

EVOLUTION DE QUELQUES PROPRIETES MECANIQUES DU MUSCLE PENDANT LA MATURATION

P. SALE

Station de Recherches sur la Viande
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRICOLE
THEIX - 63 - SAINT-GENES-CHAMPANELLE

Parmi les transformations *post mortem* qui se produisent dans le muscle, celles qui correspondent à des modifications de la structure des divers constituants jouent un rôle déterminant sur l'évolution des propriétés mécaniques du milieu et, par voie de conséquence, sur le degré final de tendreté que peut atteindre le muscle.

D'une manière générale, l'ensemble des phénomènes qui constituent la maturation des viandes est assez mal connu. Leur étude a été conduite principalement par voie biochimique ou histologique ce qui permet une évaluation sélective de l'évolution des différents composants du muscle. Il est souvent difficile d'en tirer des conclusions précises quant aux modifications des propriétés mécaniques du muscle, celles-ci dépendent dans une large mesure des interactions des divers milieux et en particulier des milieux myofibrillaires et conjonctifs.

L'étude directe du comportement mécanique du muscle, qui font nécessairement intervenir ces diverses interactions, apparaît donc comme un complément indispensable des études biochimiques et on peut penser que la confrontation des résultats obtenus par des méthodes différentes permettra une meilleure connaissance de l'importance relative des propriétés des divers constituants sur le comportement mécanique global du muscle.

Le choix du test mécanique est évidemment fondamental puisqu'il définit la nature des propriétés qui peuvent être mesurées. Toutefois en l'absence de données précises sur la nature des paramètres mécaniques qui interviennent dans la notion de "tendreté", nous avons commencé par effectuer des expériences de cisaillement, ce procédé étant couramment utilisé pour évaluer la tendreté, notamment dans l'appareil de WARNER et BRATZLER.

I - APPAREIL DE CISAILLEMENT

Le dispositif de cisaillement que nous utilisons est schématiquement représenté sur la figure 1. Il comprend essentiellement une lame L de 1,2 mm d'épaisseur dans laquelle est découpée une fenêtre rectangulaire F, qui coulisse entre deux couteaux C affûtés selon un angle de 45°. L'échantillon découpé sous forme d'un parallélogramme d'environ 1 cm de côté et quelques centimètres de long est introduit dans la fenêtre et cisailé perpendiculairement aux fibres entre les arêtes a et à de la lame et des couteaux. La vitesse de cisaillement est constante et voisine de 2 mm/seconde. Des supports réglables permettent d'obtenir d'une part un jeu très faible entre la lame et les couteaux, d'autre part la coincidence simultanée des arêtes a et à.

