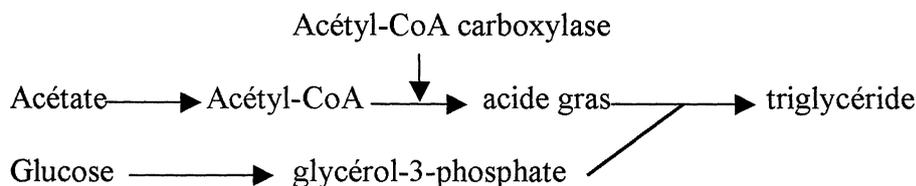
Le tissu adipeux est constitué d'adipocytes structurés dans des fibres conjonctives ; il se développe surtout autour des gros vaisseaux, entretenant des échanges avec tout l'organisme.

2) Rôle métabolique de l'adipocyte

(a) Stockage de l'énergie excédentaire (lipogénèse)

L'énergie circulant sous forme de triglycérides et de phospholipides transportés dans les lipoprotéines, d'acides gras non estérifiés et d'acides gras volatils va servir à la lipogénèse lors de bilan énergétique positif. Cette réaction se décompose en approvisionnement en acides gras à partir des formes circulantes citées et en estérification en triglycérides, forme de stockage. Cette dernière étape nécessite l'apport de glycérol provenant du glucose.

Notons que chez les ruminants les substrats essentiels de la lipogénèse sont les acides gras volatils et particulièrement l'acétate obtenu dans le rumen à partir des glucides alimentaires. (105).



(b) Restitution de l'énergie (lipolyse)

Lors de bilan énergétique négatif, la concentration plasmatique en insuline diminue et la lipase hormono-sensible du tissu adipeux hydrolyse les triglycérides dans l'adipocyte pour

obtenir des acides gras non-estérifiés (AGNE). Une partie des AGNE est réestérifiée *in situ* en proportion variable selon les besoins : elle est faible lors de sous-nutrition et importante lors de bilan énergétique positif. Il y a donc en permanence lipolyse et réestérification, ce qui permet une adaptation rapide du métabolisme du tissu adipeux aux besoins.

3) Ontogenèse et différenciation de la cellule adipeuse

Le tissu adipeux se forme au départ par prolifération de cellules indifférenciées qui donneront les adipocytes lors de leur différenciation (processus qui a lieu très tôt durant la vie embryonnaire) puis par hypertrophie de ces derniers qui sont des cellules différenciées capables d'assurer leur fonction. Pour cela elles disposent d'un équipement enzymatique spécifique :

- protéines nécessaires à la lipogenèse
- protéines nécessaires à la lipolyse
- récepteurs hormonaux pour répondre aux demandes de l'organisme exprimées par les messagers hormonaux.

4) Croissance cellulaire du tissu adipeux des bovins

Le tissu adipeux est présent dès la vie fœtale sous forme de tissu adipeux brun indispensable au nouveau-né pour assurer sa thermogenèse ; cette forme disparaît après quelques semaines de vie post-natale.

On peut distinguer deux phénomènes de croissance du tissu adipeux : l'hyperplasie (augmentation du nombre des adipocytes) et l'hypertrophie (augmentation de la taille des adipocytes).

L'hyperplasie a lieu majoritairement en début de vie post-natale avant le poids de 100 kg (on passe de 19 milliards de cellules en fin de vie fœtale à 124 milliards à l'âge adulte).

L'hypertrophie des adipocytes suit la quantité de lipides stockés, sachant que le dépôt de lipides augmente surtout à partir de la puberté. A l'âge adulte, l'augmentation de l'état d'engraissement se traduit donc essentiellement par l'augmentation de la taille des adipocytes d'où la mise au point de la méthode d'estimation de la composition corporelle des bovins à partir du diamètre de ces cellules par Robelin et Agabriel (94).

B. Régulation du métabolisme lipidique

1) Régulation nutritionnelle du métabolisme lipidique tissulaire (32)

Les besoins énergétiques des vaches varient au cours du cycle de production (gestation, allaitement ou lactation...) et les ressources dont elles disposent fluctuent, surtout en élevage allaitant où les saisons ont des répercussions importantes sur la ration (pâturages abondants au printemps, restrictions l'hiver). Les bovins constituent donc des réserves en période d'abondance et les mobiliseront si besoin. Nous allons étudier les mécanismes d'adaptation du métabolisme des lipides au niveau alimentaire de la ration.

(a) Lipogenèse

La capacité lipogénique du tissu adipeux est corrélée positivement au niveau alimentaire chez les ruminants.

Chez le ruminant en croissance, un jeûne de 8 jours diminue la synthèse d'acides gras de 98 % (32). Le rétablissement du niveau de synthèse normal dépend par la suite du degré de réalimentation : plus elle est forte, plus l'augmentation des activités lipogéniques est rapide. Notons qu'une durée minimale de réalimentation est nécessaire au recouvrement des valeurs usuelles de synthèse d'acides gras.

Remarque : activité de la lipoprotéine-lipase

C'est une glycoprotéine synthétisée et sécrétée par de nombreux tissus autres que le foie comme par exemple les muscles et le tissu adipeux ; elle hydrolyse les triglycérides contenus dans les lipoprotéines de très faible densité (VLDL) et les tissus concernés captent les acides gras obtenus.

Chez les ruminants, l'activité de cette enzyme dans les tissus adipeux et musculaire est dépendante du niveau alimentaire ; elle diminue fortement lors de sous-nutrition et augmente de nouveau si on rétablit une ration correcte.

(b) Lipolyse (16)

La lipomobilisation est très importante en début de lactation (une vache peut perdre de 30 à 60 % de ses lipides corporels), vu que la production laitière demande beaucoup d'énergie et que la capacité d'ingestion augmente lentement. Le potentiel lipolytique du tissu adipeux est alors pleinement exprimé et la constitution de réserves est mise en veille.

Ce phénomène d'adaptation à la production est appelé téléophorèse, par opposition à l'homéostasie qui désigne les mécanismes de maintien de l'équilibre des fonctions vitales de l'animal.

Le potentiel lipolytique de l'animal est régulé par ses besoins physiologiques et ses réserves lipidiques : leur mobilisation dépend de l'état corporel et de la balance énergétique. Lors de chute du bilan énergétique, le potentiel lipolytique β -adrénergique augmente, ce qui permet la survie via une adaptation rapide. Les mécanismes homéostatiques équilibrent à long terme les réserves adipeuses par des mécanismes de rétrocontrôle qui tendent à un retour à l'état

corporel de départ (par exemple les animaux les plus gras perdent plus lors de sous-nutrition et inversement, les plus maigres refont plus vite leurs réserves lors de réalimentation).

2) Régulations hormonales (18), (21)

(a) Lipogenèse

C'est l'insuline qui régule majoritairement les enzymes lipogéniques : elle stimule la lipogenèse *de novo* et l'estérification des acides gras, ainsi que la lipoprotéine-lipase; elle diminue la réponse lipolytique aux catécholamines. Elle a un rôle homéostatique.

(b) Lipolyse

En période de bilan énergétique négatif, la concentration plasmatique en AGNE augmente (ils sont libérés par le tissu adipeux), ce qui inhibe les enzymes lipogéniques (effet de rétrocontrôle). Au contraire de l'insuline, l'hormone de croissance (GH) a un rôle téléophrétique : elle diminue la réponse à l'insuline du tissu adipeux (on parle de résistance du tissu adipeux à l'insuline en début de lactation) et augmente sa réponse aux catécholamines.

Ces dernières stimulent la lipolyse ; chez les vaches en lactation, le nombre de leurs récepteurs du tissu adipeux est plus élevé, d'où la faculté accrue des hautes productrices à mobiliser leurs réserves.

C. Croissance et développement des bovins (86)

1) Notion de coefficient allométrique

L'accroissement du poids des animaux résulte de l'accroissement du poids des différents tissus corporels ; ceux-ci ont des évolutions différentes au cours du temps et on peut les caractériser par les équations d'allométrie d'Huxley où l'on exprime le poids Y d'un élément du corps en fonction du poids vif vide PVV (= poids vif – contenu digestif) selon la formule :

$$\text{Log } Y = a + b \text{ Log PVV}$$

La pente de cette droite b est appelée coefficient d'allométrie : c'est le rapport entre la croissance relative de l'élément Y et celle du poids vif vide.

Une valeur de b inférieure à 1 signifie que la croissance de l'élément considéré est plus lente que celle du poids vif, autrement dit que la proportion du poids de cet élément dans le poids vif vide diminue au cours de la croissance. Inversement, le poids d'un élément ayant une valeur de b supérieure à 1 augmente plus rapidement que le poids vif vide donc sa proportion augmente quand le poids vif vide augmente.

Donnons quelques exemples avec le tableau ci-dessous : il donne les coefficients d'allométrie des muscles, du squelette et des dépôts adipeux par rapport au poids vif vide de jeunes bovins mâles entiers de race Limousine entre 9 et 19 mois (95).

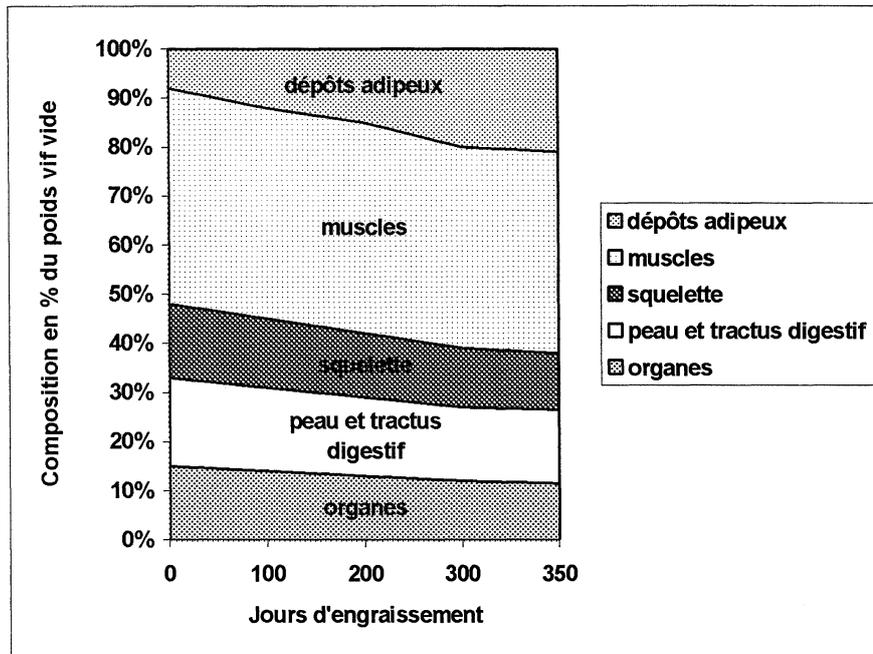
Tabl. 3 : coefficients d'allométrie de jeunes bovins limousins entre 9 et 19 mois (source : Robelin *et al.*, 1977).

Éléments corporels		Coefficient d'allométrie (b)
Muscles		1.01
Squelette		0.71
Dépôts adipeux totaux		1.59
Dépôts adipeux de la carcasse	internes	1.32
	intermusculaires	1.49
	sous-cutanés	2.44
Dépôts adipeux du 5 ^{ème} quartier	périrénaux	1.81
	péritonéaux	1.82
	mésentériques	1.48
	péricardiaques	1.02

On peut remarquer le fort coefficient du tissu adipeux sous-cutané, exprimant l'importance de ces dépôts chez la race Limousine. Les commentaires de ce tableau sont détaillés dans la partie suivante.

Comme deuxième illustration de la croissance des bovins on peut citer le graphique montrant les variations des proportions des différents tissus chez un taurillon laitier en période de croissance et d'engraissement.

Graph. 2 : évolution de la composition corporelle d'un jeune bovin laitier de 200 à 550 kg de poids vif (source : Micol *et al.*, 1993).



2) Répartition des dépôts adipeux chez les bovins (97)

L'engraissement des bovins s'accompagne de modifications dans la répartition des tissus avec surtout une augmentation importante de la part du tissu adipeux (chez les taurillons il passe de 8 à 15 % du poids vif vide lorsque celui-ci s'accroît de 250 à 550kg).

L'étude de la composition de jeunes limousins entre 9 et 19 mois (95) montre les coefficients d'allométrie moyens suivants : 0.74 pour le squelette, 1.01 pour les muscles et 1.59 pour les dépôts adipeux dans leur ensemble.

Il faut noter que ces coefficients varient au cours de la croissance : jusqu'à la puberté la croissance musculaire est forte et celle des dépôts adipeux modérée alors que par la suite les rapports s'inversent (augmentation nette du coefficient d'allométrie des gras après la puberté atteinte à un poids d'environ 350 kg ici).

On assiste parallèlement à une évolution de la répartition des dépôts adipeux qu'on peut classer en :

- gras de la carcasse :
 - * gras internes = gras des cavités thoracique et pelvienne
 - * gras intermusculaires
 - * gras sous-cutanés
- gras du cinquième quartier :
 - * gras périrénaux (appelés aussi gras de rognons)
 - * gras péritonéaux (situés autour du rumen)
 - * gras mésentériques (autour des intestins)
 - * gras péricardiaques

Nous allons donc détailler l'évolution des tissus au cours de l'engraissement ainsi que l'influence du sexe et du type des bovins.

(a) Répartition des différents dépôts adipeux chez un taurillon de 550 kg

Les gras intermusculaires sont prépondérants (plus de la moitié des dépôts totaux) alors que les gras sous-cutanés représentent environ 15 % du poids vif vide, les dépôts de la carcasse donnant un total de 77 % (91).

