

UNIVERSITE DE LIMOGES

Faculté de Pharmacie

ANNEE 1990

THESE N° 214

**FRÉQUENCE CARDIAQUE
ET LACTATÉMIE CHEZ LE CHEVAL
AU COURS D'ÉCHELONS DE COURSE
DE COURTE DURÉE :
enchaînements triangulaires et rectangulaires**

THESE

POUR LE

**DIPLOME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN PHARMACIE**

Présentée et soutenue publiquement le 25 Juin 1990

par

Elisabeth DAURIAC

née le 30 Juillet 1964 à Limoges (Haute-Vienne)

EXAMINATEURS de la THESE

Monsieur le Professeur NICOLAS **PRESIDENT**
Monsieur le Professeur CHASSAIN **JUGE**
Mademoiselle ANTONINI, *Maître de Conférences - P.H.* **JUGE**
Monsieur le Docteur BLANC, *C.H.R. Limoges* **JUGE**

UNIVERSITE DE LIMOGES

FACULTE DE PHARMACIE

- DOYEN de la Faculté : Monsieur le Professeur RABY

- ASSESSEURS : Monsieur le Professeur GHESTEM (1er Assesneur)

Monsieur DREYFUSS, Maître de Conférences

(2ème Assesneur)

PERSONNEL ENSEIGNANT

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

BENEYTOUT Jean-Louis	Biochimie
BERNARD Michel	Physique-Biophysique
BUXERAUD Jacques	Chimie organique, Chimie Thérapeutique
CHULIA Albert	Pharmacognosie
CHULIA Dominique	Pharmacotechnie
DELAGE Christiane	Chimie Générale et Minérale
GALEN François Xavier	Physiologie
GHESTEM Axel	Botanique et Cryptogamie
GUICHARD Claude	Toxicologie
HABRIOUX Gérard	Biochimie Fondamentale
LEFORT des YLOUSES Daniel	Pharmacie Galénique
NICOLAS Jean Albert	Bactériologie et Virologie, Parasitologie
OUDART Nicole	Pharmacodynamie
PENICAUT Bernard	Chimie Analytique et bromatologie
RABY Claude	Pharmacie Chimique et Chimie Organique
TIXIER Marie	Biochimie

SECRETAIRE GENERAL DE LA FACULTE - CHEF DES SERVICES ADMINISTRATIFS

CELS René

A Monsieur le Professeur NICOLAS,
Professeur des Universités de Bactériologie, Virologie,
Parasitologie.

Je tiens à vous remercier de m'avoir fait l'honneur de
présider ce jury, ainsi que de l'enseignement que vous
m'avez prodigué au cours de mes études.

Veillez croire en ma profonde reconnaissance.

A Monsieur le Professeur CHASSAIN,

Professeur des Universités de Physiologie,
Biologiste des Hôpitaux,
Chef de Service.

Je tiens à vous exprimer tous mes remerciements pour tout le temps que vous m'avez consacré et l'aide précieuse que vous m'avez apportée au cours de ce travail.

Veillez croire en mon profond respect.

A Mademoiselle le Docteur ANTONINI,
Maître de conférences des Universités de Physiologie,
Praticien hospitalier.

Vous m'avez toujours accueillie avec beaucoup de
gentillesse et en toutes circonstances.

Votre disponibilité et votre participation active dans cette
étude m'ont beaucoup aidée.

Soyez en remerciée et veuillez croire en toute ma
considération.

A Monsieur le Docteur BLANC,
Praticien hospitalier, Cardiologue,

Vous avez par vos conseils, et avec beaucoup de sympathie
permis toute la partie électrocardiographique de ce travail.

Je vous remercie d'avoir accepté de vous déplacer lors des
tests pratiques à Pompadour, malgré vos charges
médicales.

Soyez assuré de ma gratitude.

A tous ceux qui ont participé à ce travail et qui m'ont aidé dans sa réalisation :

- A Messieurs les responsables des haras de Pompadour.
- A Monsieur B. Clot et son épouse.
- A Monsieur F. Dalmay, assistant ingénieur, pour le tournage du film accompagnant ce travail.
- A Monsieur J. C Herblot du service central photo cinéma CHU Limoges pour le montage de ce film.
- A Monsieur P. Marquet, assistant au laboratoire de physiologie .
- A Monsieur E. Debest, pharmacien.
- A Monsieur P. Villeneuve, pharmacien.
- Aux Techniciens et Aides de laboratoire du service de Physiologie et Exploration Fonctionnelle Respiratoire, pour avoir procédé aux dosages des lactates et à la présentation des résultats.
- Aux Techniciens du service de cardiologie pour l'analyse Holter.
- A Madame M.L Tézé, secrétaire du C.R.M.S, pour l'impression de ce travail.
- A tous les cavaliers ayant participé aux épreuves sur le terrain.

A mon père,

PLAN

INTRODUCTION

I - ELEMENTS INTRODUCTIFS SUR LE METABOLISME DE L'EFFORT

CHEZ LE CHEVAL

1.1. - Métabolisme énergétique de la cellule

1.1.1 - Origine de l'ATP en présence d'oxygène : La voie aérobie

1.1.2 - Origine de l'ATP en l'absence d'oxygène

1.1.2.1 - *Anaérobie alactique*

1.1.2.2 - *Anaérobie lactique*

1.1.3 - Chronologie des évènements métaboliques survenant lors
d'exercices musculaires

1.2 - Données Générales sur le métabolisme des lactates

1.2.1 - Lactatémie de repos

1.2.2 - Métabolisme proprement dit

1.2.2.1 - *Origine et destinée du lactate*

1.2.2.2 - *Les organes producteurs de lactate*

1.2.2.3 - *Les organes consommateurs de lactate*

1.2.2.4 - *Elimination du lactate*

1.2.2.5 - *Renouvellement du lactate*

1.2.2.6 - *Transport du lactate*

1.2.3 - Méthodes de dosage de l'acide lactique

1.2.3.1 - *Méthodes Enzymatiques*

- dosage en présence d'un LDH de levure

- dosage en présence d'une LDH d'origine musculaire

1.2.3.2 - *Méthodes chimiques*

1.2.4 - Variation du lactate en fonction de l'intensité

1.2.5 - Acidose Lactique

II - CONCEPT DE SEUIL

2.1 - Historique

2.2 - Signification

2.3 - Application au cheval

III - NOTION DE PUISSANCE CRITIQUE

3.1 - Travail limite et temps limite au cours d'un exercice musculaire exhaustif

3.2 - Puissances critiques de l'adaptation fonctionnelle et métabolique au cours de l'activité musculaire

3.2.1 - Puissance critique de récupération de la fréquence cardiaque " \dot{W}_{CRfc} " et puissance critique de la lactatémie " \dot{W}_{CRL} " dans le cadre d'un régime discontinu d'exercice musculaire

3.2.2 - Signification biologique de " \dot{W}_{CRfc} " et de " \dot{W}_{CRL} " mesurées dans ces conditions

3.2.3 - Puissance critique de la lactatémie en régime continu d'exercice musculaire

3.2.4 - Signification biologique de \dot{W}_{cL} en régime d'exercice continu

IV - ETUDE EXPERIMENTALE

4.1 - Présentation des chevaux

4.2 - Epreuve d'effort

4.2.1 - Modalités

4.2.2 - Recueil des différents paramètres

4.2.2.1 - *Fréquence cardiaque*

A - Théorie

a) rappels anatomiques

b) technique

- principe de l'ECG

- dérivations électrocardiographiques
- tracé électrocardiographique normal du cheval

c) matériel utilisé

- l'enregistreur
- l'analyseur

B - Pratique

4.2.2.2 - Acide lactique

4.3 - Résultats

4.3.1 - Expression des résultats

4.3.2. - Valeurs numériques

4.3.2.1 - Epreuves triangulaires

- a) valeurs observées et vitesses "seuils" (VS_2 et VS_4)
- b) fréquence cardiaque en fonction de la vitesse de course
- c) lactatémie en fonction de la vitesse de course

4.3.2.2 - Epreuves rectangulaires

- a) Calcul de la vitesse critique Lactate " V_{cL} " et de la lactatémie correspondant à la vitesse critique " L_{Vc} ".
- b) Fréquence cardiaque et vitesse critique " V_{cL} "

4.3.2.3 - Comparaison entre les épreuves d'effort triangulaires et les épreuves d'effort rectangulaires.

- a) VS_4 et V_{cL}
- b) Référence 4 mmol l^{-1} et L_{Vc}
- c) fc_{VS_4} et $fc_{V_{cL}}$

4.3.2.4 - Accroissement de la lactatémie en fonction de la vitesse de course au cours d'échelons carrés indépendants.

V - DISCUSSION

5.1 - Protocole

5.2 - Exploitation des résultats.

CONCLUSION

INTRODUCTION

Jusqu'à présent la plupart des auteurs s'étant intéressés au comportement de la lactatémie chez le cheval, l'ont fait à partir d'épreuves d'effort de type triangulaire : leur but étant d'apprécier l'aptitude physique du cheval à l'effort et surtout de suivre les effets biologiques de son entraînement. Ce fut le cas entre autres, à Limoges, de VILLENEUVE 1986 (77) et AUTEXIER 1989 (5). Il nous a semblé intéressant de poursuivre leurs mesures à partir d'un protocole différent, en régime d'activité physique discontinu constant au cours de plusieurs niveaux de vitesse, ceci à l'image des travaux faits chez l'homme. (CHASSAIN et coll. (22) (23)).

Les essais comparatifs effectués dans ce travail sont constitués d'une épreuve triangulaire (3 galops à vitesse croissante) et de trois épreuves rectangulaires de vitesses différentes; chaque essai respectant de façon stricte les temps d'exercice et les intervalles de repos.

L'épreuve triangulaire est faite en vue de déterminer VS_4 , la vitesse au "seuil anaérobie"; les enchaînements rectangulaires sont faits en vue de permettre le calcul de "VcL", la vitesse de course critique avec détermination de "LVc", la lactatémie correspondant à la vitesse critique observée.

L'intérêt du calcul de "LVc" étant ici la comparaison en regard des 4mmol.l^{-1} de lactate sanguin pris habituellement en référence statistique dans les épreuves triangulaires.

Enfin, l'objectif pratique de ces essais est aussi la recherche d'un test physiologique d'aptitude à la course le plus court et le plus discriminant possible. Une observation de la "différentielle lactate" est faite à l'échelle d'un seul échelon d'exercice indépendant en vue d'établir d'éventuelles corrélations avec les caractéristiques connues des animaux explorés.

I
ELEMENTS INTRODUCTIFS SUR LE
METABOLISME DE L'EFFORT
CHEZ LE CHEVAL

I - ELEMENTS INTRODUCTIFS SUR LE METABOLISME DE L'EFFORT CHEZ LE CHEVAL

1.1 - METABOLISME ENERGETIQUE DE LA CELLULE

L'ATP (adénosine trisphosphate) représente la source énergétique indispensable à la contraction musculaire. Cependant, il ne se trouve qu'en très faible concentration dans le muscle et ne peut donc couvrir que les toutes premières secondes d'un exercice musculaire.

Si l'exercice doit se prolonger, des mécanismes de renouvellement c'est à dire de synthèse d'ATP devront se mettre en route. Parmi ces mécanismes, deux d'entre eux ne requièrent pas la présence d'oxygène (anaérobie) alors que le troisième en est complètement dépendant (aérobie).

1.1.1 - Origine de l'ATP en présence d'O₂ : La voie Aérobie

Dans les mitochondries, en présence d'O₂ le glycogène musculaire (substrat préférentiel) mais aussi les lipides (triglycérides) et à un moindre degré les protéines se dégradent en CO₂ + H₂O + ATP .

La dégradation aérobie du glycogène passe par le pyruvate et le cycle de Krebs.

Cette voie aérobie se divise en trois phases : (28)

- Glycolyse

Le glycogène est dégradé jusqu'au pyruvate qui est alors décarboxylé en acétyl-coenzyme A.