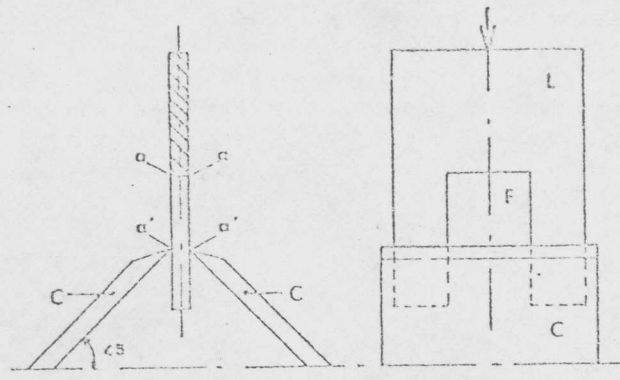


Fig 1

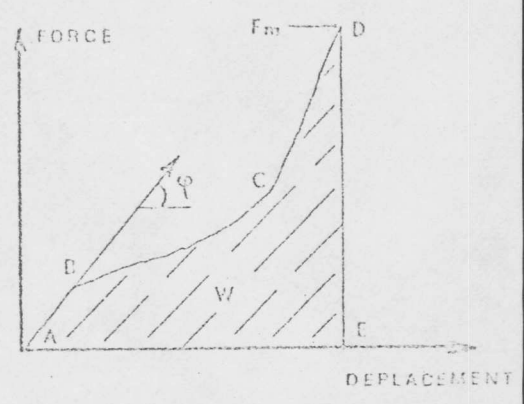


Fig 2

L'effort exercé sur la lame et son déplacement relatif par rapport aux couteaux sont mesurés à l'aide de capteurs électriques dont les signaux sont envoyés sur les entrées d'un enregistreur XY. On obtient ainsi directement les diagrammes force-déplacement. En outre, un intégrateur associé au capteur de force permet la mesure du travail dépensé au cours du cisaillement.

Ce dispositif a d'abord été utilisé sur une machine hydraulique avec laquelle nous avons effectué les expériences décrites plus loin. Par la suite nous avons réalisé un appareil autonome et facilement transportable à entraînement électromécanique. Simultanément à l'enregistrement des diagrammes, deux indicateurs permettent la lecture directe du travail et de la force maximum atteinte au cours du cisaillement.

II - DIAGRAMMES DE CISAILLEMENT DES VIANDES CRUES

A) Généralités

Les diagrammes force-déplacement que nous avons obtenus sur divers muscles de bovin à divers stades de maturation présentent des formes très diverses. Ceci traduit l'intervention de plusieurs phénomènes et de notables variations dans leur importance relative au cours de l'expérience.

Parmi tous les types de diagrammes que nous avons pu rencontrer, celui qui nous paraît à la fois le plus simple et le plus complet est schématiquement représenté sur la figure 2. Ce tracé peut être décomposé en trois parties, une partie initiale sensiblement rectiligne AB, une partie concave BC et un pic final CDE.

La partie AB correspond à une déformation de faible amplitude de l'échantillon, qui intéresse principalement la zone comprise entre la lame et les couteaux. Le phénomène dominant est donc une compression et on a pu vérifier qu'en pratique elle était inélastique.

La partie BC correspond à une déformation de grande amplitude au cours de laquelle les fibres situées au contact de la lame et, à un degré moindre, celles situées au contact des couteaux, subissent une courbure de plus en plus accentuée. Ceci s'accompagne d'une augmentation de la largeur de l'échantillon dans le sens transversal et également d'un déplacement d'une partie du milieu musculaire situé à l'aplomb de la lame. En effet, la fraction de l'échantillon que l'on récupère à la fin de l'expérience entre les couteaux présente toujours un volume très inférieur à celui qui était initialement compris entre la lame et les couteaux. Cette phase fait donc intervenir des phénomènes complexes et met en jeu à la fois des effets de compression et de traction.

Le pic final peut s'interpréter comme le cisaillement proprement dit. L'examen des échantillons permet de penser que au cours de cette phase de l'expérience, ce sont surtout les éléments du tissu conjonctif qui interviennent.

Trois grandeurs simples peuvent être mesurées sur ce diagramme :

La pente P de la partie rectiligne AB caractérise la phase de compression initiale ;

La valeur Fm du maximum atteint par la force au cours de l'expérience caractérise la phase de cisaillement proprement dit ;

Enfin la surface du diagramme est proportionnelle au travail W dépensé au cours du cisaillement.

B) Evolution post mortem des diagrammes

En pratique les diagrammes présentent rarement l'allure de la figure 2. Ils en diffèrent principalement par une modification notable de l'importance relative des diverses phases et par une superposition plus ou moins importante de ces phases. Comme les propriétés myofibrillaires jouent un rôle important dans les divers phénomènes qui interviennent au cours du cisaillement l'allure des diagrammes dépend largement du temps post mortem.

La figure 3 représente l'évolution des diagrammes et des valeurs de P, W et Fm, pour deux échantillons prélevés sur un muscle pectoral profond de taurillon et conservés respectivement à + 18°C et + 2°C.