Les gras du cinquième quartier sont donc minoritaires et, parmi eux, on note l'importance des gras péritonéaux.

(b) Evolution au cours de l'engraissement

Les dépôts sous-cutanés ont une croissance plus rapide que celle des dépôts adipeux totaux (coefficient d'allométrie de 2.44 entre 9 et 19 mois (95)) donc leur proportion augmente ; ceci explique l'utilisation de l'appréciation visuelle des dépôts sous-cutanés dans l'estimation de l'état d'engraissement global. En revanche, les dépôts intermusculaires ont une croissance plus lente que la moyenne.

(c) Influence du génotype et du sexe

Les taurillons de race précoce (Prim'Holstein, Angus) ont plus de gras sous-cutanés et moins de gras intermusculaires que ceux des races tardives (Charolaise, Limousine, Blonde d'Aquitaine).

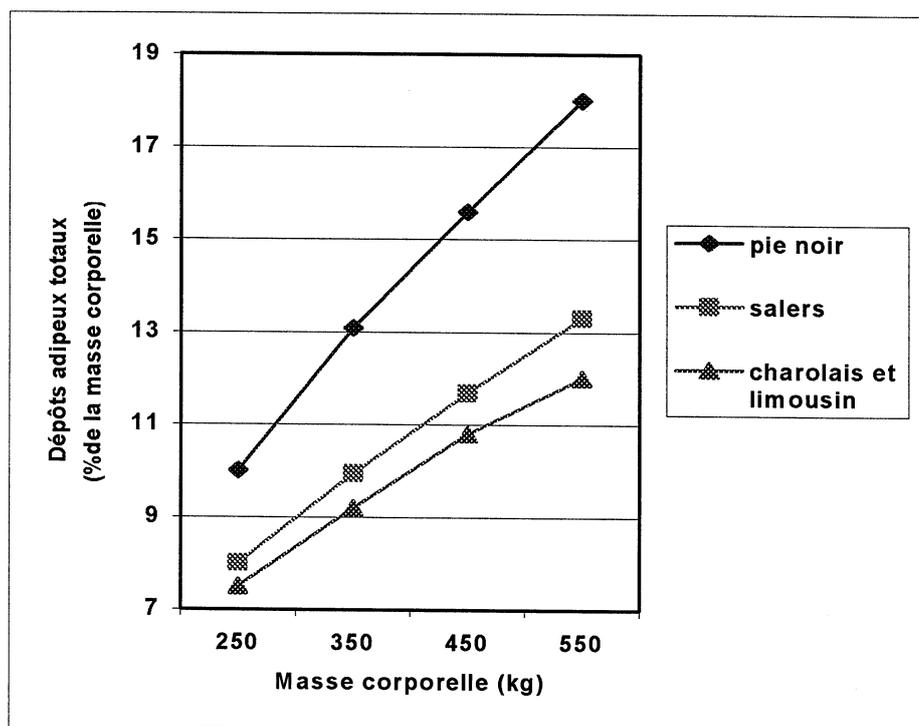
De fait, pour un même état d'engraissement, un taurillon Charolais sera plus lourd qu'une génisse ou qu'un taurillon Prim'Holstein. Réciproquement, pour un même poids d'abattage, un taurillon Prim'Holstein sera plus gras qu'un Charolais, d'où un meilleur rendement du Charolais.

Les différences de composition corporelle entre génotypes se répercutent donc sur les types de production en rapport avec la précocité des races (pour obtenir une carcasse d'état d'engraissement donné, on abattra les bovins de races précoces plus jeunes) mais aussi sur les besoins nutritionnels (8).

En effet, la valeur calorifique du kg de gain de poids vif, pour un même poids et un même gain de poids vif journalier, varie considérablement entre un taurillon Frison et un taurillon Limousin de 450 kg : on obtient les valeurs de 3200 kcal par kg de gain pour un Frison contre 2400 kcal pour un Limousin.

De ce fait, l'efficacité alimentaire d'un taurillon Limousin est supérieure à celle d'un Frison placé dans les mêmes conditions. Le graphique suivant illustre les différences de dépôts adipeux entre races.

Graph.3 : évolution de l'état d'engraissement des taurillons en fonction de la masse corporelle selon la race (source : Robelin, 1978).



En ce qui concerne l'effet du sexe, peu d'études sont disponibles mais selon Robelin (86) les génisses renferment de 26 à 60 % de lipides en plus que les mâles entiers de même génotype pour un poids de carcasse de 200 à 300 kg. Elles ont en effet une croissance pondérale plus faible mais un développement des dépôts adipeux plus rapide. Les bœufs ont une situation intermédiaire entre mâles et femelles.

(d) Teneur en lipides intramusculaires

Elle est constante, pour un état d'engraissement donné, quel que soit le type de bovin. Elle augmente au cours de l'engraissement mais cinq fois moins que le pourcentage de gras total de l'animal. Le persillé, auquel on associe les qualités organoleptiques de la viande, atteint donc des niveaux suffisants chez des animaux relativement gras.

Langlois cité dans le rapport intitulé « Le gras dans la viande des ruminants » (4) a montré que l'optimum de goût du faux-filet est obtenu pour un taux de lipides intramusculaires de 4 % du muscle frais environ. Cependant cet optimum n'est pas constant entre les muscles et a fortiori pour la carcasse.

L'institut de l'Élevage a donc lancé des études sur des jeunes bovins (4) : elles ont montré :

- une augmentation quasi-continue de la flaveur notée par dégustation lorsque la teneur en lipides intramusculaires augmente de 0 à 10 % puis un palier pour des valeurs supérieures à 10 %.

- des différences dans les taux de lipides intramusculaires selon les muscles et dans leur évolution au cours de l'engraissement :
 - le faux-filet, le filet et d'autres sont caractérisés par un taux moyen de lipides d'environ 1 %,
 - la hampe, le paleron et le muscle persillé par un taux voisin de 4 %.

D'autre part, certains muscles répondent à l'engraissement par une augmentation de leur taux de lipides (c'est le cas du faux-filet mais dans une plage limitée et du paleron avec une amplitude plus importante) et pour d'autres, le taux de lipides augmente puis stagne en fin d'engraissement. On imagine alors la difficulté de choisir un muscle dont l'évolution se rapprocherait de la plupart, d'autant que parmi les groupes décrits, on observe encore des variations. Cependant, on constate que les taux de lipides de certains muscles comme le faux-filet sont régulièrement bien corrélés à ceux d'autres muscles, il semble donc intéressant de mesurer leur taux de lipides pour évaluer les qualités organoleptiques de la viande.

- des variations des taux de lipides au sein de régions d'un même muscle : entre les cubes découpés dans un muscle donné, on observe d'importants écarts qui s'accroissent avec la teneur moyenne en lipides du muscle.

On comprend la difficulté à déterminer l'état d'engraissement optimal d'abattage d'un bovin pour la flaveur de sa viande ; il faudrait pouvoir noter cette caractéristique muscle par muscle ou tranche par tranche. Cependant, il est nécessaire de se fixer un objectif d'état d'engraissement de l'animal à abattre, ceci permettant toutefois de limiter le nombre de carcasses trop ou trop peu grasses pour le marché.

(e) Composition chimique des tissus (96)

L'évolution de la composition corporelle au cours de l'engraissement de bovins limousins mâles peut se résumer ainsi : la teneur en protéines reste stable, la teneur en eau diminue et la teneur en lipides augmente. Il en est de même pour la composition du croît. On comprend donc que la valeur calorifique du croît augmente, ce qui se répercute sur les besoins alimentaires : la composition de la ration ne suit pas d'où la baisse du croît journalier et l'augmentation des lipides fixés. Là encore on peut expliquer la différence entre races précoces et tardives : ces dernières déposent moins de gras et plus de muscle ; leur valeur calorifique de croît est donc plus faible d'où leur meilleure efficacité alimentaire.

(f) Influence du poids d'abattage (66)

Au cours de la croissance, le poids vif augmente ainsi que la part des lipides dans la composition corporelle donc en contrôlant le poids vif à l'abattage on peut espérer maîtriser l'état d'engraissement des taurillons. Cependant, il faut aussi tenir compte du niveau énergétique de la ration.

(g) Influence de l'apport énergétique (66)

Globalement, quand l'apport énergétique augmente, le gain de poids s'accroît ainsi que le dépôt de lipides : la quantité de lipides fixés par jour est proportionnelle au gain de poids par jour élevé à la puissance 1.8.

Ainsi, l'effet d'une réduction de l'apport énergétique est d'autant plus marqué que les animaux déposent de grandes quantités de lipides ; c'est le cas pour les animaux de races précoces. Si on limite les apports énergétiques en fin d'engraissement (comme chez les monogastriques), on arrive à réduire la quantité de lipides déposés, avec l'inconvénient d'une durée d'engraissement plus longue du fait du ralentissement de la croissance.

Or, lorsque les animaux sont nourris à volonté, la capacité d'ingestion et la capacité de protéinogenèse sont des facteurs importants de la composition du croît (8) ; la capacité d'ingestion des animaux de race laitière est élevée par rapport à leur capacité de croissance musculaire : ils ont donc tendance à déposer du gras rapidement.

En pratique, il faut donc rationner les animaux ou leur distribuer des rations à forte proportion de fourrages pour réduire l'excès de dépôts adipeux. En revanche, chez les races tardives, le croît est surtout protéique ; par conséquent, si on applique cette méthode, on réduira le développement musculaire sans réduire les dépôts de gras qui sont déjà modérés naturellement. Pour ce type d'animaux, il n'est donc pas recommandé de réduire l'apport énergétique en fin d'engraissement.

Pour limiter les dépôts adipeux excessifs chez des bovins à l'engraissement il est donc important de se donner un objectif de poids à l'abattage et de vitesse de croissance en contrôlant le niveau énergétique de la ration.

Remarque : des facteurs secondaires influencent l'état d'engraissement, à savoir l'activité physique et les conditions d'ambiance. Par exemple, des vaches qui pâturent s'engraissent plus lentement que des vaches qui reçoivent à l'auge la même herbe coupée et des vaches en stabulation entravée s'engraissent moins vite que des vaches en stabulation libre (8).

3) Illustrations zootechniques des variations de la composition corporelle des bovins

(a) Cas de la vache laitière (21)

En début de lactation, le bilan énergétique de la vache laitière est négatif et on observe une insulïnémie et une glycémie faibles, alors que la concentration plasmatique en GH (hormone de croissance) est forte. On a d'ailleurs observé que les adipocytes possédaient plus de récepteurs aux catécholamines à un mois de lactation qu'un mois avant terme, ce qui explique la forte réponse aux catécholamines (en particulier du tissu adipeux sous-cutané) pendant cette période. Plus la lactation avance et plus cette tendance s'inverse.

En effet, à partir de la 7^{ème} semaine de lactation environ, le bilan énergétique redevient positif et la vache peut reconstituer ses réserves (la glycémie et l'insulïnémie sont donc relativement

élevées). On estime que 60 % des lipides mobilisés sont reconstitués entre la 6^{ème} et la 14^{ème} semaine.

Il faut noter que l'enchaînement des phases de lipomobilisation puis de reconstitution des réserves dépend du génotype (la lipomobilisation est accrue chez les fortes productrices), de l'état d'engraissement des animaux à la mise-bas (des vaches très grasses mobiliseront plus leurs réserves et auront moins d'appétit, ce qui prédispose au « syndrome de la vache grasse ») et de l'alimentation (plus le déficit énergétique est important, plus les vaches mobiliseront leurs réserves).

L'intensification de la production laitière joue sur les mécanismes téléophorétiques pour accentuer la mobilisation des réserves et les traduire au mieux en production de lait. Cependant, on débouche parfois sur une inversion des priorités, ce qui se traduit par une surcharge hépatique en acide gras (stéatose) suite à une lipomobilisation excessive ou par une demande trop forte de la mamelle entraînant un déficit énergétique prononcé conduisant à la cétose.

(b) Engraissement des vaches de réforme (28), (62)

Intérêts de l'engraissement des vaches de réforme

L'engraissement des vaches de réforme permet à l'éleveur de valoriser sa production au maximum, surtout en système allaitant. En effet, bien engraisser ce type de bêtes procure à l'éleveur des revenus supplémentaires puisque les carcasses produites sont alors plus lourdes et obtiennent un meilleur classement.

Il est donc important de maîtriser cette phase qui peut représenter une part importante des revenus de l'exploitation en vue de s'adapter au marché en évitant de proposer des animaux trop gras ou trop maigres. Or, ces vaches sont de race, d'âge, de format, d'état corporel et physiologique différents, d'où les difficultés d'adaptation à des conditions de finition standards.

En ce qui concerne les vaches laitières, elles peuvent être engraisées en fin de lactation ou bien attendre le tarissement. Malterre (61) affirme que les vaches en état corporel correct s'engraissent bien grâce à une légère suralimentation pendant les deux derniers mois de lactation. En revanche, pour les vaches très maigres, on doit attendre le tarissement et l'engraissement sera rentable s'il se fait au pâturage : effectivement, ces vaches s'engraissent mieux au pâturage qu'à l'auge pendant la même durée de deux mois et cela coûte moins cher dans les grandes régions herbagères.

Là encore, on peut évoquer les différences entre les types génétiques à propos de la composition de la masse développée pendant l'engraissement : les races laitières déposent essentiellement du gras alors que les races à viande ont un potentiel de croissance musculaire très supérieur. Leur durée d'engraissement sera donc plus longue mais leur gain de poids supérieur (schématiquement, elles prennent beaucoup de muscle au début puis déposent du gras alors que les races laitières déposent du gras tout de suite).