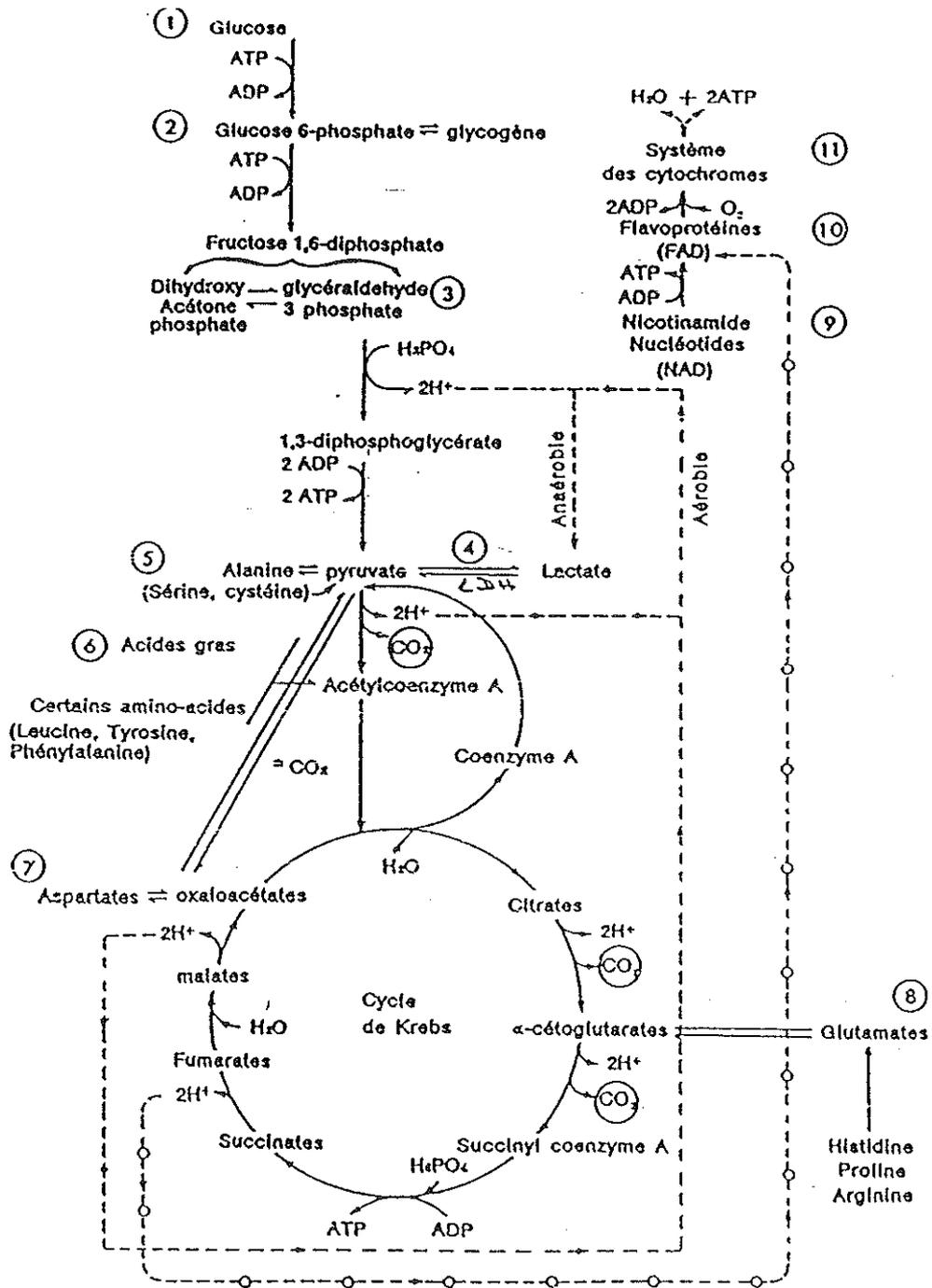


Figure 1 : Voie Aérobie

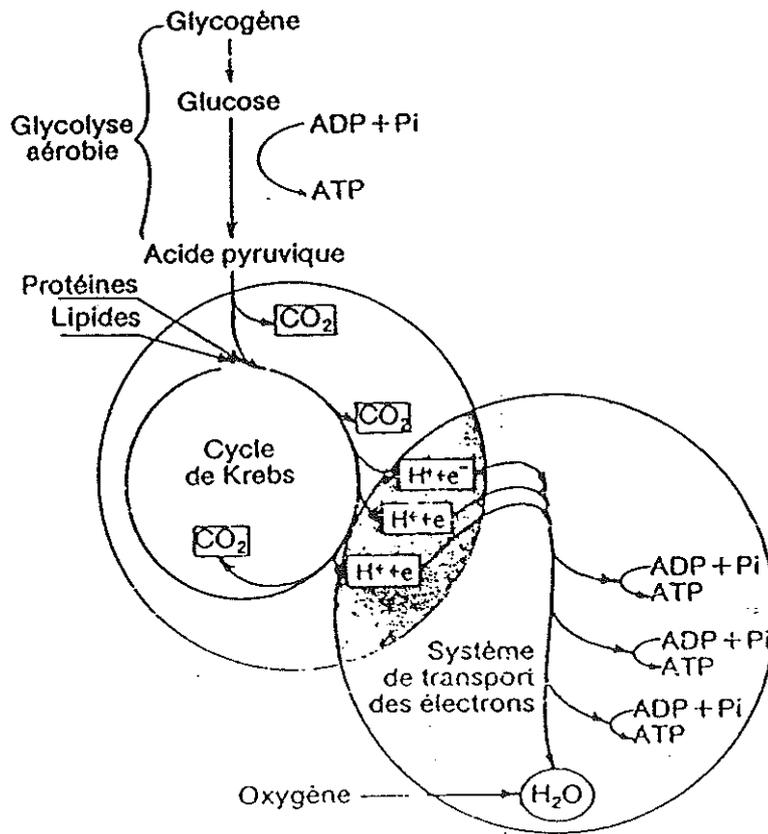


Figure 2 : voie aérobie (résumé)

- Cycle de Krebs

Cet acétyl-co A également fourni par la dégradation des acides gras libres et des acides aminés va être dégradé dans le cycle de Krebs. Ceci permet d'aboutir à la formation de coenzymes réduites (NADH-FADH) et de CO_2 (42)

- oxydation respiratoire

Les coenzymes réduites se réoxydent dans la chaîne respiratoire avec récupération de l'énergie chimique sous forme d'ATP.

Par cette voie, une molécule de glycogène aboutit à la formation de 39 ATP. L' O_2 nécessaire à cette voie est transporté par l'hémoglobine globulaire puis transféré sur la myoglobine musculaire. Cette voie est atoxique puisque l'eau formée est utilisée par la cellule et que le CO_2 diffuse pour être ensuite éliminé par les poumons (24). Ceci constitue une différence fondamentale avec la voie glycolytique anaérobie.

La voie aérobie représente la source d'énergie essentielle pour les efforts durant plus de deux minutes. Il existe un délai de mise en route de plus d'une minute avant qu'elle n'atteigne son fonctionnement optimal. De plus la voie aérobie ne peut fournir l'énergie nécessaire que si l'apport d'oxygène est suffisant.

1.1.2 - Formation d'ATP en l'absence d'oxygène

1.1.2.1 - Anaérobie alactique

La production d'ATP peut se réaliser à partir de la phosphocréatine (PC) qui est alors déphosphorylée en créatine. Ce transfert de groupement phosphate de la créatine sur l'ADP est catalysé par une enzyme cytoplasmique : la créatine phosphokinase.



L'ATP et la PC forment le phosphagène, molécule qui est mobilisable rapidement, particulièrement pour des efforts brefs et brutaux de quelques secondes. Lorsque l'effort intense est prolongé, les besoins en ATP dépassent les réserves sarcoplasmiques provenant de la phosphocréatine (16). Le catabolisme des substrats musculaires (triglycérides, glycogène...) ou sanguins prend le relais et assure le renouvellement en ATP. Il s'effectue selon 2 processus différents. L'importance relative de leur rôle est fonction du type d'exercice et donc du type de fibres musculaires mises en jeu (équipement enzymatique et mitochondrial) (28).

1.1.2.2 - *Anaérobie lactique*

Le glycogène est dépolymérisé en glucose -1P, lui-même dégradé en pyruvate au cours de la glycolyse. Ce pyruvate, sous l'action de la lactate deshydrogénase (LDH), est alors transformé en lactate.

L'énergie libérée participe à la resynthèse de l'ATP mais à un rendement très inférieur à celui du système aérobie. En effet cette phase anaérobie cytoplasmique libère peu d'ATP (3 ATP par molécule de glycogène) (16,24,39).

Au cours de la glycolyse anaérobie, l'acide lactique, en s'accumulant, entraîne une diminution de pH (30) et tente d'inhiber la contraction musculaire. Son accumulation provoque la fatigue musculaire. Il représente donc un facteur limitant dans les exercices intenses et épuisant le sujet à court terme (39).

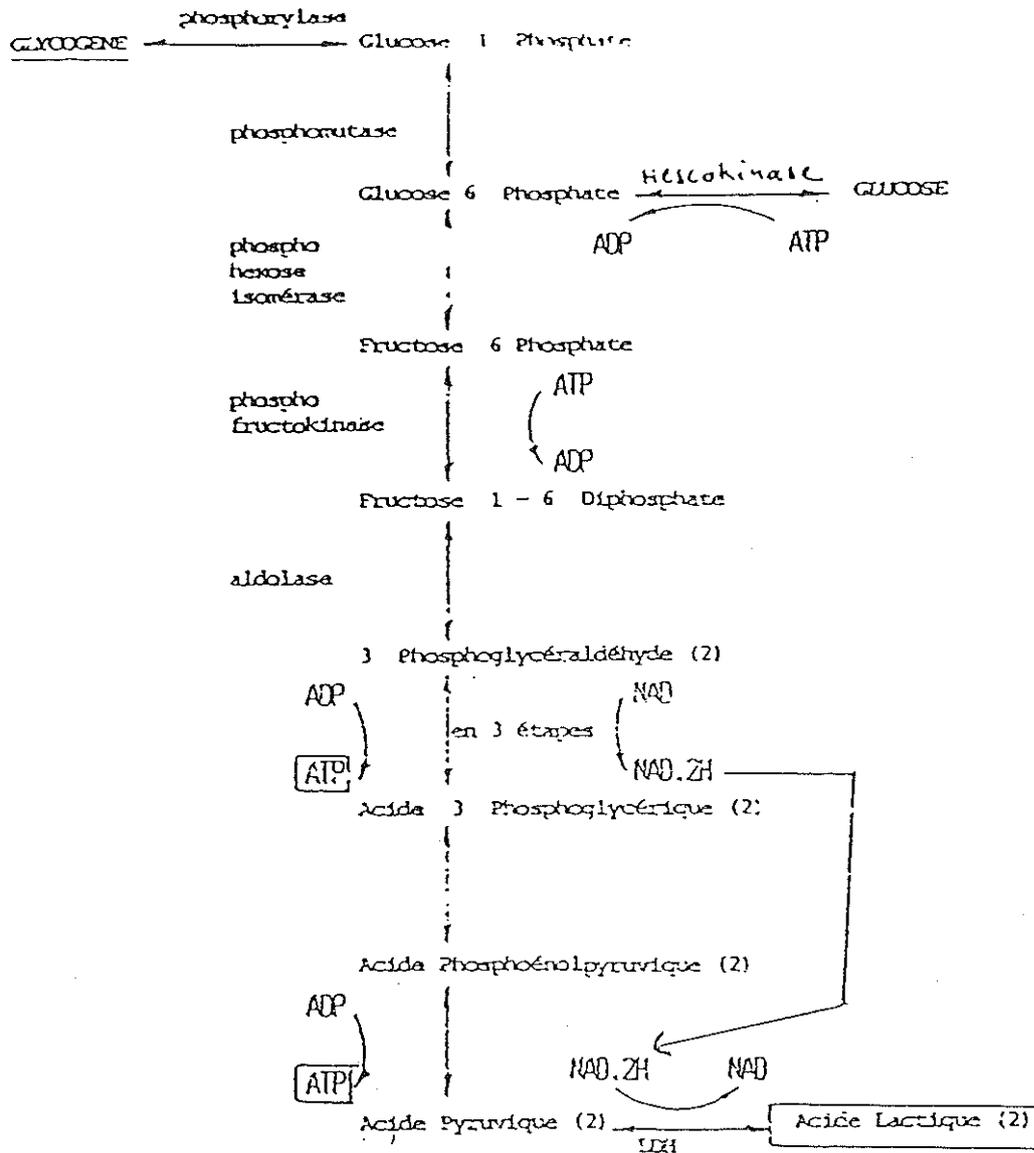


Figure 3 : voie anaérobie lactique

1.1.3 - Chronologie des événements métaboliques survenant lors d'exercices musculaires

Au cours d'exercices intenses, le stock d'ATP est relativement peu modifié car rechargé en permanence au dépend du stock de PC (phospho-créatine) qui lui peut s'épuiser rapidement avec l'intensité. (Les stock d'ATP et PC sont respectivement de l'ordre de 5 mmol.kg^{-1} et 20 mmol.kg^{-1} de muscle frais chez l'homme). (30)

L'abaissement de PC devient alors le facteur limitant principal des épreuves de vitesse.

La diminution de la concentration en ATP (et surtout la diminution du rapport ATP/ADP) et la diminution des réserves de PC stimulent très efficacement la glycolyse.

La glycolyse anaérobie prenant rapidement le relais de l'anaérobiose alactique (dès la 5ème à la 10ème seconde d'exercice) permet le maintien de la contraction musculaire à un haut niveau de puissance pendant une durée voisine de 1-2 minutes (avec un maximum de puissance autour de la 60ème seconde). Le facteur limitant étant alors l'acidose musculaire qui entraîne un blocage progressif de l'activité enzymatique de PFK (phosphofructokinase) avec pour conséquence l'arrêt de la fourniture d'ATP. Le métabolisme aérobie qui se développe progressivement du fait de l'inertie des grands systèmes d'approvisionnement en oxygène, assure en fin de compte, au delà de la 2ème 3ème minute d'exercice, l'essentiel de la fourniture en ATP; la limitation de l'énergétique aérobie étant alors la puissance, celle-ci plafonnant avec VO_2max (puissance aérobie maximale caractéristique de chaque individu).

Les produits terminaux du métabolisme, lors d'un exercice, sont l'eau, le dioxyde de carbone, les ions H^+ et le lactate. Le résultat direct de

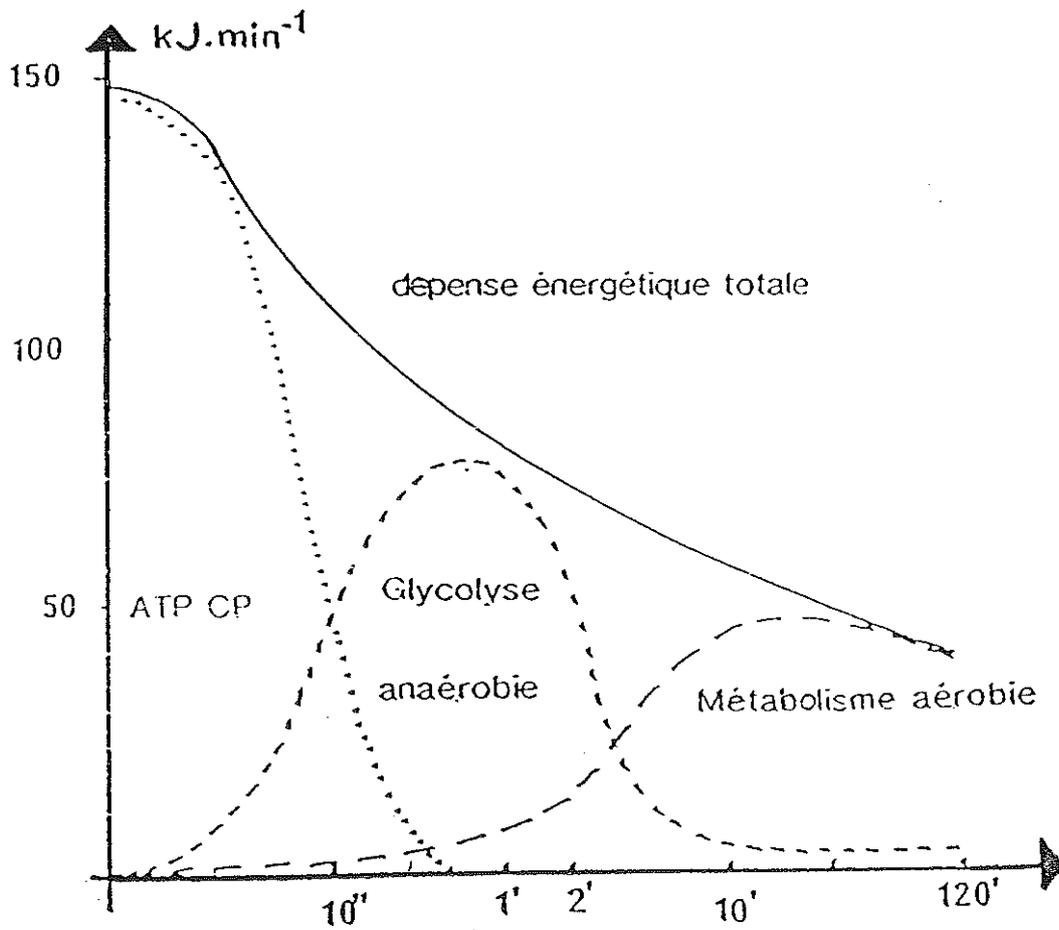


Figure 4 : Mise en jeu de la capacité et de la puissance des métabolismes énergétiques

L'accroissement du niveau métabolique avec l'intensité de l'exercice musculaire est donc, du fait de la participation de plus en plus importante du métabolisme anaérobie, l'apparition et l'accumulation de lactate dans l'organisme et particulièrement dans le muscle et le sang.