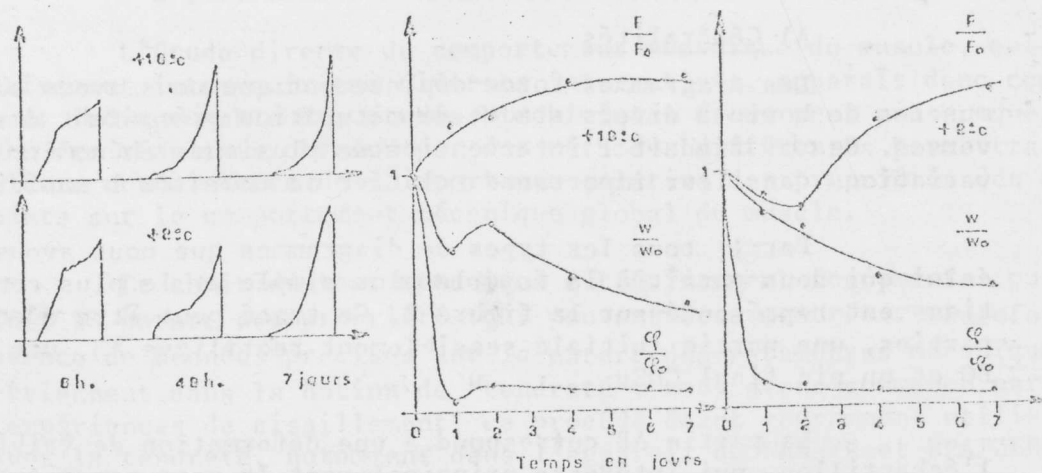


Fig 3

Les diagrammes obtenus environ 5 heures après l'abattage présentent une partie initiale très rectiligne de pente P élevée, suivie d'une partie légèrement concave de tracé irrégulier se terminant par un plateau soit par un pic peu marqué. La résistance du milieu musculaire à la compression est très élevée ce qui entraîne une forte résistance à la déformation. Le cisaillement débute alors sur une épaisseur importante de l'échantillon et s'effectue sur un milieu riche en éléments myofibrillaires. On constate que la force de cisaillement est alors sensiblement constante.

L'évolution post mortem conduit progressivement à des diagrammes qui présentent toujours un pic de cisaillement nettement différencié, mais où la partie initiale a disparu, le tracé de la phase de déformation présentant

une courbure continue et un tracé très régulier.

L'évolution dépend des conditions de conservation du muscle et en particulier de la température. Elle est considérablement plus rapide à température élevée. Elle dépend aussi largement du type de muscle, comme le montre la figure 4 qui représente les diagrammes 1 j. et 8 j. post mortem obtenus sur divers muscles de Bovin (vache de 4 ans). On constate que 24 h post mortem le plateau de cisaillement subsiste très nettement pour le *Psoas Major* et le *Longissimus dorsi*, et à un degré moindre pour *Triceps brachii caput laterale*. Mais dans tous les cas la maturation conduit à un type unique de diagramme et ceci est un phénomène général.