Développement des dépôts adipeux pendant l'engraissement

Si l'on étudie la répartition du tissu adipeux accumulé pendant la phase d'engraissement, on montre que les vaches de réforme de race Limousine, Charolaise ou Prim'Holstein peuvent déposer en moyenne 30 kg de gras intermusculaire, 20 kg de gras sous-cutané et 32 kg de gras interne, les tissus les plus actifs étant les tissus adipeux sous-cutané et omental (89). Ces vaches prennent donc environ 100 kg de gras sur une durée de 123 à 153 jours dans le cas particulier de cette étude. Il faut noter aussi que les vaches de race Prim'Holstein n'ont quasiment pas pris de muscle pendant cette phase, contrairement aux deux autres types de bovins qui en ont fabriqué 20 à 30 kg.

Malterre (61) a étudié l'engraissement des vaches de réforme de race Limousine ; cette race se caractérise par une faible capacité d'ingestion et une bonne efficacité alimentaire, il n'est donc pas utile de restreindre l'alimentation lors de la finition en vue de limiter les dépôts adipeux excessifs. Avec ce type de bovins, on peut ainsi espérer un GMQ de 1200g sur une période d'engraissement de 2 mois et demi avec un régime à base d'ensilage de maïs et de concentré pour arriver à un gain de poids de la carcasse de l'ordre de 50 kg dont 20 kg de muscles.

L'engraissement des vaches de réforme de race Limousine est donc intéressant du point de vue économique puisque ces bovins reprennent rapidement du poids lors de cette phase ; on peut alors proposer à la vente des carcasses de poids et de qualité supérieurs.

Effets de l'âge et de la durée d'engraissement

Dumont *et al.* (28) ont étudié les effets de l'âge et de la durée d'engraissement sur la composition de la carcasse et la qualité organoleptique de la viande de vaches de réforme de race Charolaise (cf. graphiques 4 et 5).

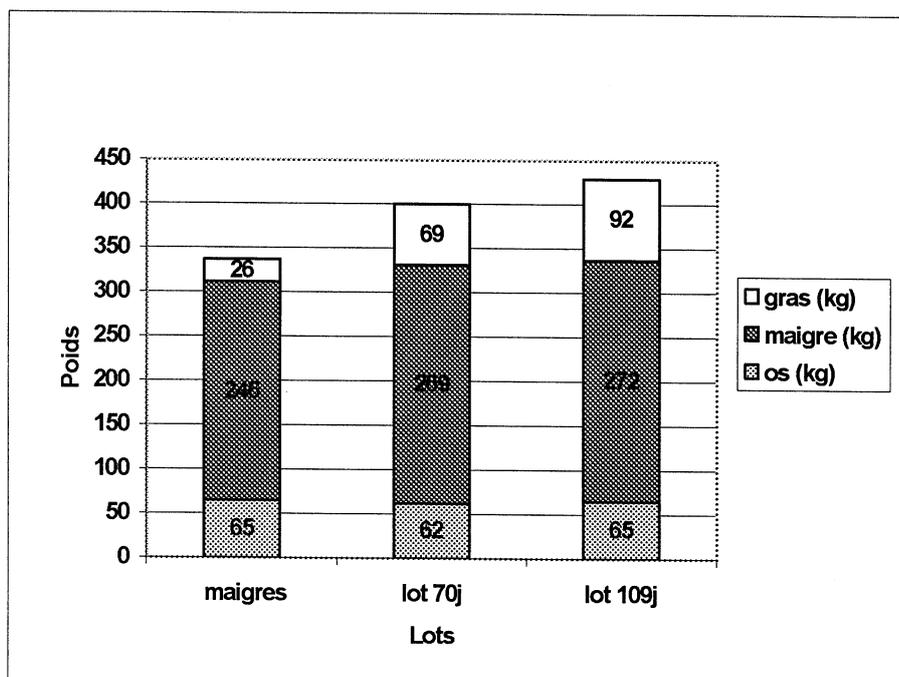
En phase de finition, le gain de poids devient vite important puis diminue à partir du cinquantième jour (notons qu'on remarque aussi un ralentissement du gain de poids chez des taurillons en phase terminale d'engraissement).

En revanche, l'état corporel augmente jusqu'à la fin de l'engraissement (qu'il dure 70 ou 109 jours). En ce qui concerne l'effet de l'âge, les vaches âgées montrent une efficacité alimentaire inférieure.

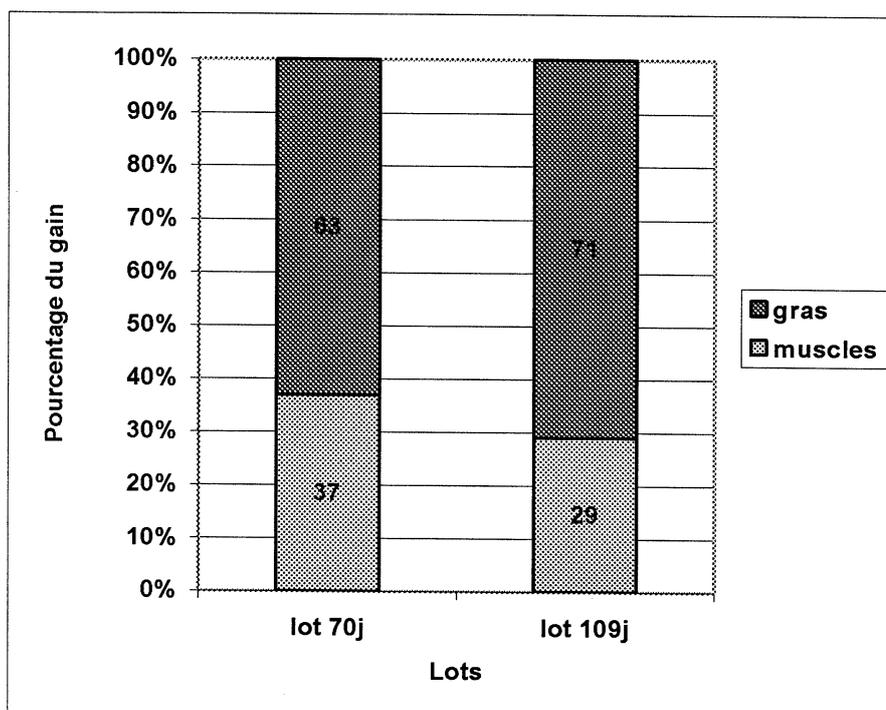
A l'abattoir, on constate que, quel que soit l'âge, l'augmentation de la durée d'engraissement au-delà de 70 jours permet un gain de poids certes, mais composé essentiellement de gras donc inutilisable. En revanche, l'état d'engraissement influe directement sur les qualités organoleptiques de la viande : tendreté, jutosité et flaveur sont plus élevées pour les vaches les plus grasses.

Au sujet de l'âge, la conclusion essentielle porte sur la tendreté de la viande qui est toujours supérieure pour les vaches jeunes alors que la jutosité et la flaveur ne sont pas différentes entre 5 et 11 ans.

Graph. 4: effet de la durée d'engraissement sur la composition de vaches de réforme Charolaises (source : Dumont *et al.*, 1991).



Graph.5 : effet de la durée d'engraissement sur la composition du gain de poids de carcasse de vaches de réforme Charolaises (source : Dumont *et al.*, 1991).



L'engraissement des vaches de réforme de race Charolaise est donc intéressant même pour les plus âgées puisqu'il améliore les qualités organoleptiques de la viande et ne nécessite que 70 jours pour atteindre un état d'engraissement satisfaisant.

III. TECHNIQUES ACTUELLES D'ESTIMATION DE LA COMPOSITION CORPORELLE DES BOVINS

A. Note d'état d'engraissement

Le but de la note d'état est de juger l'importance du tissu adipeux sous-cutané, lui-même bon indicateur de l'adiposité totale du corps. Cette estimation des réserves corporelles en graisse a l'avantage d'être peu coûteuse et rapide, elle est néanmoins subjective. Aussi, pour réaliser au mieux des observations reproductibles et répétables, il est nécessaire de les baser sur des repères anatomiques précis et de les exprimer sous forme de notes. Cette méthode fait donc appel à des techniciens expérimentés et c'est la seule utilisée dans la pratique de l'élevage actuellement (c'est en effet la seule méthode aussi rapide et peu chère).

Par la note d'état, on cherche à apprécier, par palpation, l'importance des dépôts adipeux sous-cutanés présents à des endroits variés de l'animal. Pour cela, il existe différents systèmes de notation, pour lesquels il est fondamental de s'intéresser à la précision du protocole (en effet certains fonctionnant simplement à partir de photos sont insuffisants).

Un protocole précis permet d'une part d'améliorer la répétabilité et le biais existant entre les notateurs puisque l'on diminue le biais de subjectivité, d'autre part de diminuer le nombre de sites nécessaires (29).

Il existe différents systèmes de notation des états corporels :

- le système européen (de 1 à 5) : Au sein du système européen, on trouve différentes grilles de notation en fonction des races bovines ou du moins en fonction du type allaitant ou laitier.
- le système américain : en général, la notation va également de 1 à 5 mais il précise le score par des $\frac{1}{4}$ et des $\frac{1}{2}$ points de majoration ou de minoration ; il existe aussi des systèmes allant de 1 à 9 pour tenter d'être plus précis. Ferguson *et al.* (34) ont montré qu'un système basé sur l'observation et la palpation de 7 sites est suffisant pour classer les vaches dans des catégories de 0.25 allant de 2.25 à 4.00.
- le système australien utilise 8 sites et le système néo-zélandais en utilise 10. Les critères de notation sont tous visuels en relation avec la difficulté de manipuler les troupeaux à grands effectifs.

1) Méthode de notation des vaches laitières

Plusieurs barèmes ont été proposés pour noter l'état des vaches laitières ; ils reposent soit sur la simple observation de l'animal (29) soit sur le maniement de différentes régions anatomiques. Un des premiers fut celui de Lowman (59) où il différencie 6 classes d'état (notes de 0 à 5), appréciées par palpation au niveau des apophyses transverses des vertèbres lombaires. On peut citer le système de Wildman (109) utilisant la palpation du dos et de la croupe pour classer les vaches de 1 (état émacié) à 5 (obèse).

Avec l'essor de l'échographie, Schwager-Suter *et al.* (100) ont mené une expérimentation consistant à valider le système de notation d'Edmonson grâce à la mesure de l'épaisseur de gras sous-cutané au niveau des vertèbres lombaires et de la croupe. Cela complète l'étude de cette méthode de notation réalisée par Domecq (26) en l'appliquant à des types variés de vaches laitières et, qui plus est, à tous les stades de la lactation.

Cette expérience est parvenue aux conclusions suivantes : le système d'Edmonson peut être utilisé sur des races laitières autres que Prim'Holstein et il est valable sur toute la durée de la lactation.

Pour exemple concret, citons maintenant le mode d'évaluation de l'état corporel des vaches laitières de l'Ontario rédigé et illustré par Rodenburg (99) à partir de la méthode de E. E. Wildman. L'état d'embonpoint est estimé par appréciation visuelle et par palpation des régions de l'épine dorsale, de la longe à la croupe. Etant donné que les os des ischions et des hanches, l'épine dorsale et l'extrémité des vertèbres lombaires sont dépourvus de tissus musculaires, toute masse corporelle visible ou palpable est constituée de peau et de dépôts adipeux.

L'évaluation se fait en pressant la colonne vertébrale et les structures osseuses des hanches et des ischions. En plaçant les doigts sur la partie supérieure de la longe et le pouce autour de l'extrémité des vertèbres lombaires, il faut palper fermement la longe en direction de l'épine dorsale. La pression exercée donne un bon aperçu de la couche de gras.

Ce système est illustré en annexe par des photos accompagnées de leur commentaire, chacune correspondant à une note d'état (de 1 à 5).

2) Méthode de notation des bovins de races à viande (1)

En élevage allaitant, la tâche s'avère plus difficile : en effet les races sont très typées « viande » et leur bonne conformation musculaire peut masquer partiellement les différences d'état d'engraissement. De plus ces bovins sont naturellement maigres (la Blonde d'Aquitaine particulièrement) ; la part de dépôts corporels avoisine 10%, avec une amplitude de variation bien moindre que chez d'autres races, en particulier par rapport aux races anglo-saxonnes comme l'Angus.

Le barème utilisé en élevage allaitant français repose sur la palpation de deux sites du flanc droit de l'animal : le ligament sacrotubéral manipulé par la main gauche et le train de côtes, plus particulièrement les deux dernières côtes manipulées par la main droite.

A chacun de ces endroits, on cherche à apprécier soit par pincement (main gauche), soit la main à plat (main droite), la souplesse de la peau, sa capacité à rouler sur l'os ou le ligament, enfin l'épaisseur du tissu adipeux. Cette dernière s'estime par la taille de la poignée prise dans la main gauche et par la réaction à la poussée faite sur les côtes par la main droite. A partir des observations réalisées on utilise une grille de notation présentée dans le tableau 4.

Tabl.4 : grille de notation de l'état corporel des bovins de races à viande (source : Agabriel, 1986).

Note	0	1	2	3	4	5
<i>Main gauche : sur ligament sacro tubéral</i>	Peau adhérente	Peau tendue	Peau se décolle	Peau souple		Peau rebondie
	Pincement difficile	Pincement possible	Léger dépôt identifiable	Poignée de gras	Bonne poignée de gras	Pleine poignée de gras
<i>Main droite : à plat sur les deux dernières côtes</i>	Peau tendue et collée sur les côtes		Peau souple	Peau « roule » entre la main et l'os	Plus de dépression intercostale	Un épais « matelas » recouvre les côtes
	Côtes sèches	Côtes saillantes	Côtes encore bien distinctes	Dépression intercostale		

Certaines difficultés peuvent apparaître lors de la notation :

- Les notes mises séparément à chacun des endroits, au niveau de la côte et au niveau de la queue, ne correspondent pas toujours. Le notateur doit alors faire la moyenne des 2 notes plutôt que de privilégier l'une ou l'autre. Les demi-points sont donc autorisés, ce qui fait un total de 11 possibilités pour attribuer une note à l'animal.
- La discrimination des bons et très bons états semble la plus difficile car les repères morphologiques sont alors « noyés » dans le tissu adipeux ; l'appréciation des sensations de la quantité de gras devient très subjective, surtout de la main gauche (taille de la poignée).