Cette accumulation entraînant premièrement dans les exercices intenses une acidose progressive incompatible avec la dégradation glycolytique, deuxièmement dans les exercices de longue durée, un épuisement rapide des réserves glycogéniques musculaires.

1.2 - DONNEES GENERALES SUR LE METABOLISME DES LACTATES

1.2.1 - Lactatémie de repos

De nombreuses études ont porté sur la lactatémie de repos (2,13,43,45,51,54,59,60,75) mais les résultats furent très variables en raison des différentes techniques (mode et heure de prélèvement, méthode de dosage...) et en raison des conditions d'entretien des chevaux (alimentation, environnement, régularité et intensité du travail...).

La grande diversité des valeurs normales de l'acide lactique des chevaux au repos a poussé certains auteurs à déterminer une valeur normale et sa fourchette de variations, ainsi qu'à étudier par sexe, âge et race les variations possibles de cet acide lactique (45).

*** Influence du sexe**

Entre les mâles, les femelles et les hongres, il n'existe pas de différence significative en ce qui concerne la moyenne d'acide lactique (caractère étudié sur une sous population formée de chevaux regroupés par race, quel que soit l'âge) (Tableau II).

AUTEURS	N	Moyenne mMol/l	écart type	valeurs extrêmes	méthodes
ANDERSON et coll.	9	0,60		0,31-1,21	enzymatique
ASHEIM et coll.	10	1,4	0,43	0,4-1,9	BAKER. et SUMMERSON chimique
BERGSTEN		1,65-3,3			
BOST et coll.	16	2,63	0,41		enzymatique
CROMBE	50	1,70		1,25-2,25	
DONAWICK	11	0,81			
FORENBACHER	50	1,56			
KRZYWANEK	154	0,60			enzymatique
LENGRONNE	137	0,45	0,23	0,12-1,50	enzymatique
MOORE et coll.	15	1,025	0,26	0,56-1,52	

Tableau I : Valeurs normales de la lactatémie de repos
d'après différents auteurs.

LENGRONNE 1981.

RACES	HONGRES	FEMELLES	MALES
Selle Français	N = 17 m = 0,52 $\sigma^2 = 0,13$ $\sigma^2 = 0,018$	N = 12 m = 0,50 $\sigma^2 = 0,16$ $\sigma^2 = 0,026$	N = 57 m = 0,39 $\sigma^2 = 0,23$ $\sigma^2 = 0,052$
Trotteur Français	N = 3 m = 0,37	N = 5 m = 0,58	N = 18 m = 0,66 $\sigma^2 = 0,28$ $\sigma^2 = 0,079$
Pur Sang Anglais	N = 1 0,38	N = 1 0,48	N = 14 m = 0,27 $\sigma^2 = 0,10$ $\sigma^2 = 0,01$

Tableau II : Influence du sexe.
D'après LENGRONNE 1981

*** Influence de l'âge**

Ce caractère a été étudié à l'intérieur d'une même race, le Selle Français. Il semble, d'après la courbe (fig.5), qu'il n'y ait pas de relation entre l'acide lactique et l'âge des chevaux.

*** Influence de la race**

Le caractère race a été analysé quel que soit le sexe et quel que soit l'âge des chevaux, puisqu'ils n'interviennent pas sur les moyennes d'acide lactique.

On note ici l'existence significative de sous population selon la race. (tabl.III)

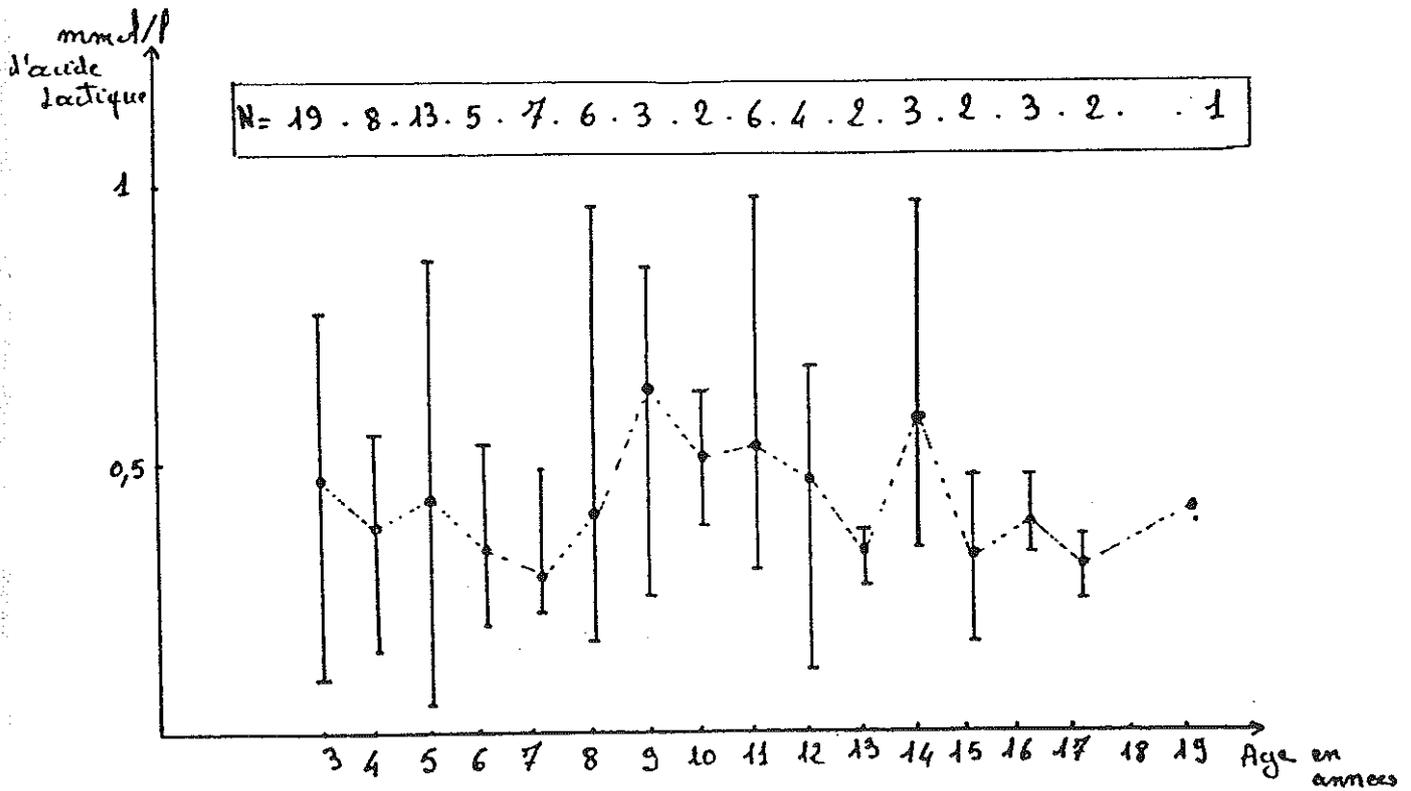
*** Variations individuelles**

Des prises de sang ont été effectuées sur des chevaux à quelques mois d'intervalle, dans les mêmes conditions d'environnement et à des heures sensiblement égales. Les variations individuelles semblent importantes et imprévisibles. (fig.6)

*** Corrélations à d'autres paramètres sanguins**

LENGRONNE (45) a fait sur 53 chevaux des numérations sanguines en même temps que les dosages d'acide lactique dans le but de trouver une corrélation entre les taux d'acide lactique et les valeurs de l'hémoglobine, du nombre de globules rouges et du taux globulaire moyen TGM.

Conclusion : il y a indépendance des caractères étudiés.



Age	N	m	Age	N	m
3	19	0,47	11	6	0,53
4	8	0,38	12	4	0,47
5	13	0,43	13	2	0,34
6	5	0,34	14	3	0,59
7	7	0,29	15	2	0,32
8	6	0,41	16	3	0,39
9	3	0,64	17	2	0,31
10	2	0,51	19	1	0,42

Figure 5 : Influence de l'âge.

D'après LENGRONNE 1981.

RACES	HONGRES	FEMELLES	MALES	POPULATION TOTALt
Selle Français	N=17 m=0,52 $\sigma=0,13$ $\sigma^2=0,018$	N=12 m=0,50 $\sigma=0,16$ $\sigma^2=0,026$	N=57 m=0,39 $\sigma=0,23$ $\sigma^2=0,052$	N=86 m=0,43 $\sigma=0,21$ $\sigma^2=0,044$
Trotteur Français	N=3 m=0,37	N=5 m=0,58	N=18 m=0,66 $\sigma=0,28$ $\sigma^2=0,079$	N=26 m=0,61 $\sigma=0,26$ $\sigma^2=0,068$
Pur Sang Anglais	N=1 0,38	N=1 0,48	N=14 m=0,27 $\sigma=0,10$ $\sigma^2=0,01$	N=16 m=0,29 $\sigma=0,11$ $\sigma^2=0,012$
Anglo- Arabe			N=2 0,27	
Poney			N=6 m=1,09	
Trait Percheron			N=8 m=0,78	
Cob			N=46 m=0,75 $\sigma=0,178$ $\sigma^2=0,032$	

Tableau III : Influence de la race.

D'après LENGRONNE 1981.

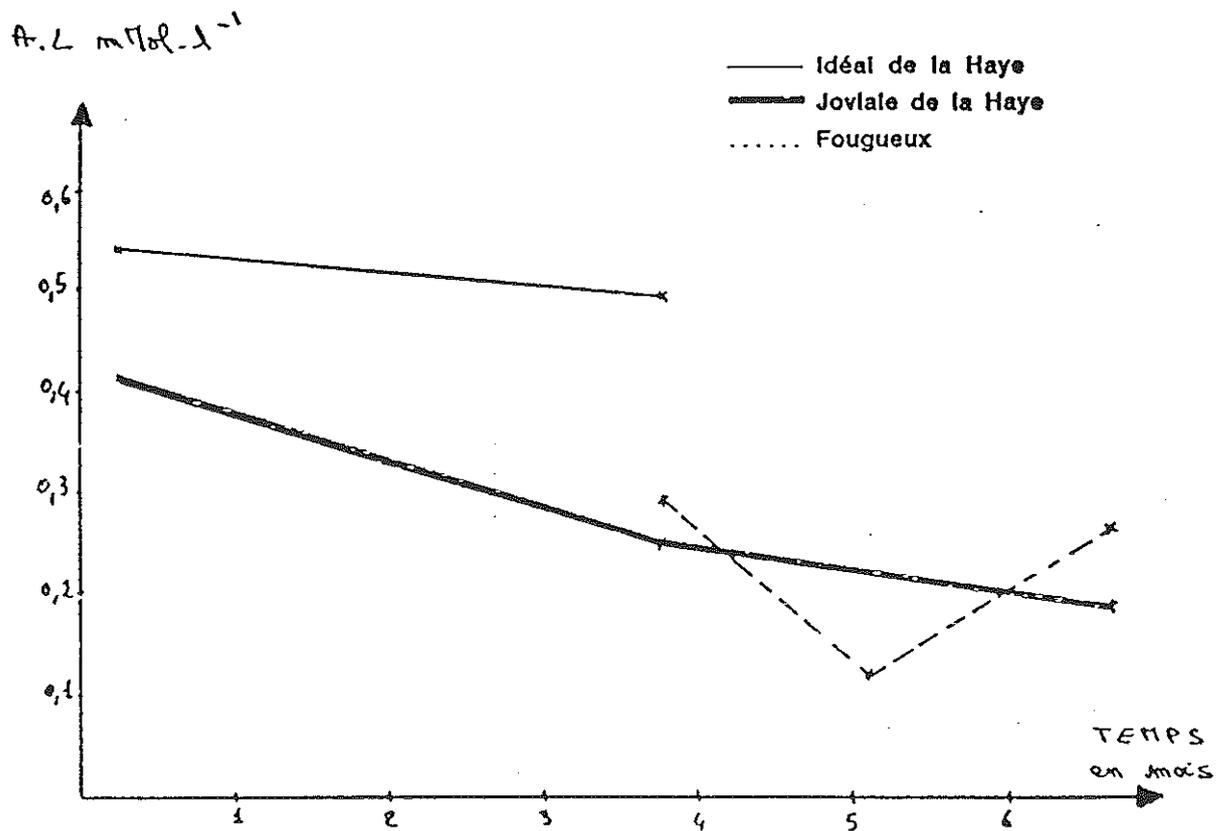


Figure 6 : Courbes de variations individuelles de la lactatémie.

D'après LENGRONNE en 1981.

1.2.2 - Métabolisme proprement dit

1.2.2.1 - *Origine et destinée du lactate*

Les voies métaboliques, la glycolyse et l'oxydation sont respectivement l'origine (à partir du glycogène et du glucose) et la destinée (par la gluconéogénèse) du lactate.

La destinée métabolique du lactate est donc à la fois anabolique (transformation en glucose = gluconéogénèse) et oxydative (transformation en CO_2).

La première réaction commune à ces deux destinées, est la transformation en pyruvate catalysée par la lacticodéshydrogénase ou LDH.

Nous allons étudier cette enzyme ainsi que ces deux voies prépondérantes dans l'élimination de l'acide lactique.

*** la LDH**

Cette enzyme se retrouve principalement au niveau du coeur et du muscle squelettique mais aussi au niveau du rein et du foie.

C'est une enzyme cytoplasmique, catalysant la réaction d'oxydoréduction permettant le passage de l'acide pyruvique en acide lactique. Cette réaction constitue la dernière étape de la glycolyse. Etant réversible, le foie récupère de l'acide pyruvique par la réaction inverse. Cette enzyme possède 2 sortes de sous-unités M et H, qui par différentes associations définissent cinq types d'isoenzymes :

. LDH₁ (H₄) dans le coeur et les erythrocytes

. LDH ₂ (MH ₃)	}	dans le coeur
. LDH ₃ (M ₂ H ₂)		
. LDH ₄ (M ₃ H)	}	au niveau du foie et des muscles squelettiques
. LDH ₅ (M ₄)		

Ces isoenzymes sont séparés par électrophorèse et le dosage de la LDH se fait par la spectrométrie d'absorption moléculaire.