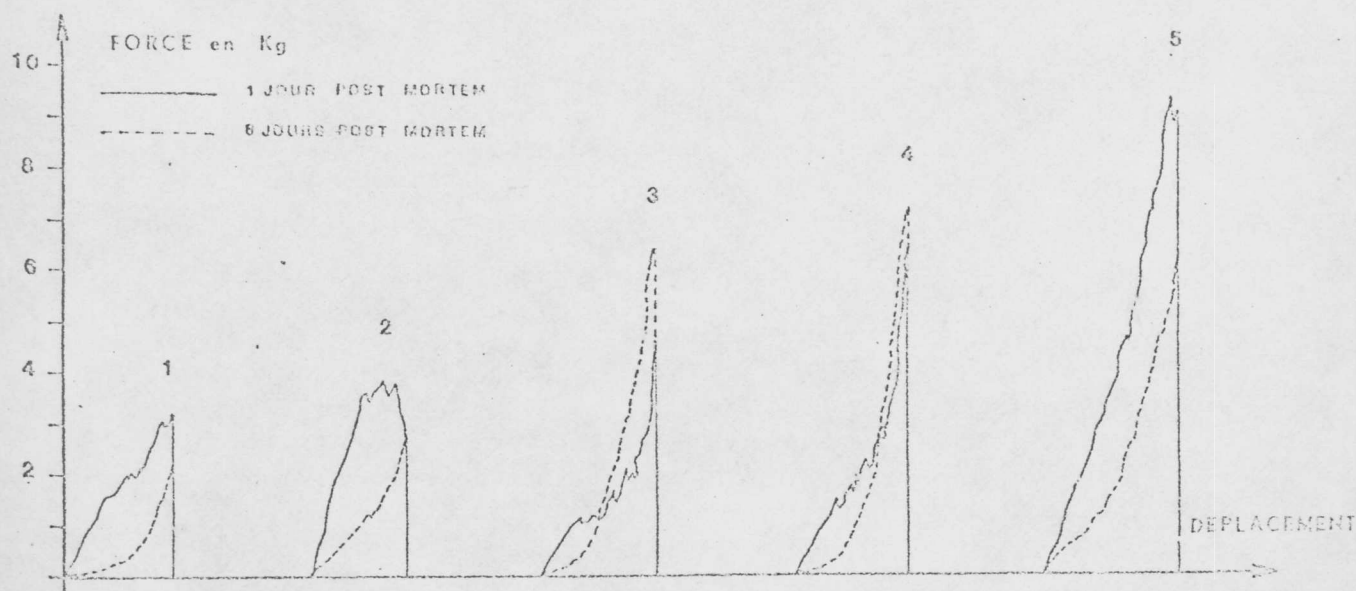


Fig 4. 1 - *Longissimus dorsi* - 2 - *Psoas major* - 3 - *Semi tendinosus*
4 - *Pectoralis profundus* - 5 - *Triceps brachii caput laterale*

Corrélativement, on observe d'importantes variations de valeurs de P, W et Fm. La valeur de P diminue considérablement pendant les premières 48 heures. Au-delà la partie rectiligne tend à disparaître et la détermination de P devient aléatoire et peut conduire à une erreur systématique par excès.

La valeur de Fm évolue de façon notable et différente selon la température de conservation. Pour l'échantillon conservé à température de + 18° cette valeur croît et se stabilise à une valeur supérieure d'environ 50 % à sa valeur initiale. Pour l'échantillon conservé à température de + 2° au contraire Fm commence par diminuer puis croît pour atteindre une valeur voisine de celle obtenue à + 18°. Enfin le travail subit toujours une diminution mais variable selon les échantillons.

Ce simple exemple montre que le comportement mécanique du milieu musculaire, surtout pendant les premières 48 heures suivant la mort est très complexe, il serait nécessaire de connaître la nature de l'importance relative des divers phénomènes qui interviennent au cours de l'expérience de cisaillement pour pouvoir préciser la signification des diverses grandeurs

qui caractérisent ces diagrammes.

Toutefois la comparaison des résultats précédents et des données classiques de la biochimie des viandes permettent d'avancer quelques hypothèses.

En effet, les études biochimiques montrent que la maturation correspond à une altération croissante de la structure des éléments myofibrillaires (affaiblissement des liaisons actine-myosine, altération de structure au niveau des stries Z et M et au niveau des liaisons inter-myofibrillaires) alors, qu'au moins au niveau du collagène, les tissus conjonctifs évoluent peu. Sur ces bases on peut présumer que les seules modifications appréciables apportées par la maturation aux propriétés mécaniques des viandes portent sur la rigidité et surtout sur la cohésion myofibrillaire.

Puisque les valeurs de P et de W diminuent pendant la maturation ces quantités font intervenir dans une large part les propriétés mécaniques du milieu myofibrillaire, à un degré plus élevé pour P que pour W. Compte tenu des observations faites sur le déroulement de l'expérience, on peut penser que pour ces deux grandeurs, c'est la cohésion myofibrillaire qui joue le rôle dominant.