Cette grille de notation doit être adaptée à la race de bovins. En effet la bonne conformation musculaire (notamment Charolaise ou Blonde d'Aquitaine) gomme en partie les différences visuelles de couverture et risque de tromper le notateur. En revanche, sur les vaches Limousines, le tissu adipeux sous-cutané est pour un même état d'engraissement proportionnellement plus développé que sur d'autres races (97), il faut donc éviter de les « surnoter ». Enfin la notation des vaches Salers pose peu de problèmes car elles extériorisent très bien les différences d'état. La notation se rapproche beaucoup de celle des vaches laitières Prim'Holstein.

Lors de tests portant sur un grand nombre d'animaux et de notateurs, Evans (31) a pu montrer l'importance des interactions animal-notateurs : ceci impose dans la pratique des confrontations régulières entre notateurs pour éviter des biais qui pourraient apparaître.

3) *Validité de la méthode*

La répétabilité et la reproductibilité de la mesure sont satisfaisantes, mais pour réduire l'erreur systématique qui accompagne chaque notation, on a tout intérêt à faire noter plusieurs juges à la fois. Par exemple, Remond *et al.* (81) ont obtenu sur 49 Prim'Holstein une corrélation de 0.96 entre les notes attribuées par deux opérateurs et une différence maximale de 0.5 points. Les notes d'état corporel (mesure effectuée avant l'abattage) sont bien corrélées avec le pourcentage total de gras corporel et l'épaisseur de gras sous-cutané mesurés sur la carcasse (41).

Domecq *et al.* (26) ont montré la corrélation entre les notes d'état et la mesure du gras sous-cutané par méthode échographique. Ainsi, la notation d'état est une technique aussi valide que l'échographie pour apprécier le gras sous-cutané ; elle s'avère plus rapide et moins onéreuse, elle est en revanche plus subjective.

La comparaison de la note d'état au diamètre des adipocytes du tissu adipeux sous-cutané paraît naturelle puisqu'il s'agit de deux mesures indirectes du même tissu adipeux. La mesure du diamètre des adipocytes permet d'estimer directement et avec une bonne certitude la proportion de dépôts adipeux totaux dans la masse corporelle de vaches adultes. Elle n'est pas subjective et est considérée ici comme méthode de référence. Agabriel (1) a montré que la relation entre les deux variables est linéaire et que le coefficient de corrélation est élevé (0.80).

B. Méthodes utilisant la technologie des ultrasons

1) Echographie

Aux Etats-Unis, deux systèmes de notation sont donc en opposition : la notation de la qualité (USDA quality grade : United States Department of Agriculture quality grade) qui favorise les carcasses grasses et la notation de rendement (USDA yield grade) qui attribue de bonnes notes aux carcasses maigres. Or c'est de ces estimations que dépend la valeur marchande de la carcasse.

Tout le problème réside donc dans la recherche de types génétiques d'animaux déposant plus de gras intramusculaire mais sans développer excessivement les dépôts adipeux indésirables. L'utilisation de l'échographie va permettre d'estimer ces paramètres sur les animaux vivants, dans le cadre de l'engraissement avant commercialisation et surtout dans la sélection des taureaux destinés à l'insémination.

Il est important de noter que ce type d'utilisation de l'échographe est répandu aux Etats-Unis ; il existe une association de techniciens certifiés (Animal Ultrasound Practitioners Association) et une formation dirigée par l'université de l'Iowa. On peut aussi évoquer les études de Wertz (108) qui a utilisé cette technologie dans le but de comparer l'efficacité de deux régimes alimentaires ou de Mizrach *et al.* (71) qui proposent l'échographe comme outil objectif de suivi de l'état corporel des vaches laitières au cours de la lactation.

Nous allons donc évoquer les principes de l'échographie puis détailler les mesures réalisées et leur interprétation en fonction des objectifs de commercialisation ou de sélection.

(a) Principes et matériel échographiques (37)

L'échographie est une technique d'imagerie médicale basée sur l'utilisation d'ondes ultrasonores. Elle permet de visualiser de manière non-invasive des structures anatomiques internes, en toute sécurité pour l'animal. Pour interpréter ces images échographiques, des connaissances biologiques (anatomie, physiologie, pathologie) et biophysiques (physique des ultrasons, formation de l'image...) sont requises.

Nature physique des ultrasons

Les ultrasons sont des ondes ou vibrations mécaniques de même nature que les sons mais leur fréquence est trop élevée pour que l'oreille humaine puisse les détecter. En imagerie médicale, les fréquences utilisées varient entre 2 et 10 MHz.

Les éléments de la sonde échographique à l'origine des ondes ultrasonores sont des cristaux piézo-électriques capables de se déformer de façon cyclique lorsqu'ils sont stimulés par un courant électrique alternatif. On obtient ainsi une oscillation mécanique des cristaux qui permet la formation d'ondes mécaniques de fréquence élevée et d'amplitude faible.

Propriétés physiques des ultrasons

Une onde est caractérisée par plusieurs paramètres : l'amplitude, l'intensité, la fréquence et la longueur.

- **L'amplitude** de l'onde est proportionnelle à l'intensité du courant appliqué aux cristaux et va déterminer l'énergie stockée par une particule.
- **L'intensité** de l'onde correspond au débit d'énergie.
- **La fréquence** est définie comme le nombre de vibrations de la source émettrice (cristaux) par unité de temps. L'unité de mesure de la fréquence est le Hertz (Hz) ou nombre de cycles par seconde.
- **La longueur de l'onde (λ)** est caractéristique à la fois de l'onde et du milieu de propagation et correspond à la distance parcourue par l'onde au cours d'un cycle de vibration. Elle varie de façon inversement proportionnelle avec la fréquence dans un milieu constant. Comme la vitesse de propagation des ultrasons est indépendante de la fréquence et est à peu près constante dans les tissus mous (1540m/s), la sélection d'une sonde à haute fréquence va se traduire par une diminution de la longueur d'onde du son émis.

Interactions des ultrasons avec les milieux biologiques : la genèse des échos

Lorsqu'un ultrason qui se propage dans un tissu rencontre une interface tissulaire, une partie de l'ultrason est réfléchi et retourne aux cristaux de la sonde. Les cristaux sont déformés par l'écho et génèrent alors un courant électrique qui est enregistré. Le cristal est donc à la fois l'émetteur et le récepteur. Le délai entre la propagation de l'ultrason et la réception de son écho va permettre de déterminer la distance entre les cristaux et la surface réfléchissante.

Les interactions des ultrasons avec les milieux biologiques peuvent être de quatre types : *réflexion, réfraction, diffusion et absorption*.

- **La réflexion**

Quand une onde ultrasonore rencontre une interface tissulaire, une partie de l'énergie incidente est réfléchi. L'importance de la réflexion dépend de la différence d'impédance acoustique (propriété d'un milieu à propager plutôt qu'à réfléchir l'onde) entre les deux milieux. Ainsi, à l'interface graisse-muscle, seulement 1.5% de l'énergie incidente est réfléchi.

Lorsque l'onde ultrasonore rencontre des milieux d'impédance acoustique très différente de celle des tissus mous (os, gaz), la majeure partie de l'onde est réfléchi (plus de 99%). C'est la raison pour laquelle les os et les gaz constituent un obstacle à la propagation des ultrasons. Les interfaces les plus intéressantes correspondent à une faible différence d'impédance acoustique (1% ou moins) car elles permettent d'explorer les tissus sous-jacents, la majeure partie de l'énergie incidente étant transmise à travers l'interface tissulaire. De ce phénomène résulte aussi la diminution de l'intensité de l'onde au fur et à mesure qu'elle progresse dans les tissus.

Notons que la profondeur de pénétration des ultrasons est d'autant plus faible que la fréquence est élevée.

- **La réfraction**

La réfraction correspond à une déviation de l'onde ultrasonore lorsqu'elle traverse un tissu ayant des propriétés acoustiques différentes. La réfraction survient seulement si l'interface n'est pas perpendiculaire à l'onde. La déviation du faisceau est à l'origine de la non réception de l'écho et contribue ainsi à l'atténuation et la formation d'artéfacts.

- **La diffusion**

Lorsque les dimensions de l'interface rencontrée sont petites en comparaison avec la longueur d'onde, l'onde ultrasonore est absorbée puis ré-émise dans toutes les directions. Ainsi l'échostructure des parenchymes est due aux échos diffusés par les multiples hétérogénéités diffusantes de petite taille telles que les capillaires, tissus conjonctifs.

- **L'absorption**

L'absorption correspond à la transformation de l'énergie en chaleur et participe ainsi directement à l'atténuation. Ce phénomène est minime avec les ultrasons.

Emission et réception des ultrasons

- L'émission des ultrasons : la production de salves

Les ultrasons ne sont pas émis de façon continue mais sous la forme de salves ou séries de trois cycles environ. Le cristal est soumis à une série de courtes impulsions électriques qui sont à l'origine d'une courte série de vibrations appelée impulsion ou salve. L'image est formée par les échos qui reviennent à la sonde après chaque salve. La collection des échos demande environ 0.25 ms donc 4000 impulsions ou lignes d'échos peuvent être collectées par

seconde. Donc, si 110 lignes d'écho sont nécessaires pour former une image, 40 images seront générées par seconde.

- La réception des ultrasons : la formation des images

L'onde réfléchiée ou écho captée par la sonde déforme les cristaux. Cette énergie mécanique est convertie en un signal électrique proportionnel à l'intensité de l'écho avec un délai relatif à sa distance parcourue.

Les échographes sont calibrés pour une vitesse de propagation constante de 1540 m/s (vitesse moyenne de propagation des ultrasons dans les tissus mous). La profondeur de l'interface qui a produit l'écho est calculée en fonction du délai qui sépare le moment de l'émission d'une salve de vibrations et le retour de l'écho correspondant. Un point lumineux représentant chaque écho est donc placé sur l'écran vidéo à une profondeur appropriée en fonction du temps de retour de l'écho.

La brillance du point lumineux varie en fonction de l'intensité de l'onde réfléchiée (échographe utilisé en mode BD). Chaque point représenté sur l'écran correspond à l'amplitude de l'écho et la brillance est représentée par une échelle de gris, du blanc (très échogène) au noir (absence d'écho).

Les équipements échographiques

- Les différents modes de visualisation des ondes

Mode A ou mode unidimensionnel

L'écho est apprécié sur l'écran par un pic dont l'amplitude dépend de son intensité, les différents traduisent des signaux reçus successivement en fonction du temps et donc en fonction de la profondeur.

Ce mode fut le premier à avoir été utilisé, mais il est actuellement peu utilisé (ophtalmologie, neurologie, mesure d'épaisseur de masse musculaire).

Mode BD ou mode brillance dynamique

Chaque écho est représenté par un point dont la luminosité est proportionnelle à son intensité. Le degré de luminosité définit une échelle de gris d'où le terme de brillance.

La notion dynamique provient du fait que l'image est construite par un balayage interne de la sonde dans un plan ; ce balayage pouvant être mécanique (le cristal oscille sur un arc de cercle : cas de certaines sondes sectorielles) ou électronique (il y a excitation différée de cristaux répartis le long de la sonde : cas des sondes linéaires et de certaines sondes sectorielles).

La rapidité de ce balayage est telle que l'œil humain ne le discerne pas, on obtient donc une image de la région explorée en temps réel, qui correspond à un plan de coupe qui se déplace avec les mouvements de l'opérateur.

Ce mode d'échographie est aussi appelé échographie bidimensionnelle et correspond à celui le plus utilisé actuellement.

Mode TM ou mode temps mouvement

Dans ce mode, la sonde reste immobile et le faisceau garde une direction constante. L'écran étudie en fonction du temps le déplacement des points et permet de visualiser les mouvements des tissus. Ce mode est principalement utilisé en cardiologie.

Mode Doppler

Lorsqu'une onde sonore de fréquence donnée rencontre une surface de réflexion mobile, la fréquence de l'onde réfléchie est modifiée : c'est l'effet Doppler.

La fréquence Doppler F_d ($F_d = F \text{ réfléchie} - F \text{ émise}$) est fonction de la vitesse de l'objet en mouvement et appartient à l'échelle de sons audibles. L'écho produit peut donc être simultanément reproduit par un haut-parleur et visualisé sur un écran d'oscilloscope. Les appareils Doppler sont utilisés en échocardiographie.

- Les sondes utilisées en médecine vétérinaire

Sonde linéaire (sonde barrette) :

La sonde linéaire est une sonde « multicristaux » : les cristaux sont alignés et stimulés électroniquement de façon sériée et itérative. Ce balayage permet d'obtenir une image rectangulaire à l'écran. La zone de contact entre la sonde et l'animal est importante ce qui peut gêner son utilisation chez les animaux de petite taille, c'est pourquoi elle est principalement utilisée pour les échographies transrectales chez les grands animaux.

Sonde sectorielle :

Dans ce type de sonde, le balayage est soit électronique soit mécanique. La sonde balaie un secteur de l'espace et l'image apparaît en cône. La surface de contact est faible et la manipulation est aisée. Elle est indispensable pour les explorations sous-costales et les animaux de petite taille.