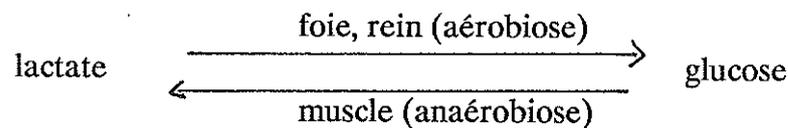
L'isoenzyme H et de la LDH permet d'oxyder le lactate. Cette dernière diffère de la LDH M par la rapidité de réduction du pyruvate en lactate. De plus, la forme H est inhibée par une faible concentration de pyruvate. On peut émettre l'hypothèse que la forme dominante de l'isoenzyme LDH H favorise l'oxydation du lactate dans le coeur. L'isoenzyme LDH M, prédominant dans les muscles squelettiques favorise la réduction du pyruvate.

* Transformation oxydative

L'oxydation du lactate représenterait une source importante d'énergie pour les fibres des muscles striés volontaires en activité et du coeur caractérisées par un métabolisme aérobie dominant. Cette voie est la principale voie d'élimination de l'acide lactique. Elle représente environ 50 à 90 % du renouvellement plasmatique.

*** Transformation en glucose.**

Par cette voie, il y a transformation du lactate en pyruvate, puis en glucose (glucogénèse par le cycle de CORI) et en lipides (voie mal connue).



Cette transformation nécessite la présence d'une enzyme la fructose di-phosphatase qui catalyse le passage du fructose 1,6 di-phosphate en fructose 6 phosphate.

On trouve cette enzyme essentiellement au niveau du foie et du rein, mais il semblerait qu'on la rencontre également dans le muscle squelettique.(42)

HERMANSEN (31) a estimé qu'une partie du lactate produit au niveau musculaire servait à la synthèse de glycogène in situ. De plus rappelons que le muscle du cheval se différencie du muscle humain par une très forte teneur en glycogène (SNOW et coll.1985) (73)

Quoiqu'il en soit la gluconéogénèse ne représente chez l'homme que 10 à 30 % dans l'élimination de l'acide lactique.

1.2.2.2 - Les organes producteurs de lactate

Les principaux organes producteurs de lactate sont :

- Les érythrocytes
- Les leucocytes
- Le cerveau
- Les muscles squelettiques fournissant au repos 35 p100 du

lactate sanguin.

a) Rappel de la structure du muscle strié squelettique

Le tissu musculaire strié est composé de différents éléments :

- les cellules ou "fibres musculaires" multinuclées impliquées dans la contraction.
- les cellules satellites, rares, mononuclées
- les fibroblastes et fibres de collagène et de réticuline composant la charpente conjonctive.

*** structure de la fibre musculaire**

La cellule musculaire possède plusieurs éléments caractéristiques, en particulier les myofibrilles, protéines contractiles, formées chacune par la répétition d'un même motif structural : le sarcomère. Chaque myofibrille est constituée de deux types de microfilaments : les filaments fins (actine) et les filaments épais (myosine). Le mouvement des filaments fins par rapport aux filaments épais est à l'origine de la contraction musculaire et nécessite de l'énergie sous forme d'ATP.

*** Différents types de fibres musculaires**

Il existe, à l'intérieur d'un même muscle, différents types de fibres qui ont un métabolisme énergétique et une rapidité de contraction particulière. (50, 62) (fig.7)

- Fibres de type I

Appelées encore fibres ST (Slow Twitch), rouges.

Elles sont à contraction lente, contiennent de nombreuses mitochondries de grande taille, le métabolisme aérobie y est prépondérant.

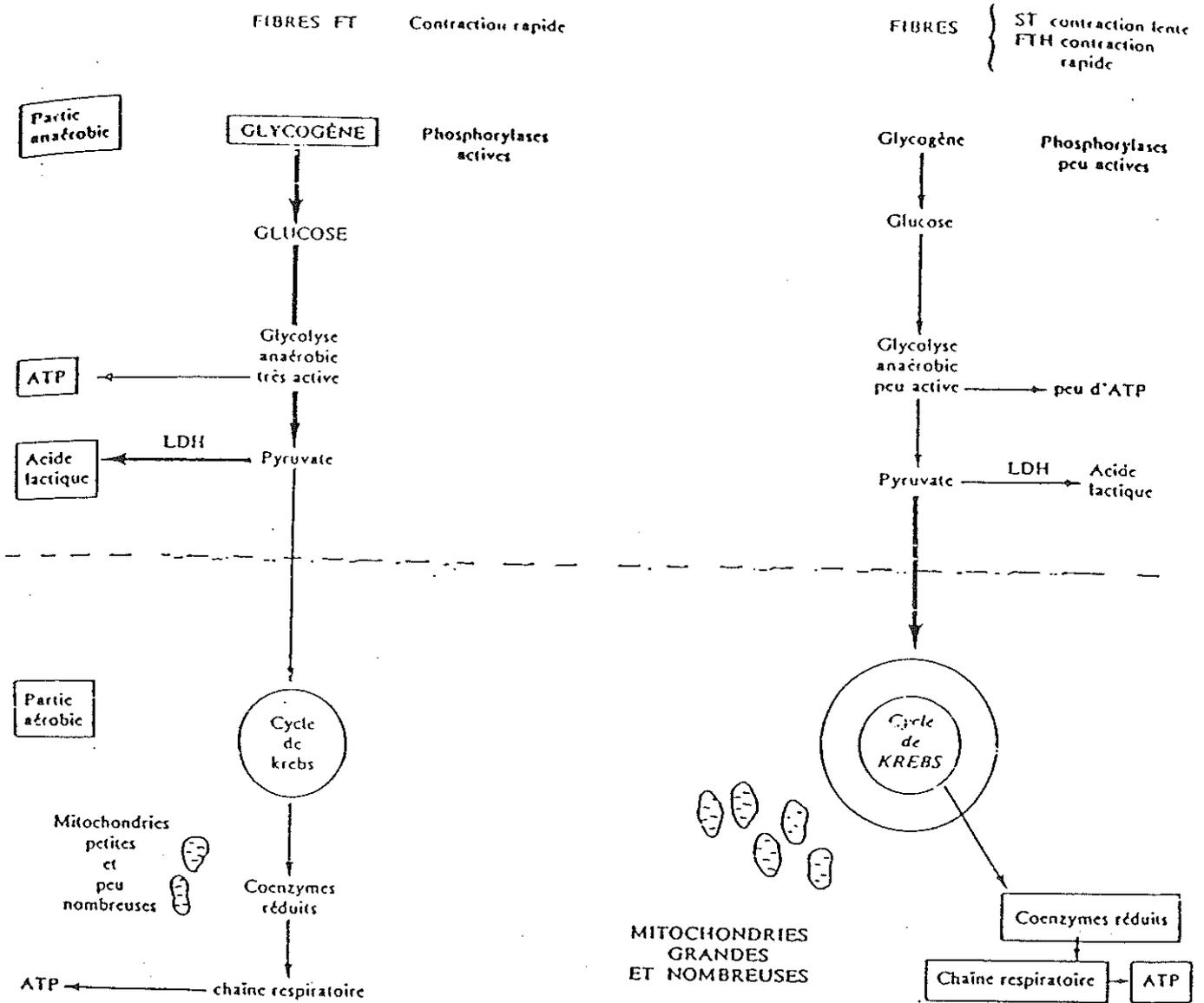


Figure 7 : Schéma du métabolisme des fibres FT, ST et FTH.

D'après MOUTHON 1979.

- Fibres de type II

Elles sont de deux types :

. Type II_A ou FT (Fast Twitch), blanches, à contraction rapide.

Elles sont riches en glycogène. Le métabolisme anaérobie y domine du fait de la petite taille et du faible nombre de mitochondries.

. Type II_B ou FTH (Fast Twitch High oxydative) ou fibres intermédiaires car elles sont à contraction rapide et à haut pouvoir oxydatif.

Elles possèdent de nombreuses mitochondries.

*** Aspects particuliers du muscle équin.**

Le tissu musculaire du cheval est constitué, comme chez la plupart des mammifères, des trois types de fibres précédemment citées disposées en mosaïque. Mais chez le cheval les fibres qui dominent sont du type FTH c'est à dire fibres à contraction rapide et à haut pouvoir oxydatif (52, 60, 61, 62, 63). Le muscle du cheval se différencie du muscle humain par une très forte teneur en glycogène et une forte capacité à utiliser les triglycérides.

b) Rôle des différents types de fibres musculaires

Les fibres glycolytiques de type IIa et IIb, mises en jeu dans les premières minutes de l'exercice seraient relayées par les fibres de type I oxydatives (MOLE 1983) (55). Cependant d'autres auteurs ne considèrent aucune différence majeure entre la concentration de lactate des fibres I et II, ceci au repos, après un exercice modéré, soutenu et intense. Les deux types de fibres

contribueraient à la contraction musculaire à chaque instant de l'exercice et quel que soit son intensité (IVY et coll. 1987) (34).

c) Muscle strié squelettique et lactatémie

Lors de l'exercice, la lactatémie devient plus importante car le muscle squelettique présente d'énormes possibilités de production (45).

SAIBENE et coll. en 1985 (67) trouvent, après trois galops à vitesse maximale, une vitesse de production de lactate autour de 35 mmol.l⁻¹.min⁻¹, valeurs qui ont été retrouvées chez les sprinters.

Mais pendant l'effort, les différents muscles ne travaillent pas avec la même intensité, donc la lactatémie ne peut être qu'un reflet global de l'activité musculaire. Ceci est d'autant plus vrai, que pour chaque muscle, certaines fibres produisent du lactate (fibres FT) alors que d'autres en consomment (fibres ST).

1.2.2.3 - *Les organes consommateurs de lactate*

Comme nous l'avons expliqué, le foie par le cycle du glucose et de l'acide lactique (cycle de Cori) est un consommateur net de lactate en condition normale d'oxygénation. Dans ce cycle, le lactate, produit final de la glycolyse anaérobie et de la glycogénolyse musculaire, est transporté par le sang efferent puis capté ensuite par le foie, transformé en glucose qui peut de nouveau être utilisé par les tissus.

Le coeur, consommateur net de lactate est riche en isoenzyme H de la LDH permettant d'oxyder le lactate. Les muscles squelettiques sont le siège d'une glycolyse importante.

1.2.2.4 - *Elimination du lactate*

En dehors de ses deux principales destinées qui sont, comme nous l'avons vu précédemment, l'oxydation et la transformation en glucose et en glycogène, le lactate peut subir deux autres sorts :

*** *l'excrétion dans l'urine et la sueur***

L'élimination du lactate par le rein est négligeable. La présence de lactate dans la sueur ne correspond pas à un processus d'élimination mais est la conséquence du métabolisme local des glandes sudoripares.

Il sera nécessaire de nettoyer soigneusement l'endroit où est effectué le prélèvement pour éviter des erreurs de résultat.

*** *conversion en protéine***

Seule une faible partie de l'acide lactique est convertie en protéines au cours de la récupération.

1.2.2.5 - *Renouvellement du lactate*

Cette grandeur permet de rendre compte des échanges entre les organes producteurs et les organes responsables du catabolisme ou de l'élimination de l'acide lactique.

Nous avons vu que la destinée du lactate produit, consistait essentiellement en sa transformation en pyruvate par la LDH. Le pyruvate, lui peut s'engager dans plusieurs autres voies (fig.8) (69).

Le lactate est un substrat énergétique d'attente lorsque le pyruvate formé ne peut être totalement utilisé dans le cycle de Krebs.

Par contre si la demande énergétique des tissus augmente, en présence d'O₂, l'équilibre se déplace dans le sens lactate pyruvate.

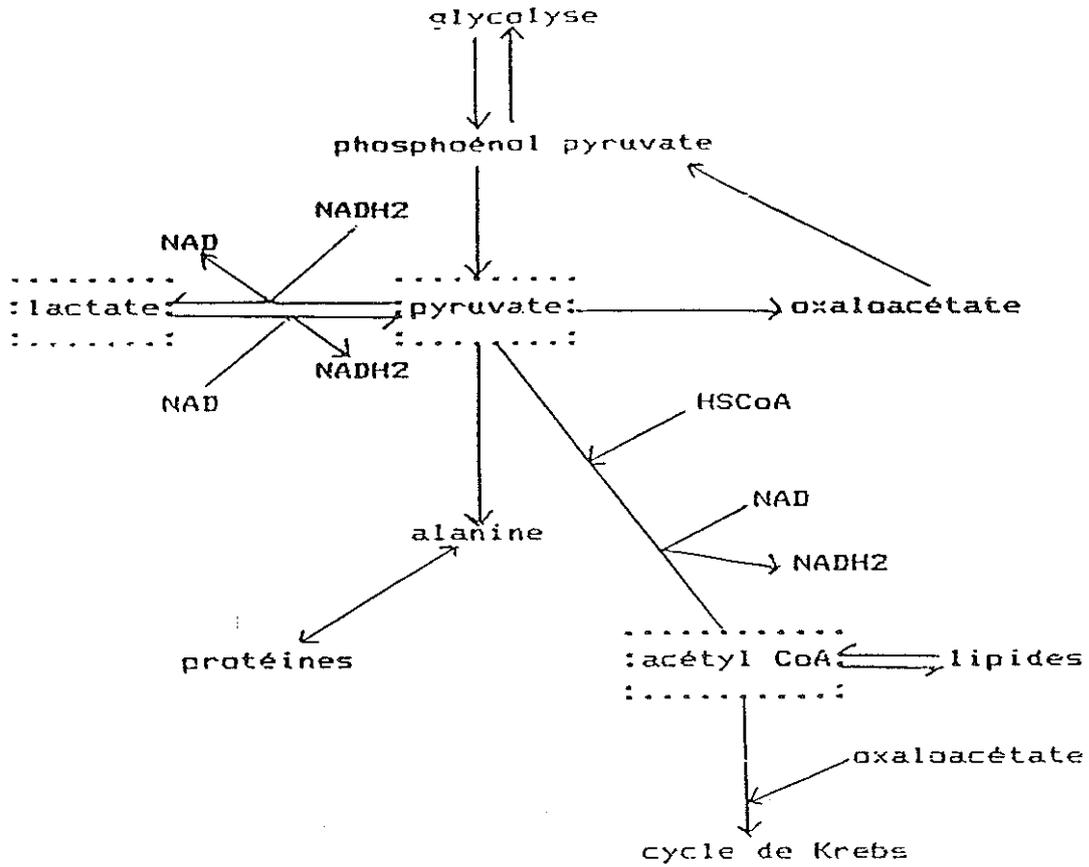


Figure 8 : Destinées métaboliques du pyruvate.
D'après SEGURA 1981.

1.2.2.6 - *Transport du lactate*

Reste actuellement posé le problème du transport du lactate.