La diminution de la cohésion myofibrillaire permet également d'expliquer l'évolution de la force maximum de cisaillement. Tant que la cohésion est élevée, la déformation de l'échantillon s'accompagne d'efforts de traction importante dans la trame de conjonctif, qui s'ajoutent aux efforts de cisaillement pur et facilitent le cisaillement de l'échantillon. Ces efforts diminuent avec la cohésion et, comme les propriétés mécaniques des conjonctifs évoluent peu, entraînent une augmentation progressive de la force de cisaillement, alors que le diagramme évolue d'une forme de plateau vers une forme à pic net. Dans le cas des muscles *Psoas major* et *Longissimus dorsi* on observe d'une part une prolongation dans le temps du cisaillement en plateau, d'autre part, une diminution de la force maximum lorsque est atteinte la forme en pic (cf. fig. 4). La faible teneur de ces muscles en tissus conjonctifs et par voie de conséquence l'importance prépondérante des propriétés myofibrillaires dans leur comportement mécanique explique cette évolution.

En résumé il apparaît que la signification des valeurs de P, W et Fm dépend du type de diagramme et donc du temps post mortem considéré.

Lorsque le diagramme présente un plateau de cisaillement, la valeur de P dépend essentiellement des propriétés myofibrillaires.

Si le diagramme présente un pic, la valeur de P n'est généralement plus définie ; la valeur de Fm caractérise surtout les propriétés du milieu conjonctif alors que celle de W est liée à la fois à celle du conjonctif et du myofibrillaire.

D'une manière générale il apparaît que seules les valeurs de W et Fm pourront être comparées entre différents muscles, à condition que les diagrammes présentent un pic de cisaillement.

III - INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR INITIALE DE L'ÉCHANTILLON SUR LES VALEURS Fm et W

Le mode de cisaillement d'un corps non rigide, et en particulier

des viandes dépend, dans certaines limites, des caractéristiques propres du dispositif utilisé (épaisseur de la lame, inclinaison des couteaux, angle des arêtes etc...).

Nous avons effectué à l'aide de notre dispositif des expériences de cisaillement sur divers corps homogènes de propriétés mécaniques variées (chewing gum, caoutchouc, papier, polyéthylène). D'une manière générale il apparaît que la forme des diagrammes et la relation entre la force et l'épaisseur initiale sont fonction de l'épaisseur initiale. Tant que celle-ci reste inférieure à une valeur limite e_0 la force maximum est proportionnelle à l'épaisseur initiale et les diagrammes présentent un pic. Lorsque l'épaisseur initiale dépasse e_0 , les diagrammes évoluent, selon des modalités propres à chaque corps, vers une forme en plateau, et la force maximum n'est plus proportionnelle à l'épaisseur initiale.

Le même phénomène peut être observé avec des tissus riches en conjonctif en particulier sur les aponévroses de bavette qui permettent d'obtenir des lames fines et homogènes d'épaisseur régulière. La figure (5a) montre que l'épaisseur limite est alors voisine de 1 mm.