Fréquence de la sonde :

Les sondes de haute fréquence ont une excellente résolution mais pénètrent moins profondément ; c'est pourquoi il faut adapter la sonde à la profondeur de la structure que l'on souhaite visualiser. C'est ainsi qu'une sonde de 7.5 MHz est utilisée pour explorer les tissus superficiels (tendons, articulations) alors qu'une sonde de 3.5 MHz sert à échographier des organes plus profonds (viscères de grands animaux).

(b) Mesures réalisées (9), (111)

Épaisseur de gras sous-cutané

- épaisseur de gras sous-cutané au niveau de l'épaule

Wallace *et al.* (107) ont mesuré l'épaisseur de gras sous-cutané au niveau de l'épaule, des côtes, des vertèbres lombaires et de la croupe et ont obtenu une bonne précision et une bonne corrélation (de 0.47 à 0.60) avec le rendement de la carcasse pour les quatre sites. Miller *et al.* (69) ont mesuré l'épaisseur de gras au niveau de l'épaule, de la 12^{ème} côte et de la croupe et ont confirmé les résultats de Wallace *et al.* : ces mesures sont bien corrélées au pourcentage de gras de la carcasse, donc à son rendement.

- épaisseur de gras sous-cutané au niveau des 12^{ème} et 13^{ème} côtes (fat thickness : FT)

Cette mesure est le paramètre le plus important dans l'estimation de la composition de la carcasse et donc de son rendement.

La mesure se fait au niveau du douzième espace intercostal perpendiculairement au dos de l'animal avec une sonde linéaire munie d'un guide souple pour établir un bon contact avec la surface courbée du dos.

- épaisseur de gras sous-cutané au niveau des vertèbres lombaires

Comme cité précédemment, Wallace *et al.* (107) ont trouvé une bonne corrélation entre la mesure de l'épaisseur de gras sous-cutané sur ce site et le rendement de la carcasse.

- épaisseur de gras sous-cutané au niveau de la croupe

Ce paramètre permet d'améliorer l'estimation des dépôts sous-cutanés obtenue par la seule mesure de l'épaisseur à hauteur du 12^{ème} espace intercostal (79). Il est donc intéressant chez les animaux maigres pour lesquels on a du mal à visualiser le gras.

La sonde est alignée entre la hanche et l'ischium sans guide et on mesure l'épaisseur au sommet du muscle *biceps femoris*.

Aire du muscle long dorsal (longissimus muscle area : LMA)

Cette mesure se fait sur la même image que la précédente. Cependant, il est nécessaire de travailler sur des images de très bonne qualité pour pouvoir visualiser les limites de cette aire, d'où les problèmes d'exactitude de cette mesure.

Pourcentage de gras intramusculaire

Cette valeur est obtenue par traitement d'une image collectée en plaçant la sonde parallèlement à l'axe de l'animal au niveau des 11^{ème} à 13^{ème} côtes ; ce pourcentage est très corrélé au « USDA marbling score », note de carcasse donnée par un technicien spécialisé. Cependant, cette variable est la plus difficile à mesurer avec exactitude : elle dépend beaucoup de l'équipement, de la préparation de l'animal et du contact de la sonde sur la peau ; de ce fait, beaucoup d'images doivent être prises (minimum 4).

(c) Interprétation des mesures de pourcentage de gras intramusculaire

Interprétation visuelle

Brethour (12) a mené une étude au cours de laquelle il a échographié le muscle long dorsal au niveau de la 12^{ème} côte de façon à mesurer le pourcentage de gras intramusculaire. Une sonde linéaire de 107 mm et de 3 MHz a été utilisée puisque cette fréquence permet de mieux représenter les mouchetures de gras intramusculaire qu'une de 5 MHz.

Un score de persillé allant de 1 (faible) à 7 (important) a été attribué visuellement, directement à partir de l'image gelée sur l'échographe.

La note est attribuée selon 3 critères :

- la densité homogène du muscle, reflet du niveau de gris global
- l'échogénicité de la côte qui sert de densitomètre : en effet, on ne la voit pas sur un animal très gras puisque les ultrasons sont tous absorbés par le gras intramusculaire traversé auparavant
- l'échogénicité de la région située sous la côte qui augmente avec le tacheté du muscle, ceci étant dû à la réverbération d'ultrasons provenant de dépôts supplémentaires de gras intramusculaire.

La visualisation de ces paramètres nécessite évidemment une haute qualité d'image (ceci passant par un bon positionnement de la sonde et un bon contact sonde-animal) ainsi que la prise de plusieurs photos.

La relation entre ce score *in vivo* et le classement américain des carcasses pour le persillé (marbling score) donné à l'abattoir par des techniciens spécialisés est bonne et on peut même prévoir jusqu'à 148 jours avant abattage le futur classement en carcasse de l'animal.

Il semble donc possible de former des lots relativement homogènes de bovins à l'engraissement bien avant l'abattage et de prévoir leur date de finition pour s'adapter au marché. Notons que la précision de la méthode est bonne pour les notes extrêmes de 3 et 7 (exactitude supérieure à 90 %) et moins pour les scores les plus courants de 4 et 6 (80 %).

Cette méthode rapide et pratique est pourtant difficile à maîtriser et subjective ; sa précision peut être améliorée en automatisant le traitement des images grâce à un système informatique.

Interprétation par traitement informatique des images échographiques

L'Université de l'Iowa traite les photos à l'aide du logiciel USOFT à partir d'une zone comprise entre la 12^{ème} et la 13^{ème} côte horizontalement et entre le gras sous-cutané et les côtes verticalement. Hassen *et al.* (43) définissent la qualité acceptable de la zone à mesurer de la manière suivante :

- la peau et le tissu adipeux sous-cutané sont parfaitement visibles et ne présentent aucun signe de mauvais contact de la sonde ou d'insuffisance d'huile
- la surface du muscle long dorsal est nette entre la 11^{ème} et la 13^{ème} côte et celles-ci sont bien visibles
- la région mesurée ne présente aucun artéfact.

La zone traitée est une fenêtre carrée de 100 pixels de côté et est choisie ici de deux manières : tout d'abord entre la 12^{ème} et la 13^{ème} côte puis en choisissant visuellement la surface jugée la plus homogène.

Notons que Brethour (11) avait déjà débuté des recherches sur les moyens d'automatiser l'analyse de la texture du muscle long dorsal par appréciation informatique du niveau de gris du muscle, paramètre permettant d'appréhender le pourcentage de gras intramusculaire (schématiquement, plus le muscle apparaît pâle sur l'image, plus il est riche en gras). Des logiciels destinés à cet usage ont été conçus et Herring *et al.* (47) en ont comparé quatre en les confrontant à la grille de notation visuelle en vigueur aux Etats-Unis (« USDA marbling score ») : il s'est avéré que ces systèmes étaient plus précis sur les faibles scores de persillé.

(d) Relation entre les mesures échographiques et le rendement en carcasse

Bullock *et al.* (15) ont trouvé que les mesures échographiques associées à des mesures objectives de l'animal vivant était de bons prédicteurs de la composition de la carcasse. Hamlin *et al.* (40) ont mesuré FT et LMA sur des taurillons à l'engraissement et démontré que des équations comprenant FT exprimaient 58 à 64 % de la variation du rendement de la carcasse, ce qui représente environ 10 % de moins que les mesures effectuées directement sur celle-ci, confirmant les résultats de Recio *et al.* (80). Notons que dans cette étude l'addition de LMA au modèle n'améliore que peu la qualité de la prévision.

Houghton (51) affirmait déjà que les mesures par échographie de l'épaisseur de gras sous-cutané associées à des pointages de conformation à l'âge d'un an permettait de prévoir la composition corporelle de jeunes bovins à 16 et 21 mois, autrement dit la durée de leur finition. De même mais avec une application plus proche du marché, Brethour (14) prévoit le classement futur des carcasses des bovins grâce à l'épaisseur de gras sous-cutané et au pourcentage de gras intramusculaire donné par l'échographie. Cela permet de faire un tri des bovins dès le début de la phase d'engraissement en fonction de la qualité qu'ils pourront atteindre à l'abattoir.

Globalement, il apparaît que les mesures échographiques associées à des pointages simples sur l'animal vivant sont de bons prédicteurs de la composition des bovins et donc de leur rendement à l'abattoir.

(e) Précision et répétabilité des mesures échographiques

Les erreurs de mesure peuvent avoir plusieurs origines selon Stouffer (102), à savoir la saleté, l'épaisseur de la peau et les poils, l'état corporel des animaux (plus ils sont gras plus il est difficile d'avoir une image de bonne qualité) et le fait qu'on ait affaire à des interfaces parallèles aux faisceaux d'ultrasons.

Épaisseur de gras sous-cutané (fat thickness : FT)

Brethour (13) a montré que les mesures de cette variable entre les 12^{ème} et 13^{ème} côtes sur l'animal vivant sont aussi précises sinon plus que sur la carcasse et que la répétabilité de la mesure exprimée en terme de corrélation entre deux mesures successives du même animal par la même personne est très bonne (supérieure à 0.9).

Faulkner *et al.* (33) ainsi que Bullock *et al.* (15) ont aussi comparé les mesures échographiques d'épaisseurs en vif et sur carcasse et démontré que la précision était aussi bonne sur l'animal vivant. En fait, on peut expliquer que les mesures en vif sont au moins aussi précises que sur la carcasse par le fait que les manipulations lors de l'abattage (notamment l'habillage) et la façon de la pendre modifient les repères et augmentent l'épaisseur de gras sous-cutané (98).

Il est bon de préciser que les erreurs augmentent lorsque les animaux sont plus gras : moyennes de 0.38, 0.59, 0.93 et 1.43 mm respectivement pour les intervalles d'épaisseur < 5, de 5 à 10, de 10 à 15 et > 15 mm (13). Duello (27) confirme cette tendance : ceci peut s'expliquer par le fait que les images d'animaux gras sont généralement de moins bonne qualité (on voit souvent une deuxième couche de gras en dessous de la première, signe de l'accumulation de tissu adipeux sous-cutané). On surestime FT pour les animaux maigres et on la sous-estime pour les plus gras, ce qui revient à dire qu'on sous-estime le rendement des animaux comportant le plus de muscle.

Pour repère, citons un ordre de grandeur de la variation de l'épaisseur au cours du temps : un animal ayant une épaisseur de 17 mm passe à 18 mm en 7 jours.

Aire du muscle long dorsal (longissimus muscle area : LMA)

Robinson *et al.* (98) ont montré que des techniciens expérimentés étaient capables de mesurer FT et LMA sur des animaux vivants aussi précisément que sur les carcasses (corrélations de 0.90 et 0.87 respectivement) et que ces mesures étaient très répétables.

En revanche, Smith *et al.* (101) arrivent à la conclusion que LMA est une mesure de précision insuffisante, ce qui est en accord avec plusieurs autres études, notamment celle de May (63).

En synthèse de ces expériences on peut donc expliquer que cette mesure peut être exacte, à condition que le technicien soit expérimenté et que la méthode soit standardisée et basée sur des repères anatomiques et de qualité d'image bien définis.

Malgré cela, Herring *et al.* (49) expliquent que LMA est surestimée pour les animaux maigres et sous-estimée sur les bovins gras et de bonne conformation, en accord avec Duello (27) et Smith *et al.* (101). Waldner *et al.* (106) sont par contre en totale contradiction avec ces faits.

Pour conclure on peut donc dire que, selon les études, on arrive à des biais de directions différentes avec le plus souvent des valeurs sous-estimées selon Perkins *et al.* (74). Cependant, contrairement à FT, les erreurs ne semblent pas augmenter avec les valeurs de LMA (27).

Pourcentage de gras intramusculaire

Hassen *et al.* (43) montrent que la répétabilité de l'estimation du pourcentage de gras intramusculaire grâce à l'échographie est médiocre pour des lots d'animaux homogènes et peu gras ; les différences entre ces animaux sont difficiles à mettre en évidence.

On peut donc conclure que cette mesure n'est pas aussi répétable que l'épaisseur de gras sous-cutané et on doit améliorer la précision en mesurant les animaux plusieurs fois. Pour cela, on peut mesurer plusieurs fois la même photo ou mesurer une fois plusieurs photos du même animal : c'est cette dernière solution qui permet de réduire l'erreur moyenne individuelle le plus vite (baisse de 29 % quand on passe de une à deux photos et de 50 % quand on passe de une à quatre).

Il est indispensable de prendre au minimum trois ou quatre images et d'en faire la moyenne pour un même animal et, malgré ces précautions, il sera difficile d'obtenir des valeurs exactes pour les animaux ayant moins de 4.79 % de gras intramusculaire. Ainsi, pour appliquer cette méthode à la sélection, il sera nécessaire d'associer les mesures de plusieurs individus de la descendance ainsi que des mesures sur carcasse.

(f) Effet de l'opérateur

Herring *et al.* (48) ont évalué cet effet en mesurant un lot d'animaux pour FT et LMA grâce à trois techniciens de niveaux d'expérience différents, deux jours consécutifs. Il apparaît que les différences entre opérateurs sont nettes pour LMA alors que les mesures sont équivalentes entre les techniciens pour FT.

La maîtrise de l'utilisation de l'échographe semble donc essentielle, à la fois pour la prise de l'image et son interprétation. Waldner *et al.* (106) et McLaren *et al.* (64) détaillent les deux étapes de l'obtention de l'image et expliquent que l'interprétation est une source d'erreur plus importante que la saisie de la photo.

Perkins *et al.* (75) donnent de hautes valeurs de répétabilité pour deux techniciens confirmés, à la fois dans les mesures de FT et de LMA ; d'un opérateur expérimenté à l'autre, il ne semble donc pas y avoir de différence.