Il semblerait que celui-ci diffuse passivement mais qu'il soit également transporté par des vecteurs. (FISHBEIN W.N 1986)
(27)

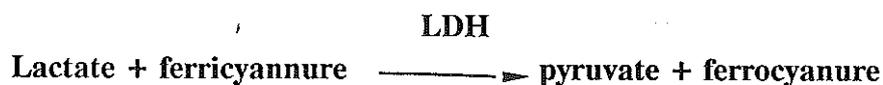
1.2.3 - Méthodes de dosage de l'acide lactique

1.2.3.1 *Méthodes enzymatiques*

Ce sont les plus utilisées à l'heure actuelle. Le schéma général de la réaction est le même pour toutes ces méthodes. L'oxydation du lactate en pyruvate est catalysée par une LDH (lacticodéshydrogénase) provenant de levure ou extraite d'un muscle squelettique de lapin ou de myocarde de boeuf (7,9,14,64,66).

a - Dosage en présence d'une LDH de levure

On étudie la réduction concomitante du ferricyanure en ferrocyanure qui est ensuite dosé par électrochimie ou photométrie.



* Dosage électrochimique

L'électrode de référence est une électrode au calomel saturée. L'électrode indicatrice est recouverte d'une membrane semi-perméable. La chambre réactionnelle est représentée par le faible volume entre l'électrode et la membrane. Au voisinage de la membrane est placée l'électrode de référence, électrode par rapport à laquelle sont exprimés les potentiels.

Un potentiomètre régule le potentiel de l'électrode indicatrice par rapport à l'électrode de référence lorsque les composés de la réaction sont mis en présence. Un galvanomètre mesure l'intensité du courant d'électrolyse et est placé en série dans le circuit de l'électrode auxiliaire. L'intensité du courant indiquée par le galvanomètre est directement proportionnelle à la concentration du lactate de l'échantillon.

Le ferrocyanure formé est oxydé électrochimiquement avec libération d'un électron.

Cette méthode donne des résultats immédiats (4 minutes) car le dosage se fait à l'unité.

L'inconvénient est la conservation du dosage limitée à quelques minutes.

***Dosage photométrique**

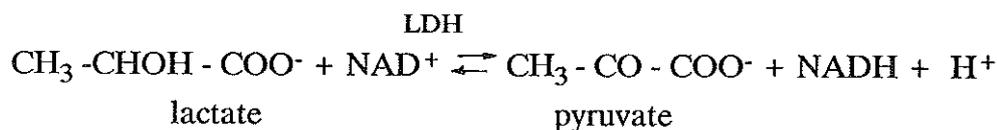
La réaction se fait spontanément dans le sens lactate \rightarrow pyruvate du fait du potentiel élevé d'oxydo-réduction du couple ferri/ferro.

La mesure de la concentration en lactate est basée sur la détermination de la concentration en ferrocyanure par la lecture photométrique à 420 nm.

Ce dosage peut s'effectuer dans un intervalle de huit jours lorsque le prélèvement, centrifugé et décanté, a été conservé à 4°. Ici le dosage ne se fait plus à l'unité mais se fait sur de grandes séries, les résultats ne sont donc pas immédiats.

De plus la méthode électrochimique a une précision égale à la méthode photométrique.

b - Dosage en présence d'une LDH d'origine musculaire



On étudie la réduction concomitante du NAD^+ , NADH , H^+ .

Le NADH , H^+ formé est ensuite dosé principalement par spectrométrie.

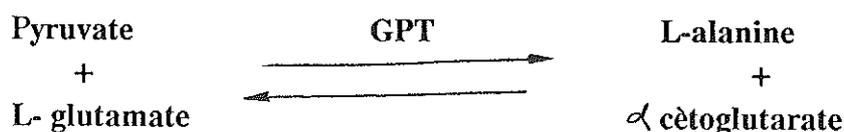
Pour modifier la constante d'équilibre et donc favoriser l'oxydation du lactate en pyruvate, la réaction doit se dérouler en milieu alcalin et le pyruvate formé doit être bloqué par l'hydrazine (technique de HOHORST (32)) ou transformé par une réaction enzymatique.

Le lactate formé est alors considéré comme entièrement oxydé et la quantité consommée est proportionnelle à la quantité de coenzyme réduit.

Il suffit alors de déterminer la quantité de NADH_2 formé par mesure spectrophotométrique à 340 - 365 nm pour connaître la quantité de lactate dans l'échantillon.

*** Cas particulier de la technique bi-enzymatique**

Elle consiste en une transamination du pyruvate formé avec du L-glutamate. La GPT (Glutamate Pyruvate Transaminase) catalyse la réaction. (technique de NOLL) (64).



A des PH supérieurs à 9, on considère que le lactate est entièrement oxydé, avec formation de NADH_2 , dosé ensuite.

1.2.3.2 - Méthodes chimiques

Elles utilisent la réaction de DENIGES, à savoir, la transformation oxydative de l'acide lactique en acétaldéhyde par chauffage en présence d'acide sulfurique.



L'acétaldéhyde peut être dosée par iodométrie, photométrie ou chromatographie en phase gazeuse. Une oxydation plus poussée favorise la formation d'oxyde de carbone, celui-ci étant alors dosé par des méthodes classiques.

Ces types de dosages sont en général peu employés actuellement car manquent de spécificité (des corps comme l'acide hydroxybutyrique, l'acide pyruvique, l'acide malique étant capable de donner l'acétaldéhyde), seule la méthode de BARKER et SUMMERSON (6 bis) où l'on dose l'acétaldéhyde formée par photométrie, demeure utilisée dans certains laboratoires.

Ceci explique, qu'à l'heure actuelle, la préférence va aux méthodes enzymatiques qui sont plus spécifiques, plus sensibles, et plus rapides. (LUNDHOLM L. et coll.1963) (49)

1.2.4 - Variation du lactate en fonction de l'intensité

Nous allons dans ce paragraphe étudier les variations chez l'homme, aucun travail suffisamment complet n'ayant été à notre connaissance, réalisé chez le cheval.

En effet le métabolisme anaérobie lactique est mis en jeu au cours de tout exercice musculaire :

- soit au début de l'exercice, même de très faible intensité, du fait de l'inertie du métabolisme aérobie.
- soit tout au long de l'exercice, lorsque celui-ci devient suffisamment intense ou que les possibilités du système aérobie sont dépassées.

. On définit comme lactate "précoce" (CERRETELLI (18)) le lactate fourni au début de l'exercice lorsque le système anaérobie alactique s'épuise et que le système aérobie ne peut répondre complètement à la demande.

. Lorsque l'exercice physique est modéré, le mécanisme oxydatif peut utiliser comme substrat le lactate "précoce" et la cellule travaille alors "sans accumulation de lactate". Mais si l'exercice est intense le lactate ne peut être métabolisé et la cellule travaille alors "avec accumulation de lactate".

La figure 9 montre ces variations du lactate en fonction de l'intensité (JORFELDT et coll 1978) (37)

1.2.5 - L'acidose lactique

1.2.5.1 - *Données de base*

L'ion lactate, comme cela a été vu précédemment, est un anion normal du plasma dont la concentration est faible. Son rôle est donc négligeable sur le plan acido-basique.

Mais son augmentation au cours de l'exercice musculaire va engendrer des modifications du profil acido-basique en créant une acidose métabolique avec mise en route d'une compensation ventilatoire.

Cette acidose se caractérise par :

- * une accumulation de lactate au niveau du muscle dont une partie diffuse dans le sang.

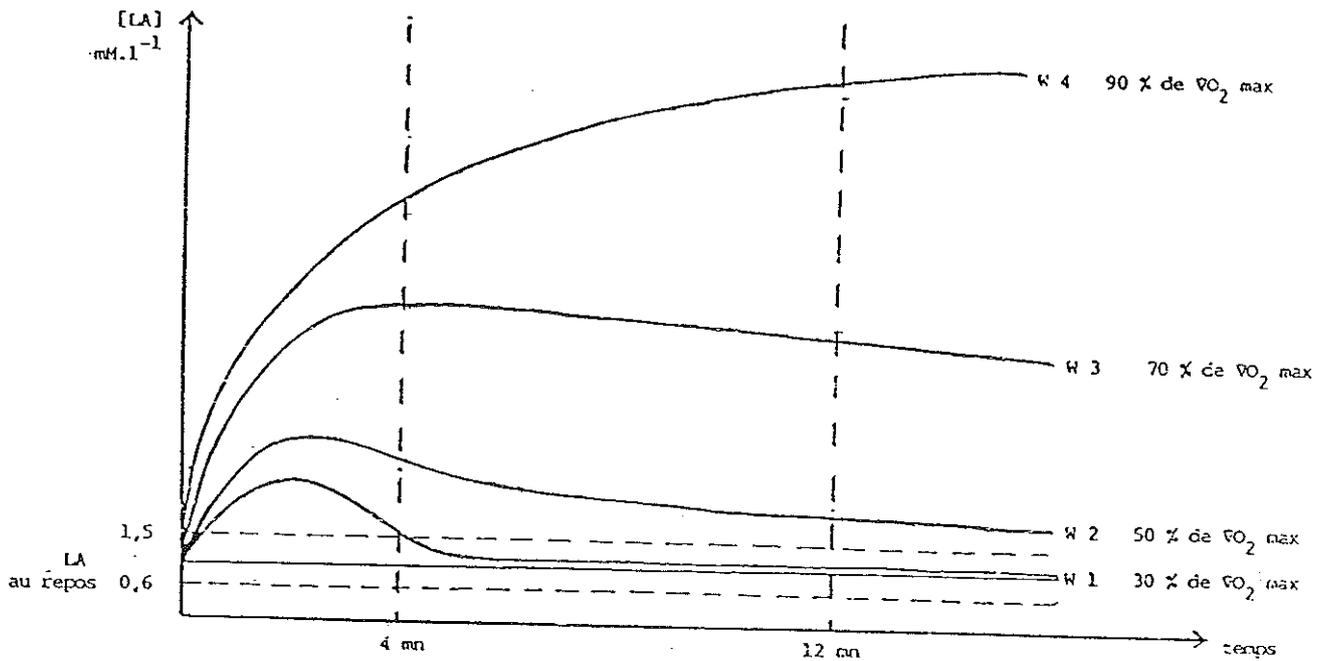


Figure 9 : Schéma de l'évolution du lactate veineux en fonction du temps pour quatre créneaux de puissance de travail.

D'après JORFELDT 1978.

* une chute des bicarbonates musculaires et plasmatiques par neutralisation, grâce à ces systèmes tampons, des ions H^+ produits par l'acide lactique.

* une production d'acide carbonique qui, immédiatement transformé en gaz carbonique, est éliminé par le poumon. Ceci constitue le premier facteur atténuateur de la déviation du pH, le facteur essentiel de la régulation du pH plasmatique étant le tampon acide carbonique-bicarbonate.

Au repos comme à l'effort, l'acidose métabolique se compense donc plus ou moins complètement par une alcalose ventilatoire.

Cette compensation ventilatoire est immédiate car la baisse du pH stimule le centre respiratoire bulbaire qui déclenche une hyperventilation et la $Pa\ CO_2$ diminue.

Ainsi si la ventilation augmente au cours de l'exercice musculaire c'est :

- pour assurer un apport d'oxygène suffisant aux muscles qui travaillent et éliminer le CO_2 métabolique.
- mais aussi pour limiter l'acidose métabolique. (fig.10 DAVENPORT)

1.2.5.2 - *Faits expérimentaux*

L'équilibre acido-basique a été étudié par de nombreux auteurs au cours d'exercices intenses et de courte durée donc, mettant en jeu le métabolisme anaérobie.

* chez le cheval, PANNDORF en 1980 (65) retrouve par répétition de galops à vitesse maximale un effet accumulatif des lactates avec acidose métabolique.

* KRZYWANEK en 1974 (43) vérifie chez le trotteur, une relation linéaire entre l'augmentation des lactates et la diminution du pH du sang toujours pour des exercices intenses de courte durée. (fig11).

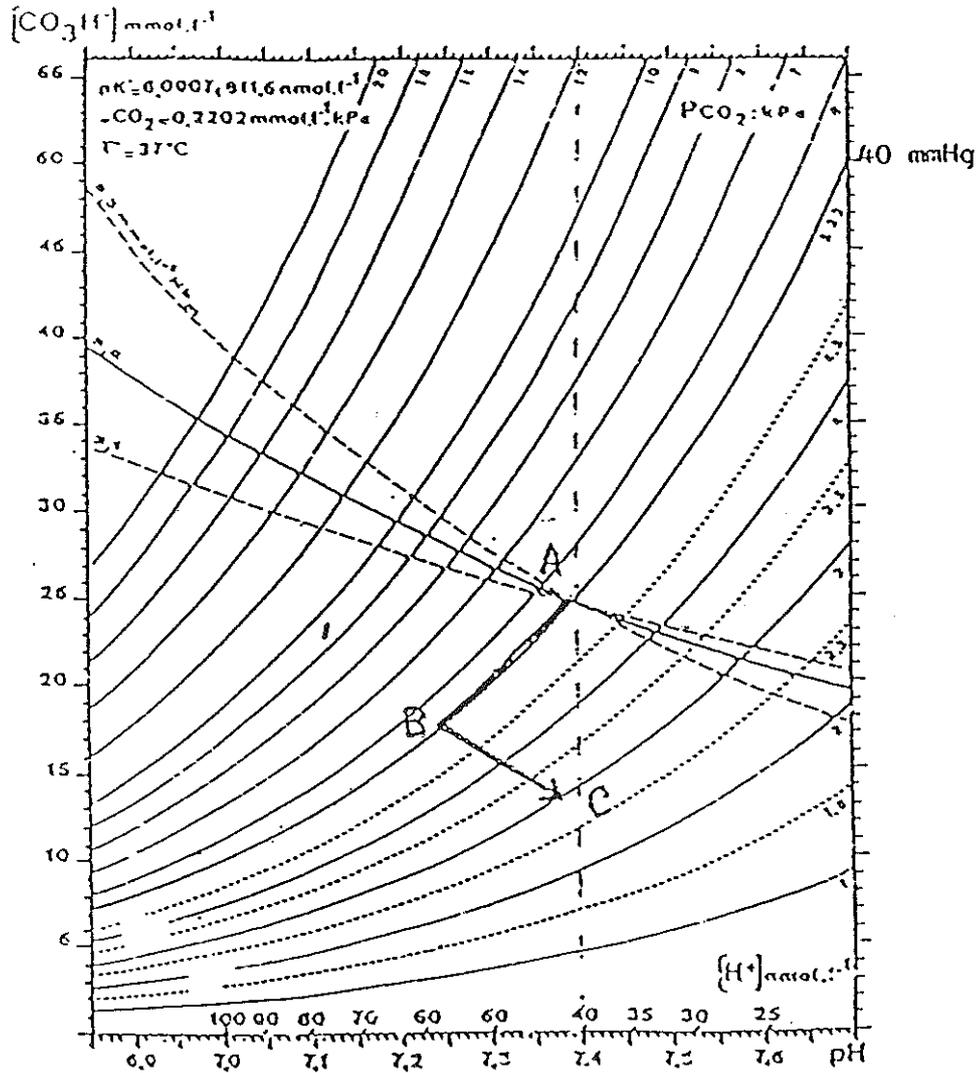


Figure 10 : Utilisation du schéma de DAVENPORT lors des modifications de l'équilibre acido-basique pendant l'exercice musculaire. Le sang artériel prélevé au repos est défini par le point A. En cours d'exercice, il est défini par le point C : résultant d'une acidose métabolique (AB) et d'une alcalose respiratoire de compensation (BC). L'acidose métabolique est due à la diminution des bicarbonates, mais elle est partiellement compensée par une alcalose ventilatoire (diminution de la PaCO₂)