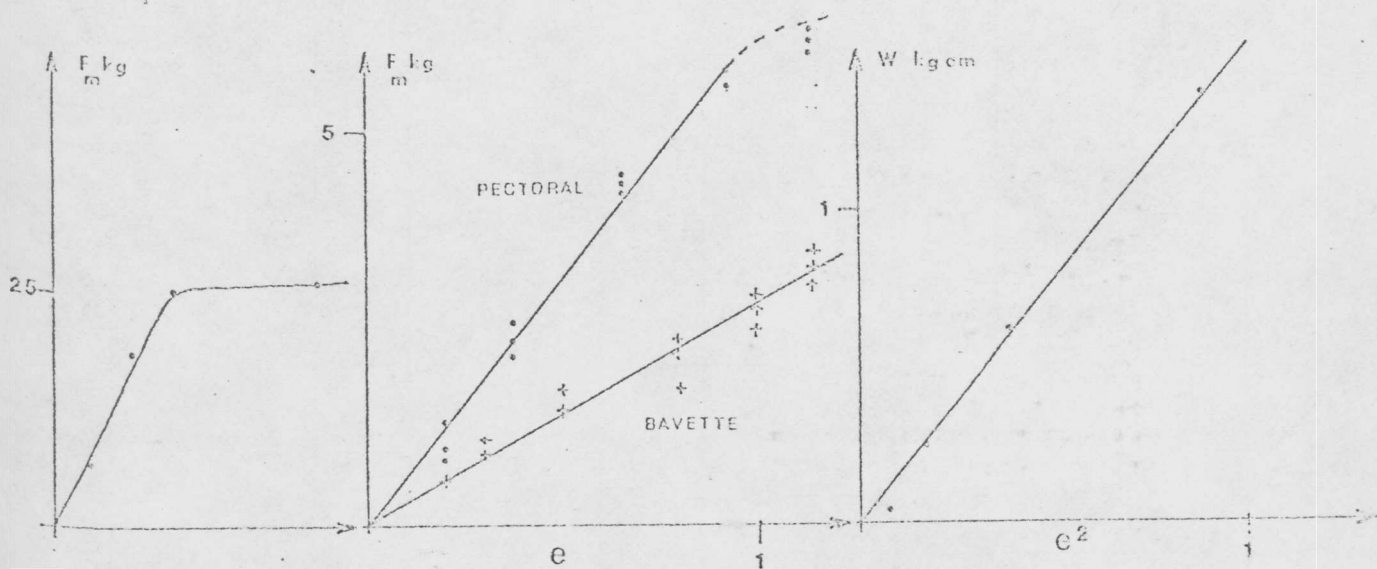


Fig 5

Pour les muscles ayant atteint un degré de maturation suffisant pour que le pic de cisaillement soit caractéristique, il apparaît que la force de cisaillement est proportionnelle à l'épaisseur initiale tant que celle-ci reste inférieure à environ 1 cm, cette valeur limite étant légèrement différente selon les muscles (fig. 5b).

La force maximum de cisaillement peut alors s'écrire $F_{m2} = 2G e_0 L = 2GS$ ou L représente la largeur de la fenêtre et S la section initiale de l'échantillon. La quantité $G = \frac{F_{m2}}{2S}$ qui représente la résistance spécifique du muscle pour le cisaillement permet de faire des comparaisons entre muscles, même si l'épaisseur initiale des échantillons n'est pas identique. Ceci n'est plus vérifié si le diagramme présente un plateau de cisaillement même léger. Et il apparaît que l'enregistrement des diagrammes est indispensable au moins si l'on ne connaît pas le stade de maturation du muscle, pour éviter toute interprétation erronée de G .

En ce qui concerne la variation du travail avec l'épaisseur, les

TABLEAU I

ANIMAUX		MUSCLES										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
N° 1	σ	6,6	5,6	6,7	4,7	5,2	4,4	5,9	4,9	4,5	3,9	8,1
	c	23	15	15	25	10	9	37	30	10	16	12
	W	2	1,7	1,8	1,3	1,5	0,9	1,8	1,6	1,4	1,3	2
	c	23	12	12	17	12	8	22	31	6	19	14
N° 2	σ	6,4	3	5,8	5,3	3,5	4,4	4,1	5	6,1	3,6	
	c	16	24	22	9	22	10	16	14	22	30	
	W	1,3	0,8	1,4	1,7	1,1	1,3	1	1,1	1,5	0,8	
	c	21	22	30	15	18	15	25	20	16	30	
N° 3	σ	5,2	3,3	5,9	4,5	2,4	2,4	3,8	4,1	5,3	4,3	6,3
	c	19	15	19	11	14	13	18	14	12	25	23
	W	1,4	1,3	1,6	1,8	0,75	1	1	1,3	1,3	1,5	1,6
	c	12	14	14	14	9	12	23	16	8	20	17
N° 4	σ	6,2	5	5,3	4,5	4,2	4,6	5,7	4,5	6,8	3,6	8
	c	13	14	27	19	8	19	16	24	17	26	12
	W	1,8	1,3	1,5	1,3	2,1	1,7	1,7	1,2	1,6	1,1	2,4
	c	21	15	20	11	18	17	23	20	17	32	13
N° 5	σ	5,4	5,1	6,7	5	4,5	4,8	3,8	3,8	5,4	4,8	7,5
	c	16	20	23	10	35	17	13	25	16	14	19
	W	1,2	1,5	1,7	1,3	1,5	1,3	1,1	1	1,6	1,4	2,6
	c	15	15	15	20	34	16	23	30	17	15	10
N° 6	σ	4,1	3,8	4,8	4,8	3,5	3,4	3,5	4	4,7	4	7,8
	c	25	6,5	10	14	18	15	13	10	9	13	21
	W	1,2	1,1	1,3	1,6	1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	2,2
	c	26	10	12	20	15	7	23	9	21	17	32