Dans l'ensemble, il apparaît que la mesure de FT est plus précise que celle de LMA, différence gommée par l'expérience d'un technicien qualifié.

(g) Effet de l'échographe

Les machines utilisées depuis quelques années sont équipées d'une sonde linéaire de 172 mm de long, capables de visualiser le muscle long dorsal en entier en coupe, ce qui donne de meilleurs résultats dans l'évaluation de LMA qu'une sonde de 107 mm alors que la précision de l'estimation de l'épaisseur de gras sous-cutané est équivalente pour les deux types de sonde (48).

De nombreux fabricants d'échographes existent mais Hassen *et al.* (44) considèrent les modèles Aloka 500V et Classic Scanner 200 comme les appareils de référence de l'Université de l'Iowa.

(h) Effet de l'âge des bovins

Hassen *et al.* (42) ont étudié la précision des mesures échographiques sur des taurillons à l'engrais à différents âges en vue de la prédiction du rendement à la découpe. Ceci a pour but de standardiser les méthodes au niveau des âges aussi, sachant que les sites et les techniques de mesure sont déjà largement adoptés par les utilisateurs de ces appareils. L'épaisseur de gras sous-cutané, l'aire du muscle long dorsal et le pourcentage de gras intramusculaire ont été mesurés. D'autre part, le poids de l'animal et la hauteur de hanches ont été notés. Les données ont été ajustées aux âges moyens de 365, 382, 414 et 448 jours, cette dernière date étant l'âge moyen d'abattage. Des modèles prenant en compte ces différentes données (les photos sont traitées avec USOFT) ont été construits.

Il ressort que l'épaisseur de gras sous-cutané mesurée par échographie est corrélée négativement et fortement (de -0.57 à -0.64) avec le rendement de découpe, ceci étant en accord avec les études de Herring *et al.* (49), Hamlin *et al.* (40) affirmant que cette variable est la plus explicative du rendement de découpe de la carcasse.

On peut tirer les mêmes conclusions à propos du pourcentage de gras intramusculaire qui est corrélé négativement et fortement au rendement. Ces deux variables sont donc de bons prédicteurs à tous les âges étudiés, à la différence de l'aire du muscle long dorsal (corrélations positives mais faibles dans cette expérience).

Waldner *et al.* (106) ont suivi l'utilité de mesures de FT, LMA et de la hauteur de hanches à différents âges sur des taurillons à l'engraissement et expliquent que la meilleure prédiction du rendement est donnée à l'âge de un an par un modèle incorporant le poids vif, la hauteur de hanches et LMA ; la prédiction du poids vif vide est la meilleure à l'âge de 16 mois et utilise le poids vif, la hauteur de hanches et FT. Ils concluent donc que mesurer LMA à 12 mois et FT à 16 mois est suffisant pour caractériser des groupes de taurillons sur leur futur rendement de carcasse.

Ces deux études font entrevoir la possibilité de prévoir à l'avance les résultats en carcasse des taurillons aussi bien qu'en les mesurant juste avant l'abattage. Pour cela il faut associer des pointages en vif aux mesures échographiques réalisées par un technicien certifié, ceci permettant d'obtenir des équations prédictives de l'évolution des bovins en engraissement avec pour objectif de prévoir la date d'obtention d'un poids et d'un niveau de finition donné, en somme la date d'abattage, plusieurs semaines à l'avance.

Ainsi, Bassarab *et al.* (7) présentent un système de tri des taurillons mis au point à l'université du Kansas qui allie le poids corporel initial, l'épaisseur de gras dorsal et l'indice de persillé mesurés par ultrasons afin de prédire le nombre de jours d'engraissement nécessaires à l'atteinte des objectifs de rentabilité.

Une autre utilisation possible est l'amélioration des bases de données servant à la sélection et notamment au contrôle sur descendance des taureaux.

(i) Utilisation de l'échographe pour la sélection (38), (46)

L'avantage de l'échographie réside dans sa capacité à amasser de grandes quantités de données en mesurant notamment les taurillons et les génisses d'un an (85) pour les utiliser dans les évaluations génétiques en supplément de leur pointage en carcasse. Pour cela, la part du technicien dans les variations doit être la plus faible possible pour que les données soient exploitables. L'association américaine de la race Angus a lancé un programme de collecte d'images échographiques pour constituer une base de données (Centralized Ultrasound Processing).

Ce protocole s'organise ainsi :

- collecte des images par des techniciens certifiés de l'AUP (Animal Ultrasound Practitioners Association)
- envoi des images au laboratoire de traitement
- analyse des photos par des techniciens spécialisés dans l'interprétation
- renvoi des données aux éleveurs sous forme de tableaux semblables à ceux des contrôles de performance.

Grâce à cette organisation rigoureuse et à la spécialisation de chaque poste, on standardise les manipulations et on limite les sources d'erreur. Les techniciens du laboratoire de traitement des images exercent de surcroît un contrôle de la qualité des images fournies par chaque échographiste.

Les premiers résultats de cette recherche montrent que 2153 taureaux ont été évalués grâce aux données prises sur plus de 30000 animaux de janvier 1998 à septembre 1999 alors qu'il a fallu 15 ans pour obtenir un tel volume avec l'estimation sur les carcasses seulement. Cela démontre la grande capacité du système et son efficacité d'où le gain de temps. D'autre part, on évite les mesures de certains dépôts de gras comme les gras internes et cela simplifie les pointages et les prélèvements sur les carcasses qui sont onéreux.

Un autre signe encourageant dans le développement de ce protocole est la qualité de ses estimations : les héritabilités calculées pour les mesures échographiques sont comparables à celles données par les pointages des carcasses, montrant la précision de ces mesures. On obtient :

- 0.30 pour le pourcentage de gras intramusculaire
- 0.36 pour l'aire du muscle long dorsal
- 0.34 pour l'épaisseur de gras sous-cutané de la 12^{ème} côte
- 0.35 pour le rendement de découpe
- 0.39 pour l'épaisseur de gras de la croupe.

Duello (27) donne des exemples de corrélations entre certaines caractéristiques des carcasses et indique que celle entre FT et LMA est négative, ce qui est favorable à une amélioration du rendement en carcasse. En ce qui concerne les relations entre le persillé et d'autres caractéristiques des carcasses, les résultats ne vont pas dans le même sens selon les études ; cependant, Wilson *et al.* (112) indiquent qu'il est possible que le pourcentage de gras intramusculaire et l'épaisseur de gras sous-cutané soient indépendants voire corrélés négativement (-0.13).

Autrement dit, selon ces études, il serait possible de sélectionner les animaux pour augmenter leur persillé sans augmenter et même en diminuant le gras sous-cutané qui est paré.

D'autres données encourageantes sont les résultats de Johnson (53) qui évoque la corrélation génétique faible mais positive entre LMA (reflet du développement musculaire) et la circonférence scrotale, paramètre reconnu comme indicateur du potentiel reproducteur d'un taureau (résultats en accord avec Turner *et al.* (104) : corrélation génétique de 0.48 entre les deux caractères).

En ce qui concerne les relations entre les paramètres mesurés par échographie et les capacités de croissance, diverses interprétations sont publiées : Arnold (6) affirme que FT mesurée à âge constant est corrélée à la vitesse de croissance alors que Johnson (53) émet des doutes quant à cette relation et note que l'environnement maternel avant le sevrage est aussi important pour le développement de gras sous-cutané que les caractéristiques propres de l'animal.

Les prochaines étapes de l'amélioration de la méthode seront basées sur la standardisation des conditions environnementales de mesures (les animaux d'un même lot devront être échographiés le même jour) et sur l'âge de mesure (autour d'un an).

Duello (27) a envisagé les possibilités d'ajustement des mesures échographiques en vue de leur utilisation pour la sélection : on peut comparer les descendants des taureaux à âge, poids ou composition constants. S'appuyant sur plusieurs références, il arrive à la conclusion que l'âge est l'ajustement qui présente le plus d'avantages : il permettrait notamment plus de progrès génétique. D'autre part, mesurer les animaux autour de l'âge d'un an est assez facile à incorporer dans les pratiques courantes de l'élevage.

En effet, la précision peut être améliorée puisqu'à ce jour, on n'est pas encore certain de pouvoir dégager les 3 ou 4 meilleurs taurillons d'un lot ; on peut cependant les classer en catégories de niveau pour une qualité donnée.

2) VOS

Le VOS (Velocity Of Sound) est un appareil qui permet de mesurer la composition corporelle des bovins en vif et en carcasse. Son principe repose sur la mesure de la vitesse des ultrasons à travers les tissus, sachant que cette vitesse est inversement proportionnelle à leur teneur en lipides. Notons que d'autres techniques basées sur la vitesse des ultrasons ont été étudiées, notamment par Whittaker (109) et Park (72) ; elles évaluent la teneur en lipides de la viande par mesure de la vitesse des ultrasons sur un trajet aller-retour à travers un échantillon du muscle long dorsal.

(a) Principe de fonctionnement du VOS

Le VOS utilise la propriété des ultrasons à se propager au travers des tissus animaux à des vitesses qui dépendent de la nature de ces tissus :

- 1720 m/s pour la peau
- 1630 m/s pour le muscle
- 1450 à 1500 m/s pour le gras

Dans un milieu hétérogène composé de gras et de muscle disposé en alternance, il existe une relation entre la vitesse de propagation de l'onde (v) et la fraction de volume occupée par les lipides dans ce milieu :

$$1 / v = L / (a+b)$$

$1/v$ est le temps mis par l'onde pour parcourir l'unité de distance et augmente avec le pourcentage de gras, a et b sont des constantes pour une température donnée.

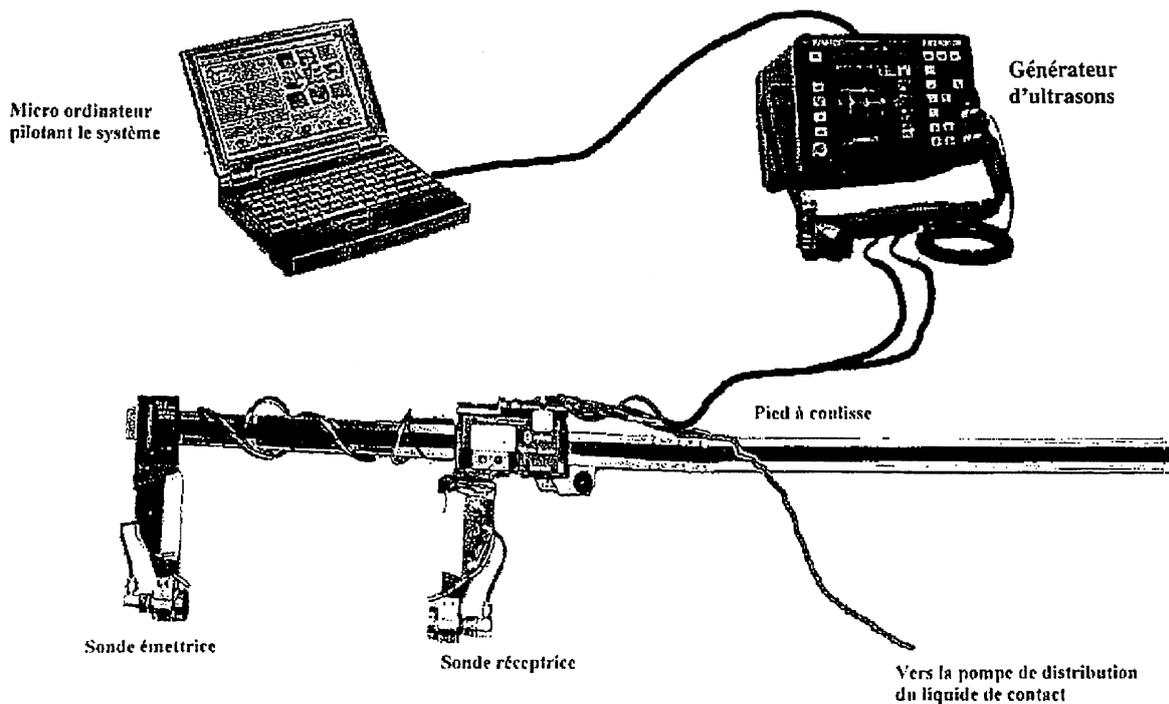
Cette équation doit être utilisée avec précaution car la vitesse des ultrasons dans un tissu est fonction de :

- la composition du gras : il existe des variations selon l'espèce (bovin, ovin, porcin) et selon le type de gras (sous-cutané, intermusculaire) au sein de la même espèce.
- la température : dans le gras, la vitesse des ultrasons augmente de manière curviligne quand la température décroît alors qu'elle diminue dans le muscle.