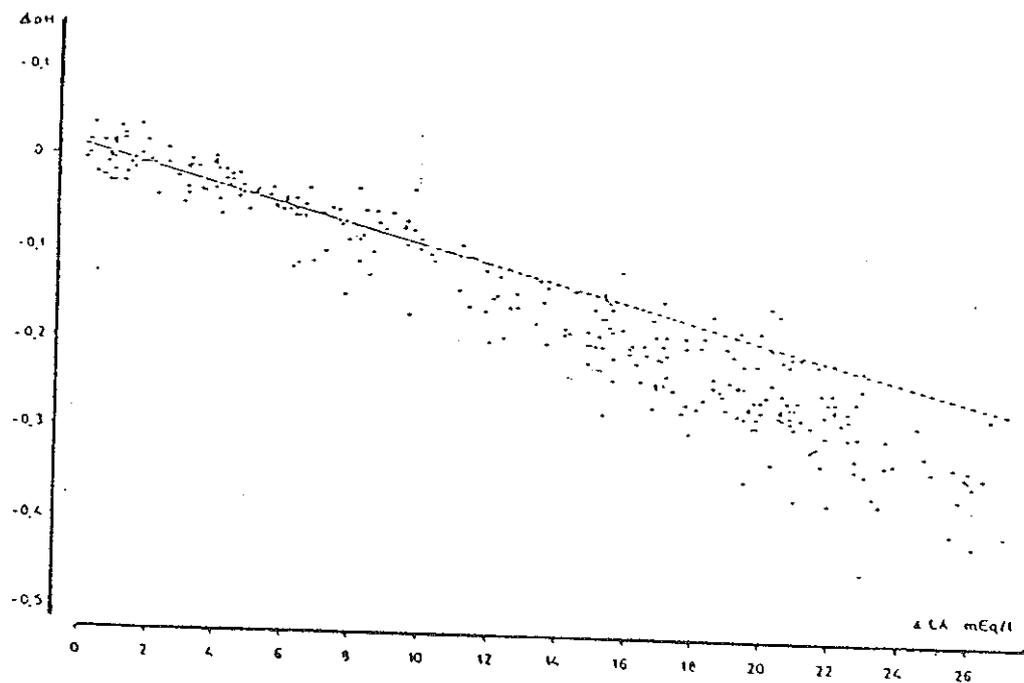


Figure 11 : Relation entre la variation de PH et la concentration des lactates chez le cheval.
D'après KRZYZWANEK 1974.
(Différence entre repos et fin de course).

De nombreuses études ont montré que l'équilibre acido-basique du sang ne reflète qu'imparfaitement celui du muscle (31,44).

JEFFCOTT et coll. en 1982 (36) ont étudié l'effet de l'acidose au niveau musculaire, en injectant en intramusculaire des solutions concentrées d'acide lactique à des trotteurs. Ces trotteurs étaient filmés à grande vitesse avant et après injection. Ils ont observé une légère modification de la foulée, une raideur générale et une inaptitude totale aux performances aux allures rapides.

En effet l'acidose musculaire altère les activités enzymatiques de la phosphorylase et de la phosphokinase, et de plus elle diminue la capacité des fibres musculaires à développer une tension suffisante, ce par altération directe de l'interaction actine-myosine (30).

II
CONCEPT DE SEUIL

II - CONCEPT DE SEUIL

2.1 - HISTORIQUE

Chez l'homme, au départ, la notion de "Seuil Anaérobie" ou "Anaerobic Threshold" a été introduite par WASSERMAN en 1964 (79) pour apprécier la tolérance à l'exercice de patients atteints de maladies cardio-respiratoires.

SANNA RANDACCIO et coll. 1980 (68) détecte un point dit "point de rupture ventilatoire" pendant une épreuve d'exercice à charge progressivement croissante (fig12a). En effet lors d'un exercice de ce type, la ventilation augmente de façon linéaire jusqu'à un niveau au dessus duquel elle augmente brusquement et peut prendre un aspect curviligne. C'est ce point qui est dit "de rupture ventilatoire" et que l'on peut expliquer ainsi :

* Lors d'un travail croissant, il y a production accrue de dioxyde de carbone ce qui entraîne l'augmentation de la ventilation. Mais lorsque l'exercice s'intensifie et que l'apport d'oxygène aux muscles qui travaillent devient insuffisant, la production de lactate augmente. Les bicarbonates vont tamponner ce lactate avec production accrue de gaz carbonique et acidose métabolique.

* Mais lorsque l'acidose s'intensifie, il y a compensation respiratoire. La ventilation augmente de façon plus rapide, ce point qui est appelé "point de rupture ventilatoire" s'accompagne de modifications cardio-respiratoires et métaboliques (fig12b).

Ces mesures ventilatoires vont être utilisées chez l'homme pour détecter "le seuil anaérobie ventilatoire" (CAIOZZO et coll. 1982) (17). En effet une corrélation satisfaisante entre le point de rupture ventilatoire et la brusque augmentation de la lactatémie ayant été observée par WASSERMAN 1973,

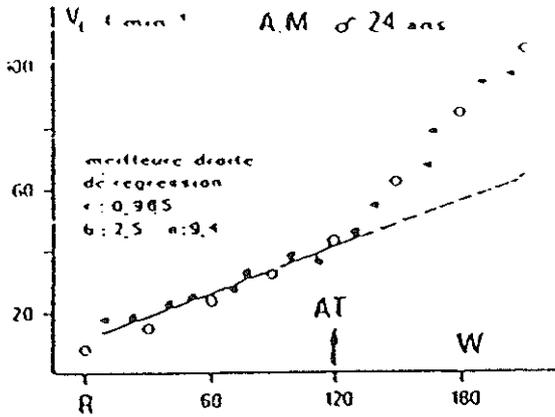


Figure 12 a : Détection du point de rupture de la ventilation pendant une épreuve d'exercice à charge progressivement croissante (30 w/min).
D'après SANNA RANDACCIO et coll. 1980.

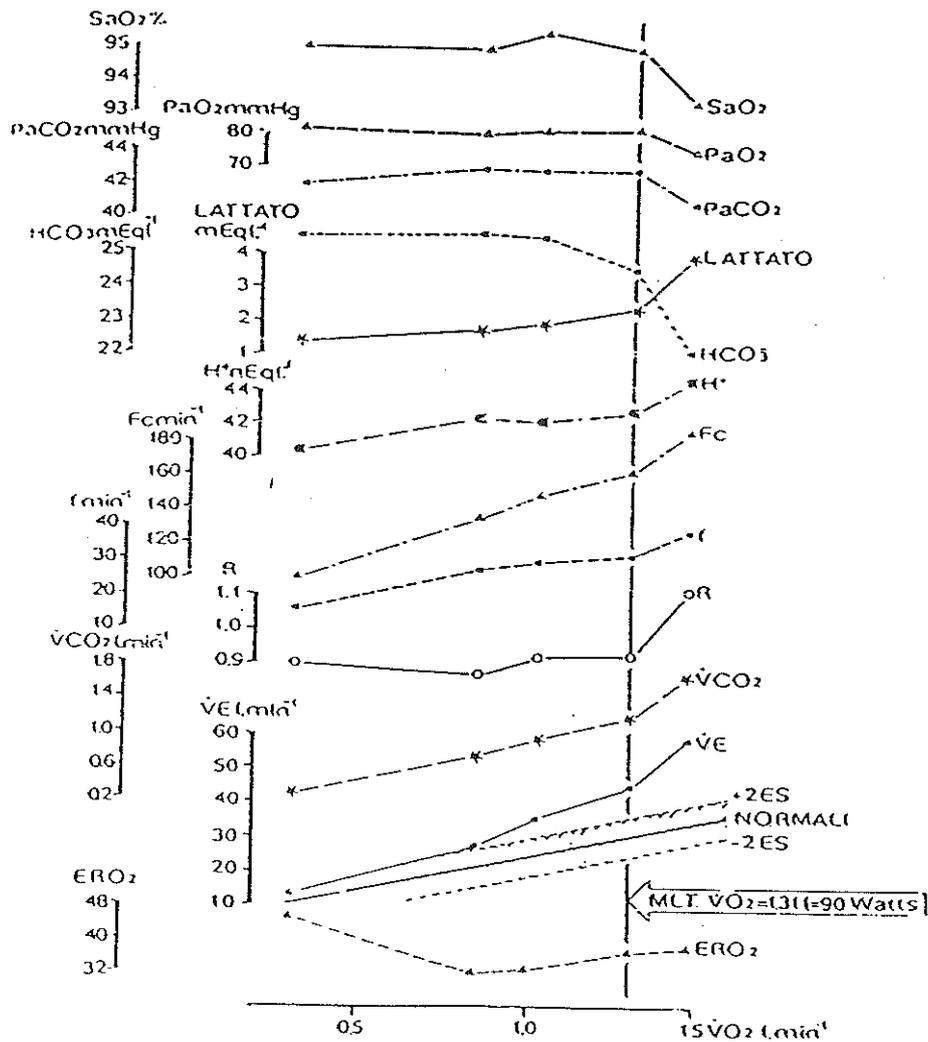


Figure 12 b : Modifications cardio-respiratoires et métaboliques au cours d'une épreuve à charge progressivement croissante.
D'après SANNA RANDACCIO et coll. 1980.

1975, celui-ci appelle ce point "ANAEROBIC THRESHOLD" ou "AT" ce qui signifie "seuil d'anaérobie" (80-81)

Par la suite est apparu le concept de "seuil aérobie-anaérobie" par l'étude de la lactatémie en fonction de l'intensité de l'effort (KEUL et coll. 1978) (40); au cours d'un effort à progression croissante la lactatémie augmente de façon exponentielle mais deux points d'inflexion de cette courbe sont, d'après KEUL, remarquables d'un point de vue statistique, calculés alors sur une centaine d'individus : (fig 13)

- Le point A ou "Seuil Aérobie" est le point à partir duquel la lactatémie commence à s'élever d'une manière significative. Ce point correspondrait à la limite supérieure du travail en aérobie strict et serait atteint pour une lactatémie d'environ 2 mmoles. l⁻¹.

- Le point B ou "Seuil Anaérobie", à partir duquel la courbe se verticalise, correspondrait au plus haut niveau de consommation d'oxygène au delà duquel les lactates sanguins provoquent une acidose métabolique, il serait atteint pour une valeur de la lactatémie de 4 mmoles. l⁻¹ environ. Il est désigné fréquemment dans la littérature sous le terme de OBLA (Onset of Blood Lactate Accumulation) (JACOBS et coll.) (35,38).

Il est à noter que d'autres auteurs se sont intéressés à ces "seuils" : ainsi le concept de "seuil" de même que la production du lactate et son devenir au cours de l'effort ont été analysés par BROOKS 1985 (15) et GOLLNICK et coll. 1986 (29).

La partie intermédiaire de la courbe de lactatémie, située entre 2 et 4 mmoles. l⁻¹ est appelée "zone de transition aérobie-anaérobie". (fig 14)

KEUL et KINDERMAN 1978 et 1979 (40,41) démontrent l'importance de cette "zone de transition" vis à vis des variations parallèles de fréquence cardiaque.

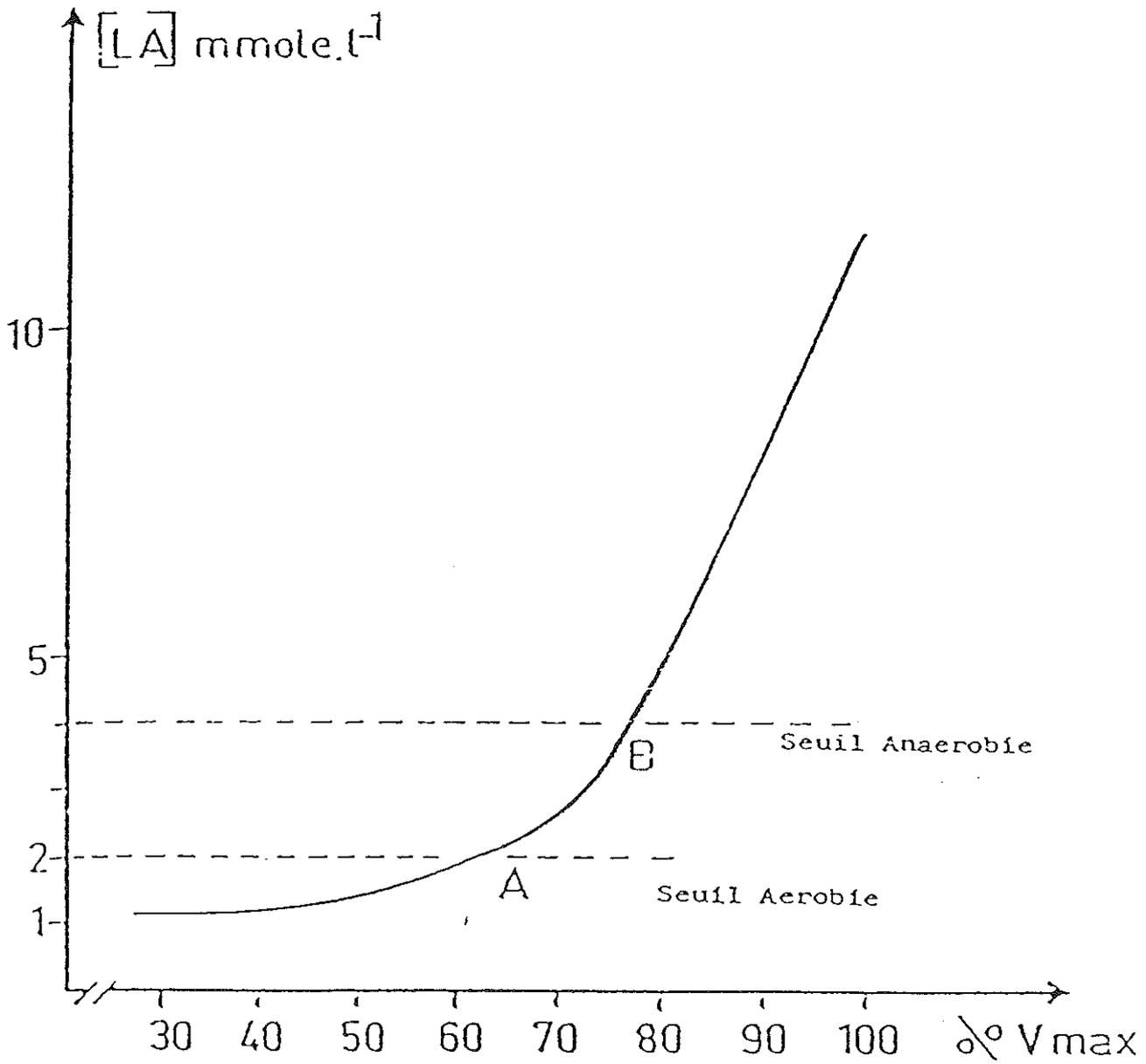


Figure 13 : Définition des seuils selon KEUL.