c = coefficient de variation (%)

- 1 - *Triceps brachii caput longum*
- 2 - *Semi spinalis capitis*
- 3 - *Supra spinatus*
- 4 - *Latissimus dorsi*
- 5 - *Splenius*
- 6 - *Rhomboides*

- 7 - *Infra spinatus*
- 8 - *Pectoralis profundus* (partie scapulaire)
- 9 - *Pectoralis profundus* (partie sternale)
- 10 - *Transversus abdominis*
- 11 - *Extensor carpi radialis*

résultats apparaissent très variables selon les muscles. Si l'importance relative des divers phénomènes qui interviennent durant le cisaillement était constante, les diagrammes obtenus pour diverses épaisseurs seraient homothétiques et le travail serait proportionnel au carré de l'épaisseur initiale. D'une manière générale cette relation n'est pas vérifiée, sauf dans quelques cas particuliers dont un exemple est donné sur la figure 5c. Les valeurs de W ne peuvent donc être comparées que pour des échantillons présentant des épaisseurs initiales du même ordre.

Au cours de ces expériences, la section initiale moyenne, S_0 , pour chaque échantillon était comprise entre 0,8 et 1 cm. Cette section initiale a été calculée à partir de la masse et de la longueur de l'échantillon, la masse spécifique du milieu musculaire étant égale à 1,06. L'épaisseur initiale était alors comprise entre 0,8 et 1 cm et dans ces conditions la valeur de P est toujours significative, et les valeurs de $\frac{W}{S_0}$ sont, en pratique comparables.

IV - FORCE ET TRAVAIL DE CISAILLEMENT DE DIVERS MUSCLES MATURES

Nous avons mesuré les valeurs de P et de W sur 11 muscles différents prélevés sur de jeunes taurillons âgés de 14 à 16 mois. Les mesures ont été effectuées 4 jours après l'abattage.

Le tableau I indique l'ensemble des résultats obtenus. Il montre que la variabilité de P et de W sur un même muscle est très importante et en moyenne de l'ordre de 15 à 20 %. Cette variabilité semble pouvoir être attribuée à deux causes principales, d'une part, les variations locales de la section de l'échantillon, auquel il est difficile de donner une géométrie très régulière, d'autre part, l'hétérogénéité propre du muscle. Cette dernière cause semble prépondérante.

L'examen de ce tableau montre que les valeurs $\frac{W}{S_0}$ et de P présentent des différences inter-musculaires et entre animaux très importantes. L'étude des diagrammes permet de penser que les variations enregistrées sur P peuvent, pour une large part, être attribuées à des différences des propriétés mécaniques des tissus conjonctifs des divers muscles, ces différences pouvant être à la fois qualitatives et quantitatives. Le travail total W dépend évidemment pour une large part de P, et pour l'autre de l'importance des phénomènes de déformation qui précèdent le cisaillement proprement dit, ces derniers faisant intervenir les propriétés myofibrillaires et les répartitions du conjonctif. Pour deux muscles présentant des forces de cisaillement comparables, les différences dans la valeur de W traduisent donc des différences dans les phénomènes de déformation et d'une façon générale on peut caractériser l'importance relative de cette déformation, par rapport au cisaillement proprement dit par la quantité $\alpha = \frac{W}{P \cdot L}$. La valeur de α est légèrement supérieure à 0,5 tant que les diagrammes présentent un plateau de cisaillement, puis diminue au cours de la maturation, parallèlement à la dégradation des propriétés mécaniques myofibrillaires (VALUN, SALE 1970).