(b) Description de l'appareil

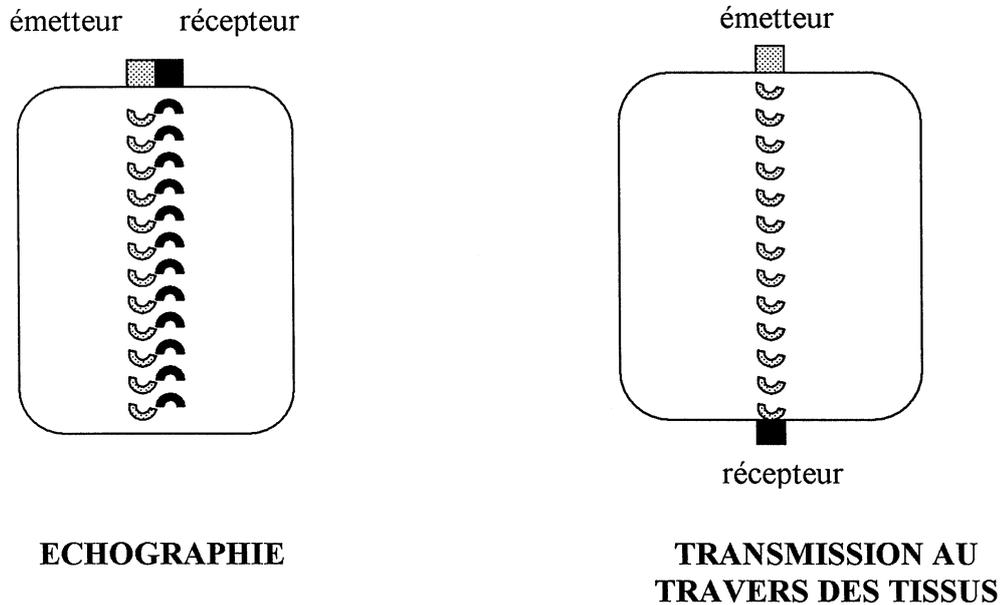
Il est constitué d'un pied à coulisse électronique (dont une des branches est porteuse d'un émetteur à ultrasons et l'autre d'un récepteur) et d'un générateur d'ultrasons. La partie à mesurer est placée entre les deux branches du pied à coulisse.

Fig. 1 : schéma de l'appareil VOS.



Cette technique repose sur l'utilisation d'ultrasons mais n'utilise pas le phénomène d'écho car l'émetteur et le récepteur sont séparés. Sur l'animal vivant, la longueur d'onde utilisée est d'environ 1 MHz.

Fig.2 : différences des principes de fonctionnement entre un échographe et le VOS.



Un ordinateur enregistre :

- la distance (d) entre l'émetteur et le récepteur, exprimée en mm.
- le temps (t) mis par les ultrasons pour aller de l'un à l'autre.

A l'aide de ces 2 mesures, il calcule la vitesse et son inverse qui est proportionnelle au pourcentage de gras.

L'équation est ensuite transformée et exprimée sous la forme :

$$\text{Mesure VOS} = (1/v) * 100 - 600 \quad (\text{en } \mu\text{s/m})$$

Pour un même site, l'appareil prend une série de 6 mesures successives, l'ordinateur enregistre alors les 6 mesures des vitesses réciproques ainsi que leur écart-type.

Il existe deux types de sondes, l'une pour l'utilisation en vif (longueur d'onde de 1 MHz), l'autre pour les mesures en carcasse (longueur d'onde de 2 MHz).

(c) Protocole de mesure

Sites de mesures

Ils doivent répondre aux exigences suivantes :

- aucun os ne doit se trouver sur la trajectoire des ultrasons ; en effet la différence d'impédance acoustique entre les tissus est trop importante et 99 % des ultrasons sont renvoyés sous forme d'écho. Le tissu osseux est donc un obstacle infranchissable pour les ultrasons.
- il faut pouvoir encadrer le site avec un pied à coulisse (le site ne doit pas être trop large).
- le site doit avoir un accès commode lorsque l'animal est immobilisé dans une cage à contention.
- le site doit être facilement repérable sur l'animal.

A partir d'études menées au cours des années précédentes, il a été décidé de retenir 2 sites de mesure *in vivo* : épaule et filet.

Stratégie de mesure

Deux mesures sont réalisées systématiquement par site et par animal pour un opérateur ; l'ordre est le suivant : épaule, filet, épaule, filet.

- Si les 2 mesures sont fiables (nombre de mesures élémentaires prises en compte par l'ordinateur supérieur ou égal à 4 et écart-type de ces mesures inférieur ou égal à 0.02), on conserve les 2 mesures et on utilise leur moyenne.
- Si l'une des mesures est non fiable, elle est éliminée.
- Si les 2 mesures ne sont pas fiables, on conserve alors les deux (cas rare toutefois).

(d) Synthèse de l'utilisation du VOS

Historique

Cet appareil a été mis au point par l'Université de Bristol pour estimer la composition des carcasses à l'abattoir de manière objective (67). Cette technique permet en effet de prendre en compte à la fois les gras sous-cutanés, intermusculaires et intramusculaires. Cette étude a donc révélé le potentiel du VOS à classer les carcasses, surtout du point de vue de leur pourcentage de maigre.

En 1990, les mêmes auteurs (68) ont mis au point un appareil utilisable en routine à l'abattoir et ont montré que la moyenne des vitesses réciproques (la vitesse réciproque est l'inverse de la vitesse) à trois sites (un au niveau du muscle scalène et deux pour le muscle long thoracique respectivement aux 7^{ème} et 10^{ème} espaces intercostaux) est un bon prédicteur du pourcentage de tissu maigre de la carcasse. Si on ajoute à ce paramètre la mesure de

l'épaisseur de gras sous-cutané, on obtient un écart type résiduel de seulement 1.35% de tissu maigre. D'autres investigations ont donc été menées.

Résultats des expérimentations françaises utilisant le VOS

Renand *et al.* (84) ont aussi révélé l'intérêt du VOS pour prédire la composition corporelle des bovins ; cette étude, qui est parmi les premières sur le VOS en France, donne des résultats encourageants dans l'évaluation de la quantité de dépôts adipeux des bovins ($R^2=0.59$ pour le VOS en vif) et évoque les perspectives d'utilisation de cet appareil en génétique et en zootechnie.

Dans le cadre du programme INTERBEV 1990-93 (24), plusieurs méthodes d'estimation de la composition corporelle et de la composition de la carcasse ont été comparées sur 699 animaux :

- l'échographie,
- la mesure de la taille des adipocytes,
- le VOS,
- les notes de conformation et de gras sur l'animal vivant selon la grille EUROP,
- la pesée des gras de rognons et d'émoussage,
- les notes de conformation et de gras en carcasse selon la grille EUROP,
- le poids de la carcasse,
- le jugement à la coupe.

Ce rapport est en accord avec le comité bovin de la CNAG de 1994 (5) et conclut que, parmi ces techniques, les plus appropriées pour prédire le pourcentage des dépôts adipeux totaux dans le poids vif vide de l'animal vivant sont la mesure du diamètre des adipocytes et de la vitesse des ultrasons.

La corrélation du VOS en vif avec le pourcentage des dépôts adipeux totaux donne en effet des R^2 de 0.59 et 0.55 respectivement sur les expérimentations de 1991 et 1992, valeurs à comparer avec celles de la mesure de la taille des adipocytes : 0.63 et 0.70.

Etant donné la difficulté de réalisation en routine de cette dernière méthode, le VOS apparaît donc comme la meilleure méthode d'appréciation du pourcentage de dépôts adipeux dans le poids vif vide.

Journaux *et al.* (55) donnent des corrélations entre mesures VOS à l'épaule et au filet avec la teneur en dépôts adipeux de la carcasse égales à 0.51. Là encore, on constate une nette amélioration de la précision par rapport à la note d'état pour laquelle la corrélation est seulement de 0.30.

Denoyelle *et al.* (25) considèrent aussi le VOS comme la méthode ayant le meilleur rapport qualité de prédiction des dépôts adipeux totaux-facilité de mesure, avec des R^2 du même ordre de grandeur (0.59 et 0.55 en vif) ou supérieurs pour Renand et Fischer (82) (R^2 de 0.60 et 0.67 selon le site). Ces études réalisées sur des jeunes bovins représentatifs des taureaux évalués en contrôle de performance en vue du testage des taureaux d'insémination artificielle sont toutes en faveur de l'intégration du VOS aux programmes de sélection français.

Cependant, le VOS utilisé seul en vif souffre d'un manque de précision évident : il prédit par exemple un pourcentage de gras de 13.83 avec un écart type de 1.95. La mesure VOS en carcasse associée au poids et à la note de gras de la carcasse donne alors une meilleure précision : l'écart type est réduit à 1.35.

On compense alors ces lacunes en multipliant les mesures et les effectifs : ceci est possible en génétique où l'on peut évaluer la valeur d'un taureau par l'intermédiaire de sa descendance nombreuse. En profitant des bénéfices de cette technique sur plusieurs générations de taureaux, on peut imaginer réaliser des progrès importants sur le plan de la sélection.

En revanche, pour ce qui est de donner une valeur absolue du pourcentage de gras d'un animal par sa simple mesure VOS en vif, on n'est pas assez précis. On pourra par contre établir un classement relatif d'animaux entre eux, ceux-ci étant mesurés dans les mêmes conditions de terrain.

Quoi qu'il en soit, cette méthode apporte un supplément de précision significatif (environ 30 %) par rapport à la technique classique des maniements. Si l'on s'intéresse à l'apport zootechnique de la méthode VOS, c'est-à-dire sa capacité à prédire le rendement d'un bovin à la découpe, paramètre conditionnant sa valeur, on constate que le coefficient de détermination R^2 du VOS en vif pour la prédiction du pourcentage du gras de découpe dans la carcasse varie de 0.43 à 0.48 selon les lots d'animaux.

Le VOS n'est donc pas adapté à la demande de l'industriel en tant qu'outil de mesure précis de la composition de la carcasse.

Répétabilité et effet opérateur (55)

La répétabilité des mesures est calculée en mesurant 2 fois au minimum le même animal et en exploitant la variance animale et la variance résiduelle donnée par le logiciel de statistiques après régression linéaire pour la série de mesures de la façon suivante : c'est le rapport de la variance animale sur la variance totale, celle-ci étant la somme de la variance animale et de la variance résiduelle.

L'expérience de 1997 a été conduite sur des taurillons Charolais et Limousins et il est ressorti que la variabilité due aux erreurs de mesures était stable mais que la variabilité due aux animaux était plus élevée pour les Charolais, ce qui donne des meilleurs coefficients de répétabilité pour ces derniers que pour les Limousins. En effet, pour les taurillons Limousins, la variabilité due aux erreurs de mesures est supérieure à la variabilité due aux différences entre animaux, ce qui rend difficile l'interprétation des résultats VOS pour des animaux homogènes et moyennement gras.

D'autre part, il apparaît que les variances animales donnent des valeurs proches d'un opérateur à l'autre, mais que la variance due aux erreurs de mesures est très dépendante du technicien ; on peut donc affirmer que l'effet opérateur est très marqué pour le VOS : l'entraînement du technicien est primordial.

Finalement, après les séries de mesures de 1998, on est parvenu à des coefficients de répétabilité compris entre 0.6 et 0.7 pour tous les types d'animaux.

De son côté, le bilan des mesures VOS 1999-2000 (3) concernant l'engraissement des vaches de réforme aboutit à des répétabilités décevantes de l'ordre de 0.6 pour les mesures à l'épaule et inférieures à 0.3 pour les autres sites (dernière côte et filet).

L'évolution des valeurs de vitesses réciproques au cours de l'engraissement est aussi médiocre : en deux mois d'engraissement, les valeurs à l'épaule n'augmentent que d'un écart type environ, ce qui montre que le VOS ne permet pas d'appréhender des différences nettes d'état corporel.

Les corrélations des mesures VOS en vif avec la composition corporelle données par les dissections des carcasses montrent que seul le site de l'épaule est utilisable ($r=0.79$) pour la prédiction de l'état corporel sans avoir pour autant d'avantage sur la note d'état en vif.

Il ressort donc de cette étude l'intérêt du seul site de l'épaule et la nécessité de prendre la moyenne des valeurs obtenues par deux opérateurs lors de deux séances de mesures pour espérer obtenir des estimations correctes de l'état corporel. C'est le protocole retenu pour les expériences à venir : on mesurera le site de l'épaule uniquement et ceci lors de deux séances ayant lieu deux jours consécutifs et avec l'intervention de deux opérateurs.

Intérêts du VOS

- qualité de la viande (4)

Compte tenu de la variabilité de la teneur en lipides intramusculaires d'un morceau à l'autre, il apparaît difficile de déterminer un état d'engraissement de l'animal correspondant à une qualité de viande optimale. L'intérêt du VOS comme des autres techniques d'évaluation de la composition corporelle des bovins est ici limité.

En revanche, l'utilisation du VOS au niveau du morceau de viande pour en déterminer sa teneur en lipides intramusculaires est à l'étude et donne de premiers résultats encourageants.

- génétique (82)

La sélection en races bovines allaitantes a pour but de produire des animaux bien conformés et peu gras. En France, les taureaux testés en station sont évalués sur leur poids, leur conformation musculaire notée par pointages et leur efficacité alimentaire. Ce paramètre est en effet lié favorablement à la « maigreur » du taureau. Le VOS permet d'évaluer le pourcentage des dépôts adipeux dans le poids vif vide ; autrement dit, il est utile pour apprécier objectivement les capacités des bovins à déposer du gras. Cet outil supplémentaire accroît donc les chances de mettre en évidence des différences entre taureaux, c'est un atout de plus pour la sélection.

- suivi de l'état d'engraissement des vaches

Ivings *et al.* (52) ont mené une étude sur des vaches laitières et ont montré l'intérêt d'utiliser le VOS dans le suivi des réserves énergétiques. En effet, en associant le poids vif aux mesures VOS des vaches laitières, on parvient à expliquer 87 % des variations de leurs réserves énergétiques.

Cette technique permet donc de réaliser un suivi objectif de l'état corporel des vaches laitières au cours du cycle gestation-lactation et de mieux prévenir les déséquilibres alimentaires ; on réduit alors la fréquence des pathologies d'ordre métabolique.