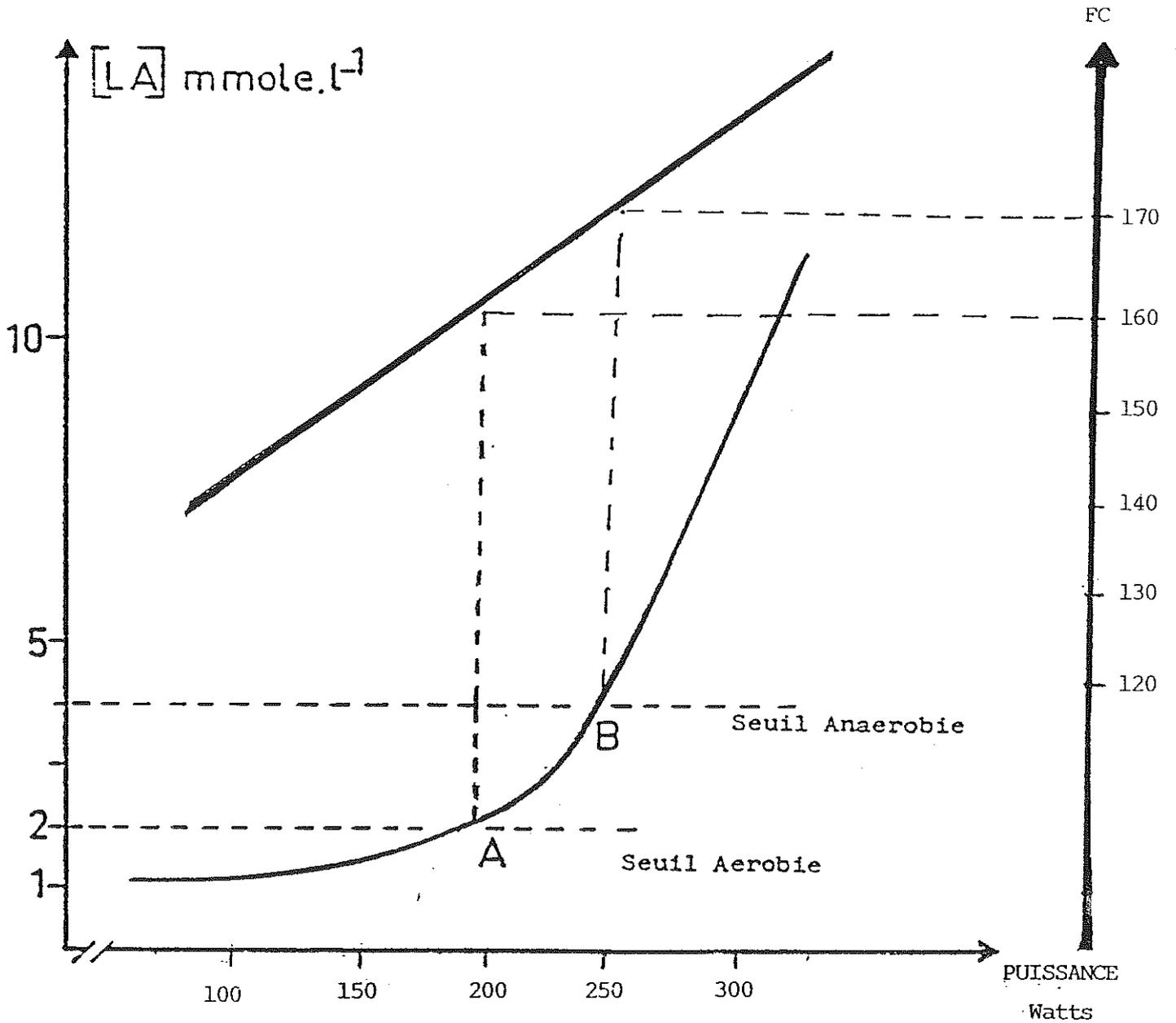


Figure 14 : Relation entre la courbe lactate-puissance et fréquence cardiaque-puissance.

En effet au cours de l'effort sportif, la lactatémie et la fréquence cardiaque subissent, en fonction de la vitesse, des évolutions similaires. Par contre à partir du seuil anaérobie, la lactatémie (La) et la fréquence cardiaque (Fc) ont des tracés divergents.

Ainsi chez l'homme, selon ces auteurs, en fonction de la condition physique et en fonction des facteurs génétiques individuels, le métabolisme énergétique cesserait d'être purement aérobie au voisinage d'une fréquence cardiaque de 140-160 cycles/mn avec un taux de lactate au voisinage de 2 mmol. l⁻¹.

Le seuil anaérobie (SA = 4 mmol. l⁻¹) se situerait quant à lui entre 160 et 180 cycles /mn chez l'adulte jeune.

Ces références statistiques sont souvent utilisées dans le monde sportif, pour évaluer l'aptitude physique et le niveau d'entraînement des sportifs d'endurance.

Au delà du seuil anaérobie (SA = 4 mmol. l⁻¹), la lactatémie augmentant de façon exponentielle, les besoins énergétiques seraient alors, en principe, couverts de plus en plus par les processus anaérobies.

2.2 - SIGNIFICATIONS

DUVALLET 1980 (25) préfère définir un "seuil d'élévation sanguine du lactate" au cours d'un test triangulaire. En effet les "seuils" aérobie et anaérobie décrits dans le paragraphe précédent, ont fait l'objet de nombreuses controverses.

Celles-ci sont dues au fait que le taux de lactate sanguin est, comme toute concentration plasmatique, le résultat d'une production et d'une utilisation. Dès lors en l'absence de marquage isotopique (BROOKS) (15), il est en effet impossible de connaître la signification précise de ce qui est accessible à savoir la concentration lactique mesurée.

DUVALLET (1980) (25) va représenter graphiquement, en coordonnées semi-logarithmiques, les courbes de la lactatémie en fonction du pourcentage de la consommation maximale d'oxygène.

Il obtient deux droites sécantes en un point précis, ce point pouvant être considéré comme la valeur du pourcentage de consommation d'oxygène à partir de laquelle la lactatémie commence à s'élever (fig15).

Selon cet auteur, et compte tenu des difficultés d'interprétation des mesures de la concentration en lactates du sang, l'entraînement pourra donc être éventuellement guidé à partir des observations faites à l'issue d'un protocole parfaitement défini et maîtrisé. Les variations du "seuil d'accumulation du lactate" étant appréciées, chez un sujet, par rapport à une population de référence ou par rapport à lui-même. (DUVALLET et coll.1981) (26).

Un entraînement en endurance tendra à déplacer vers la droite la relation lactate-vitesse et par la même à augmenter le seuil d'accumulation des lactates sanguins (SA ou OBLA). C'est ce qui permettra de conduire cet entraînement dans la pratique sportive courante.

2.3 - APPLICATION AU CHEVAL

Peu d'auteurs, jusqu'à ces dernières années, s'étaient intéressés aux variations du lactate sanguin chez le cheval, lors d'efforts croissants. En effet les nombreuses études faites chez le cheval ne rapportaient que des valeurs de lactatémie au repos (45), ou bien après l'effort, ou même lors de la phase de récupération.

Les premières études faites sur ce sujet semblent être celles de LINDHOLM et coll. 1974 (48) et celles de PANNDORF et coll.1980 (65).

PANNDORF ET COLL. observent l'augmentation de l'acide lactique après un galop sur 500 mètres à des vitesses croissantes. Les études de LINDHOLM ont été effectuées sur des trotteurs, à différentes vitesses, sur une distance de

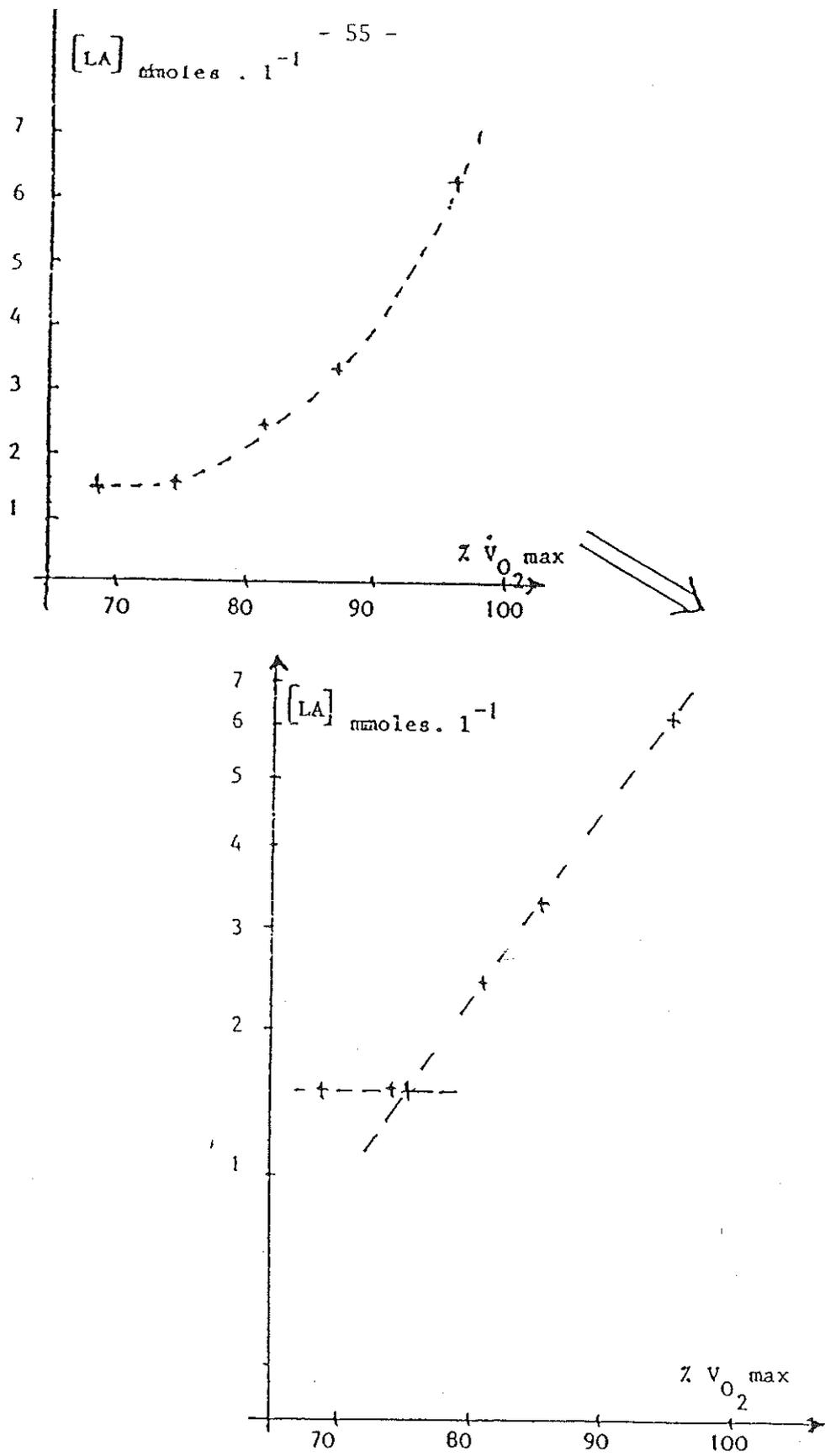


Figure 15 : Principe de la décomposition graphique en coordonnées semi-logarithmiques des courbes de la lactatémie en fonction du pourcentage de la consommation maximale d' O_2 .
D'après DUVALLET 1980.

1000 mètres : l'évolution du lactate sanguin et musculaire, la température rectale et musculaire ainsi que la fréquence cardiaque étant ici relevées. (tableau IV)

Actuellement, en raison du développement des compétitions équestres au niveau national et international, l'aptitude physique du cheval et la conduite de son entraînement tendent à être évaluées comme chez le sportif.

Comme chez l'homme, des épreuves d'effort de type triangulaire avec mesure de la fréquence cardiaque et de la lactatémie vont être pratiquées.

Ces épreuves d'effort bien standardisées chez le sportif se font la plupart du temps en laboratoire mais aussi sur le terrain.

En revanche chez le cheval, pour des raisons techniques et financières (un tapis roulant pour cheval est encombrant et coûteux) seule l'équipe de WOLTER 1988 (84) pratique l'épreuve en laboratoire. En général, ce sont des tests de terrain qui sont utilisés.

AUVINET 1989 (6) dans une revue de la littérature précise les caractéristiques techniques des différentes épreuves d'efforts triangulaires de terrain (tableau V).

La durée de chaque palier et l'intervalle qui les sépare semblent être les deux principaux écueils :

la durée des paliers est variable pour ISLER 1982 (33), WILSON 1983 (82), LEPAGE 1983 (46).

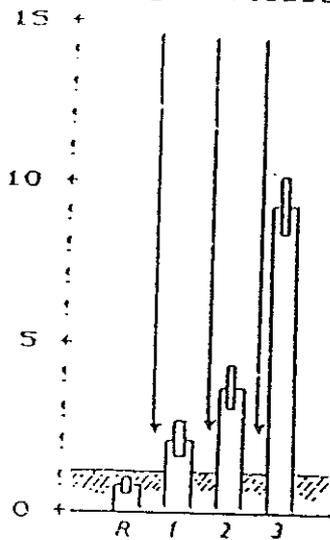
L'intervalle entre chaque palier est de trois à huit minutes pour les auteurs cités et MICHAUX 1988 (53). Cet intervalle long donne à l'épreuve d'effort un caractère intermittent qui favorise moins l'accumulation du lactate. BLANC et coll. (1987) (12) propose un intervalle de temps d'une minute.