Les valeurs de α pour les différents muscles sont indiquées sur le tableau II. Si l'on considère les valeurs moyennes pour chaque animal, soit respectivement 0,28 ; 0,26 ; 0,30 ; 0,30 ; 0,28 et 0,29, elles présentent des différences relativement faibles. Par contre pour chaque muscle pris individuellement les écarts sont très notables et ne présentent pas de caractère systématique pour un muscle déterminé.

Au cours d'une autre expérience, nous avons déterminé sur les muscles *Longissimus dorsi* et *Pectoralis profundus* sur 15 jeunes taurillons. Nous avons obtenus 7 jours après l'abattage des valeurs moyennes respectivement égales à 0,21 et 0,20 sur ces deux muscles, mais encore avec une dispersion importante voisine de 30 %.

TABLEAU II

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
$\frac{W}{FM}$	1	0,30	0,30	0,26	0,26	0,29	0,19	0,29	0,32	0,31	0,32	0,24
	2	0,20	0,25	0,24	0,37	0,31	0,28	0,23	0,21	0,24	0,23	
	3	0,20	0,37	0,26	0,39	0,30	0,44	0,27	0,32	0,34	0,35	0,25
	4	0,29	0,26	0,27	0,23	0,40	0,36	0,29	0,26	0,24	0,29	0,30
	5	0,23	0,29	0,26	0,26	0,33	0,26	0,29	0,26	0,30	0,29	0,34
	6	0,28	0,30	0,27	0,33	0,29	0,33	0,33	0,30	0,25	0,29	0,25

- 1 *Triceps brachii caput longum*
- 2 *Semi spinalis capitis*
- 3 *Supra spinatus*
- 4 *Latissimus dorsi*
- 5 *Splenius*
- 6 *Rhomboïdeus*

- 7 *Infra spinatus*
- 8 *Pectoralis profundus* (partie scapulaire)
- 9 *Pectoralis profundus* (partie sternale)
- 10 *Transversus abdominis*
- 11 *Extensor carpi radialis*

La valeur moyenne de α , déterminée sur un échantillonnage suffisant de muscles apparaît donc liée au temps post mortem, d'une façon comparable pour les divers animaux, placés dans les conditions post mortem équivalentes. Si les résultats ultérieurs font apparaître que cette relation présente un caractère général, elle permettra de définir une valeur moyenne de α fonction de l'âge post mortem et donc d'un état de maturation. Ceci fournirait un moyen simple et rapide, par la seule détermination de α , pour l'évolution de l'état de maturation d'une carcasse.

Si l'on considère la valeur de α relative à un seul muscle, elle diffère en général d'une façon appréciable de la valeur moyenne, ce que nous interprétons comme une différence dans l'importance relative des phénomènes de déformation et de cisaillement proprement dit. On peut envisager deux causes essentielles à ces différences, soit des différences dans la structure du muscle, une texture plus serrée de la trame de conjonctif conduisant à une valeur plus élevée de W , donc de α , soit une différence dans les propriétés mécaniques des filicux myofibrillaires, qui pourraient être interprétés comme traduisant des stades de maturation différents des divers muscles. Des expériences complémentaires seront nécessaires pour préciser ce dernier point.

Références bibliographique

- SALE P., VALIN C. Problèmes posés par la détermination des modifications de la structure du muscle au cours de la maturation.
16th Europ. Meet. Res. Workers - VARENA - Tome I - 35-44.