C. Méthodes réservées au domaine de la recherche

1) Estimation de l'état d'engraissement des bovins vivants à partir de la taille des cellules adipeuses (94)

(a) Principe

L'accroissement du poids des dépôts adipeux chez les bovins est dû pour 80 % à l'augmentation de la taille des adipocytes contre 20 % à l'augmentation de leur nombre. De plus, chez l'adulte, on n'a que des changements de taille ; il est donc possible d'estimer l'état d'engraissement des bovins par mesure de la taille des adipocytes, méthode réalisable *in vivo*.

(b) Description de la méthode

Le site de prélèvement, situé au niveau de la croupe, entre la base de la queue et la pointe de l'ischion a été choisi pour les raisons suivantes :

- les dépôts adipeux sous-cutanés sont de bons reflets de l'état d'engraissement des bovins (97)
- le site est accessible sans danger sur un animal pris dans un couloir de contention
- on peut prélever ce dépôt même sur un animal très maigre.

La technique de prélèvement est simple et comprend la tonte, l'antisepsie et l'anesthésie locale du site, l'incision de la peau sur 1 à 2 cm, le prélèvement et la désinfection de la plaie.

L'échantillon est alors placé dans un tube de liquide physiologique maintenu à 39°C puis, au laboratoire, découpé en morceaux et fixé. On doit ensuite le dilacérer pour dissocier les adipocytes qui seront filtrés et photographiés sous le microscope. Il reste donc à mesurer le diamètre d'une centaine de cellules, soit avec une simple règle graduée, soit avec une table à digitaliser.

(c) Relation entre le diamètre des adipocytes et l'adiposité

Des équations permettant d'estimer le pourcentage de dépôts adipeux totaux dans le poids vif vide à partir du diamètre des adipocytes ont été élaborées pour plusieurs races et pour les deux sexes. Notons que les femelles déposent plus de gras que les mâles pour un même accroissement du diamètre des adipocytes. Une autre différence importante est celle entre types d'animaux, les Pie Noirs étant plus gras que les Charolais, les Limousins ou les Salers pour un même diamètre. Ces résultats proviennent probablement de différences de croissance cellulaire des dépôts sous-cutanés entre les races citées.

(d) Précision de la méthode

Elle est assez bonne, environ 3 % du poids vif vide ; on peut donc appréhender un accroissement de l'état d'engraissement de cet ordre, ce qui correspond par exemple à trois semaines d'engraissement d'une vache Pie Noire.

Bilan

Cette méthode permet une bonne approche de l'état corporel des bovins, suffisante pour classer les animaux entre eux mais doit être remplacée par la mesure de l'espace de diffusion de l'eau lourde pour des mesures plus précises. Elle reste limitée au domaine expérimental compte tenu de sa mise en œuvre et de son analyse en laboratoire engendrant des coûts relativement élevés.

2) Estimation de la composition de la carcasse des taurillons à partir de la composition de la sixième côte (93)

Une méthode similaire d'estimation de la composition de la carcasse à partir de la composition de la onzième côte a été mise au point par le même auteur mais elle nécessitait la découpe du « milieu de train de côte », entraînant une dépréciation de la carcasse supérieure à la valeur du morceau prélevé. En revanche, la 6^{ème} côte est la première dudit train de côte, elle est donc facilement accessible.

Elle est prélevée par section au milieu du 6^{ème} espace intercostal puis disséquée pour séparer les dépôts adipeux, les muscles et les os. Des équations permettent de déduire le poids de ces éléments dans la carcasse à partir de leur poids dans la 6^{ème} côte et du poids de la carcasse.

Cette méthode permet d'estimer avec précision le poids des dépôts adipeux et des muscles de la carcasse : les écarts types résiduels sont respectivement égaux à 3.36 et 3.90 kg, soit 1.1 et 1.5 % du poids de la carcasse.

Notons qu'il est possible d'améliorer la précision en incorporant à l'équation le poids des gras périrénaux et précuraux et celui des os canons mais, pour ce qui est de l'estimation de l'état d'engraissement, les éléments de la 6^{ème} côte suffisent.

La répétabilité du prélèvement est essentielle dans la précision des mesures, c'est pourquoi les manipulations doivent être réalisées par le même technicien.

Il faut remarquer que les équations citées ont été mises au point pour des taurillons de races et d'âges donnés et qu'elles ne sont utilisables avec précision que pour ces bovins ; cependant on pourra les utiliser sur d'autres types d'animaux pour établir des classements d'état d'engraissement.

3) Dosage sérique de leptine

La leptine est une hormone produite principalement par le tissu adipeux. Un de ses rôles essentiels est d'informer l'organisme sur le niveau de ses réserves lipidiques.

(a) Validité de la méthode

Chilliard *et al.* (20) ont étudié l'effet du niveau alimentaire, de l'état d'engraissement et de la race sur la leptinémie et ont obtenu les résultats suivants : la leptinémie a été de 15 % moins élevée chez les vaches sous-alimentées comparées aux suralimentées. Elle est significativement et positivement reliée au volume des adipocytes sans qu'il y ait d'effet de la race. On peut donc conclure que, chez les bovins, la leptinémie est en relation étroite avec la taille des adipocytes qui est elle-même un bon indicateur de l'adiposité des animaux (22).

D'autre part, chez les bovins, pour un niveau alimentaire donné, environ 50 % des variations interindividuelles de la leptinémie sont expliquées par les différences d'état d'engraissement. Cependant, la leptinémie est diminuée lors de sous-alimentation et réaugmente lors de réalimentation. Etant donné que l'effet du niveau alimentaire sur la leptinémie est indépendant des variations d'état d'engraissement (au moins à court terme), la corrélation entre leptinémie et état corporel semble trop faible pour être exploitable.

Ces données conduisent à relativiser les espoirs de pouvoir utiliser la leptinémie en tant que prédicteur de la composition corporelle des animaux. En effet, sur des animaux dont les conditions nutritionnelles (bilan énergétique, heure par rapport au repas,...) et physiologiques ne seraient pas parfaitement contrôlées, on ne peut espérer qu'une prédiction expliquant bien moins de 50 % de la variabilité réelle, c'est-à-dire avec une précision moindre que celle de la méthode rapide et peu coûteuse de notation de l'état corporel (81).

(b) Intérêt du dosage de leptine

La leptine pourrait être un signal métabolique à long terme, dont la diminution stimulerait l'appétit et diminuerait la dépense énergétique, tout en inhibant la reproduction lorsque le niveau des réserves corporelles est insuffisant pour enclencher une gestation et une lactation. La baisse de leptinémie consécutive à un apport alimentaire insuffisant pourrait également être un signal à court terme pour les systèmes neurohormonaux régulant le métabolisme énergétique et la fonction de reproduction.

Chez les bovins, l'effet de l'état d'engraissement sur la leptinémie sert probablement de signal de régulation de l'ingestion, qui joue un rôle important dans le niveau de performances, particulièrement chez les vaches laitières hautes productrices en début de lactation. On peut penser que la leptine est impliquée dans la diminution de la capacité d'ingestion de vaches tarées trop grasses, et également dans les mauvais résultats de reproduction fréquemment observés chez les vaches en déficit énergétique et dont l'état d'engraissement a beaucoup diminué (35). Des relations positives entre leptinémie, adiposité des carcasses et note de persillé ont par ailleurs été rapportées chez le bovin en croissance (70). Une meilleure connaissance des effets de la nutrition, de l'environnement et de la sélection génétique sur la production et les effets de la leptine est un enjeu important pour une meilleure maîtrise de la conduite d'élevage, tout en améliorant la qualité des produits et la santé des ruminants.

4) Estimation de la composition corporelle des bovins à partir de l'espace de diffusion de l'eau lourde

(a) Bases théoriques (87)

Cette méthode repose sur deux principes :

- à partir d'un certain stade de développement (qui correspond à l'âge de 5 mois environ chez les bovins), la composition corporelle est liée au volume hydrique de l'organisme, la lipogenèse entraînant la baisse de la teneur en eau,
- l'espace de diffusion de l'eau lourde est lié au volume hydrique de l'organisme.

Par conséquent, l'espace de diffusion de l'eau lourde est statistiquement liée à la teneur corporelle en lipides.

(b) Réalisation des mesures (87), (88), (83), (10)

Une quantité connue d'eau lourde (D_2O) est injectée par la veine jugulaire à raison de 0.5 g / kg de poids vif. Des prises de sang sont réalisées 6, 8, 24 et 48 heures après l'injection pour doser l'eau lourde. Les prélèvements sont stockés à $-20^{\circ}C$ puis lyophilisés pour en extraire l'eau sanguine. La concentration en D_2O est alors mesurée par spectrophotométrie.

L'espace de diffusion de l'eau lourde (ED) est calculé en divisant la quantité de D_2O injectée par la concentration initiale, cette dernière correspondant à l'origine de la régression des concentrations sur le temps.

Les animaux étant pesés au moment de l'injection puis 24 et 48 plus tard, le poids des dépôts adipeux totaux (DA) est estimé par l'équation :

$$DA = 0.690 PM - 0.838 ED$$

où PM représente la moyenne des trois pesées. La teneur en dépôts adipeux totaux est enfin calculée en divisant la masse estimée (DA) par le poids vif moyen (PM).

(c) Intérêts et limites

Renand (83) et Bocquier (10) concluent tous deux à la supériorité de cette méthode à la fois sur la notation de l'état corporel et sur la mesure du diamètre des adipocytes en terme d'évaluation de la composition corporelle des bovins et des ovins. La mesure de l'espace de diffusion de l'eau lourde est donc la technique la plus précise d'évaluation *in vivo* de la composition corporelle des bovins. Cette précision était déjà relevée par Robelin (87) au vu d'expériences antérieures ayant donné les résultats suivants : le coefficient de corrélation entre l'espace de diffusion de l'eau lourde et la teneur totale en lipides de l'organisme varie de -0.92 à -0.99.

Cependant, les moyens techniques et financiers qu'elle nécessite restreignent son usage au domaine expérimental, d'autant que les équations obtenues pour un type de bovins ne sont pas complètement extrapolables à d'autres catégories

5) Impédancemétrie (103)

(a) Définition

L'impédancemétrie bio-électrique est une technique simple qui permet de mesurer l'eau corporelle et sa répartition extra et intra-cellulaire dans l'organisme.

Elle est basée sur la capacité du corps humain à conduire un courant électrique alternatif ; on peut donc lui appliquer la loi d'Ohm : $U = Z \cdot I$

où U est la différence de potentiel, I l'intensité du courant électrique et Z l'impédance du conducteur. Si on fixe I, U donne une valeur représentative de l'impédance.

(b) Impédance des tissus biologiques

En BF (basse fréquence), les cellules qui entrent dans la composition d'une unité de volume de tissu se comportent comme des isolants baignant dans un liquide conducteur de résistivité ρ_0 . Un courant BF est obligé de les contourner. Plus les cellules sont serrées, plus la résistance (ici la résistivité puisqu'on mesure une unité de volume de tissu) est élevée et inversement, moins il y a de cellules dans cette unité de volume, plus le passage du courant est facilité et ρ_{BF} dans ce cas se rapproche de ρ_e (extracellulaire).

En HF (haute fréquence), le fait d'utiliser une fréquence de 1MHz annule l'effet capacitif des membranes cellulaires de telle sorte que, pour traverser une unité de volume de tissu le courant utilise à la fois le liquide extra-cellulaire (L.E.C.) et le liquide intra-cellulaire (L.I.C). ρ_{HF} dépend davantage de ρ_e (extracellulaire) et de ρ_i (intracellulaire) que du facteur γ (facteur correspondant à la « tortuosité » du chemin à parcourir qui correspond à la présence de tissus adipeux) alors que ρ_{BF} dépend principalement de ρ_e et de γ et ne dépend que peu de ρ_i puisque le courant ne traverse pas les cellules en BF.

La résistivité corporelle moyenne de l'ensemble des tissus est la même chez tous les sujets en bonne santé, en revanche chez les sujets maigres et chez les obèses, les inclusions graisseuses non conductrices sont plus ou moins développées par rapport à l'état normal et influencent la tortuosité du champ électrique en HF comme en BF.

(c) Applications vétérinaires

Mesure de l'impédance des jeunes bovins

Un animal en état de santé normal aura des mesures d'impédance statistiquement normales, compte tenu de son âge, de sa race, de son sexe, etc.

Il est admis que l'impédance BF (basse fréquence) est inversement proportionnelle aux volumes de LEC et qu'en HF (haute fréquence) elle est inversement proportionnelle aux volumes de l'eau totale, à condition que la résistivité du plasma soit constante, ce qui est le cas des animaux en bonne santé.

L'inconvénient est qu'il faille s'en tenir à des valeurs ohmiques, non traduisibles en valeurs pondérales.

Techniques de la mesure d'impédance chez les bovins

La mesure de l'impédance exige que les animaux à mesurer soient isolés électriquement, il faut donc placer les bovins sur un plancher sec en bois, couvert de paille et surélevé de 15 à 20 cm par rapport au sol.

L'opérateur implante les aiguilles électrodes en inox sous la peau de l'animal au niveau de la face externe du membre antérieur et de la face externe du membre postérieur d'un même coté de l'animal. Le niveau d'implantation des aiguilles doit être constant afin de recueillir des valeurs comparables d'un animal à l'autre.

On aura intérêt à utiliser un courant de fréquences moins élevées, 1 à 5 kHz en BF et 100 kHz en HF, de manière à réduire les fuites à la terre du courant de mesure.

Les valeurs d'impédance obtenues après 10 à 15 secondes seront notées immédiatement, puis interprétées par rapport à des valeurs de référence préalablement établies à partir d'échantillons déterminés en fonction de l'âge, du sexe, de la race...

La valeur normale du rapport $R = Z_{BF} / Z_{HF}$ devra, comme en médecine humaine, être calculée statistiquement sur un certain nombre d'animaux types.