La durée totale de l'épreuve peut aussi constituer un obstacle à sa mise en oeuvre :

MICHAUX 1988 (53) propose des épreuves très longues soit 2 heures soit une 1 heure 25 (période de repos de 1 heure et d'échauffement de 20 minutes

lactatémie (mMol/l) après 500m au galop:

- 1 Vitesse = 350-400 m/mn
- 2 Vitesse = 550 m/mn
- 3 Vitesse = 750 m/mn



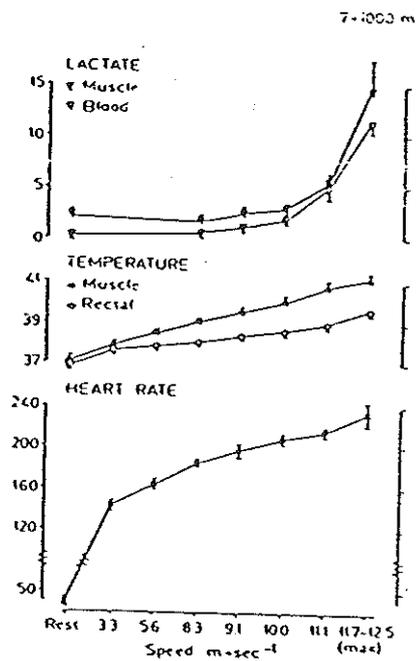
GALOPEUR

TROTTEUR

lactates mMol/l (sang)
mMol/kg (muscle)

température (°C)

fréquence cardiaque
(bat./mn)



Talbeau IV : Evolution en fonction de la vitesse :

- de la lactatémie chez le galopeur (PANNDORF 1980)
- du lactate sanguin et musculaire, de la température musculaire et rectale, de la fréquence cardiaque chez le trotteur (LINNHOLM et coll. 1974)

	ISLER (CH) 1982	WILSON (AUST) 1982	LEPAGE (F) 1983	SLOET VAN OLDRUITENBORGH (NL) 1986	ANTONINI (F) BLANC 1987	MICHAUX (F) 1988	AUVINET (F) GALLOUX 1988
Population Etudiée	12 étalons demi-sang	12 trotteurs entraînés	15 chevaux CCE	6 chevaux de selle 6 chevaux d'endurance	8 chevaux de selle	24 chevaux d'endurance	34 chevaux CCE
Nature du Terrain	Piste de sable	Piste de course	Piste de galop (Copeaux de bois)	Piste de sable	Pré	Piste d'entraînement	Piste de galop
Echauffement	1 100 m Trot	Non défini	Pas : 10'	Non défini	Inclus dans le TEST	20'	Inclus dans le TEST
Définition des paliers Vitesse Temps	1650 m	1000 m	N° 1 4400 m N° 2 1100 m N° 3 2200 m	1100 m	3'	5'	3'
Paliers successifs Vitesse : m/mn ou Fréquence Cardiaque	N° 1 V : 350-450 N° 2 V : 450-500 N° 3 V : 550-600	N° 1 V : 450-550 N° 2 V : 600-700 N° 3 V : 700-800 N° 4 V max > 800	N° 1 V : 220 N° 2 V : 400 N° 3 V : 450	N° 1 FC : 140 N° 2 FC : 150 N° 3 FC : 160 N° 4 FC : 170 N° 5 FC max	N° 1 : pas N° 2 : petit trot N° 3 : grand trot N° 4 : petit galop N° 5 : galop moyen N° 6 : grand galop	N° 1 V : 200 N° 2 V : 250 N° 3 V : 300 N° 4 V : 350 N° 5 V : 400 N° 6 V : 450 N° 7 V : 500 N° 8 V : 550	N° 1 V : 250 N° 2 V : 250 N° 3 V : 350 N° 4 V : 400 N° 5 V : 450 N° 6 V : 500 N° 7 V : 550 N° 8 V : 600
Intervalle	8'	5'	3'	8'	1'	8'	1'
Temps du Prélèvement	3'	3'	2'	5'	15" à 30"	4'	15" à 30"
Distance parcourue au galop	4950 m	4000 m	3300 m	5500 m	≈ 4050 m	11250 m	8550 m

Tableau V : Tableau récapitulatif des différents tests d'effort de terrain.
D'après AUVINET et coll 1989.

comprises dans ce temps); à l'inverse ANTONINI ET COLL. 1989 (4) tentent d'introduire un protocole très court : trois galops de vitesse progressive sur une distance fixe d'où une durée variable (2 mn - 1,5 mn - 1,3 mn) séparés par un intervalle de 30 secondes pour un temps total de 6 minutes.

L'accumulation des lactates chez le cheval lors d'une épreuve d'effort standardisée, réalisée au laboratoire ou sur le terrain et quel que soit le protocole, se fait selon une courbe exponentielle en relation avec l'intensité du travail. (WOLTER et VALETTE 1987 (76) et 1988 (84)).

Comme chez l'homme, la courbe représentative $L = f(V)$ permet de décrire chez le cheval une zone transitionnelle aérobie-anaérobie entre les seuils de 2 et 4 mmoles. l⁻¹ (76,84) (fig.16).

Le paramètre V_4 (vitesse induisant une lactatémie de 4 mmoles.l⁻¹) est utilisé pour évaluer l'effet de l'entraînement (WILSON et coll. 1983) (82), l'état de forme (BAYLY 1986) (8) ou pour guider l'établissement d'une ration alimentaire adaptée à l'effort long (WOLTER 1987) (83) mais sans préjuger pour autant de la réalité de cette valeur comme seuil anaérobie. BLANC et coll. 1987 (12), comme MICHAUX 1988 (53) estiment le seuil d'accumulation des lactates d'après la position du point de rupture de la linéarité dans la relation lactate-vitesse (fig.17).

A coté du suivi de la lactatémie d'exercice et de la détermination des vitesses seuils $V_2 - V_4$, le paramètre V_{200} (vitesse induisant une fréquence cardiaque de 200 battements/minute) non nécessairement lié à V_4 , paraît refléter le comportement cardiaque lors d'un effort situé au delà du seuil anaérobie.

La mesure de V_{200} à l'aide de fréquence-mètres adaptés à l'équitation (ex : Horses Tester), peut aussi être d'un abord aisé pour la conduite de l'entraînement sur le terrain. (WILSON 1983 (82), BAYLY 1986 (8), WOLTER et VALETTE 1988 (84)).

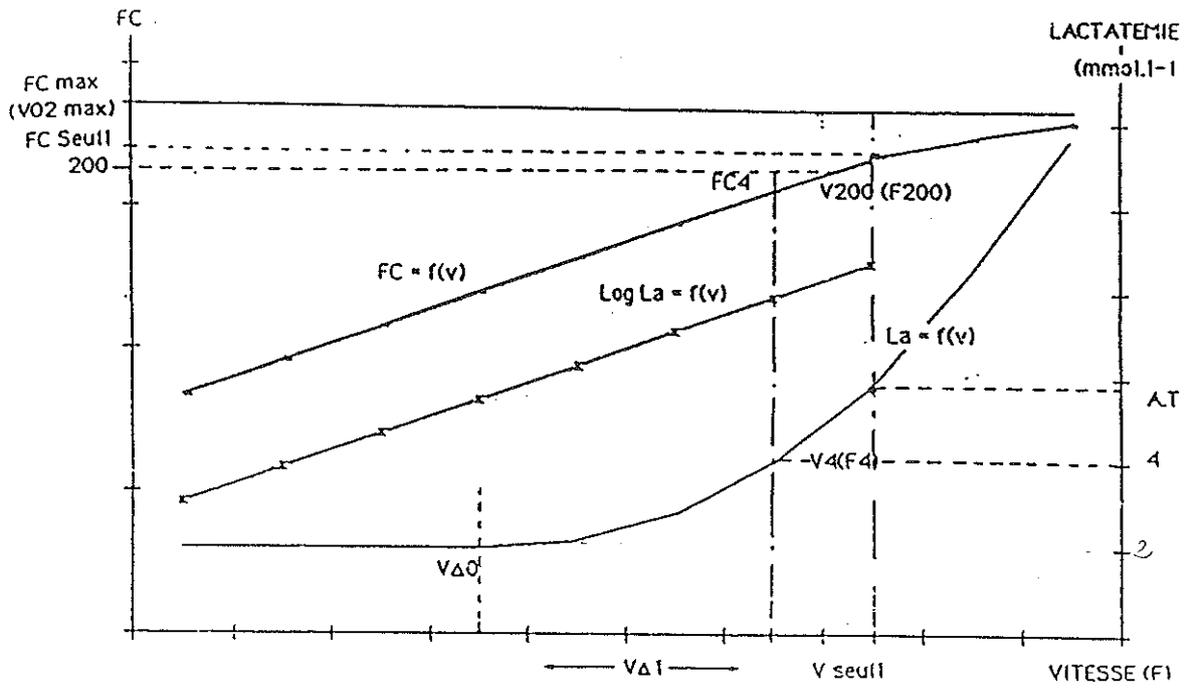


Figure 16 : Evolution de la lactatémie et de la fréquence cardiaque en fonction de la vitesse.
D'après WOLTER et coll. 1988.

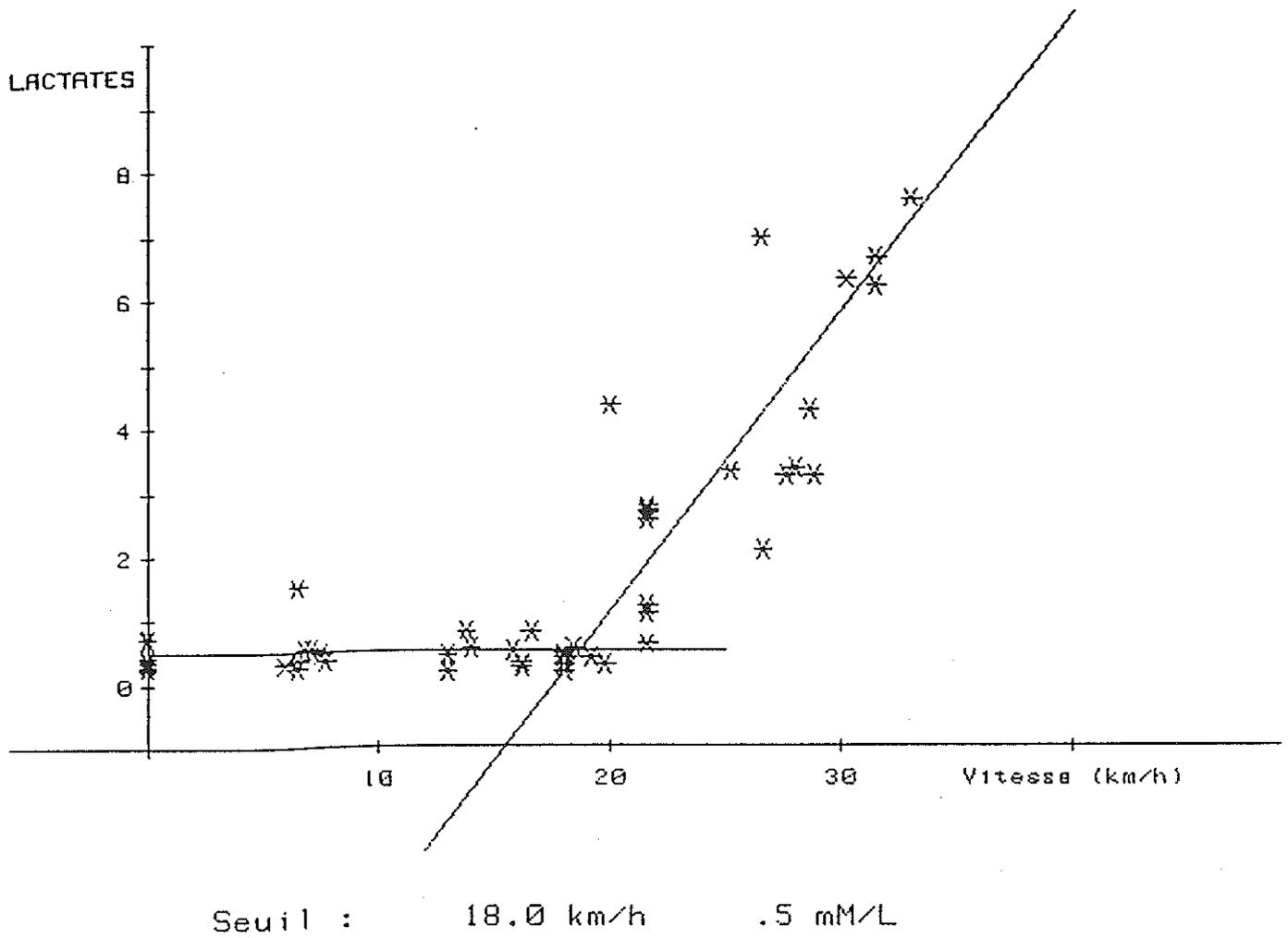


Figure 17 : Détermination automatique du seuil d'élévation des lactates par la méthode du meilleur coefficient de corrélation.

L'ensemble des observations susceptibles de varier en fonction de l'entraînement et obtenues à partir des relations qui existent au cours d'un effort de type triangulaire entre la vitesse (V), la lactatémie (LA), la fréquence cardiaque (FC) sont rapportés par WOLTER et VALETTE dans le tableau VI.

Le seuil de 4 mmol. l⁻¹, bien que faisant l'objet de nombreuses discussions sur sa signification chez le cheval comme chez le sportif, est utilisé en pratique pour la conduite de l'entraînement(84).

A titre d'exemple, MICHAUX (53) montre les résultats des différentes expérimentations chez le cheval d'endurance de niveau national : chez lui le seuil V₄ se situe aux environs de 31,5 km/h (l'épreuve triangulaire étant ici constituée de 8 paliers de 5 minutes séparés par un repos intermédiaire de 8 minutes).

Critère	Définition
V ₄ (mesure de V _{seuil})	Vitesse produisant une lactatémie de 4 mmol.l. ⁻¹ (seuil anaérobie conventionnel)
V ₁	Vitesse produisant une augmentation de 1 mmol.l. ⁻¹ par rapport au palier précédent (seuil anaérobie ?)
V _{do}	Vitesse maximale n'entraînant aucune élévation (sensible) de la lactatémie (seuil aérobie ?)
V ₂₀₀	Vitesse induisant une fréquence cardiaque de 200 batt. mn. ⁻¹
FC ₄ (mesure de FC seuil)	Fréquence cardiaque correspondant à une lactatémie de 4 mmol.l. ⁻¹
L ₂₀₀	Lactatémie atteinte pour un travail à 200 batt. mn. ⁻¹ de fréquence cardiaque
F ₄	Foulées par minutes produisant une lactatémie de 4 mmol.l. ⁻¹
F ₂₀₀	Foulées par minutes induisant une fréquence cardiaque de 200 batt. min. ⁻¹
IRC	Indice de récupération cardiaque (FC _i + FC _F)/FC récupération La récupération peut être de 90 s ou 5 minutes après un travail à V ₄ ou à V ₂₀₀

Tableau VI : Critères d'aptitudes sportives.

D'après WOLTER et coll. 1988.

V_{seuil} et FC_{seuil} sont des valeurs individuelles difficiles à cerner. L'étude des relations entre vitesse, lactatémie et FC conduit à l'estimation d'un certain nombre de critères rapportés dans ce tableau.

III

NOTION DE PUISSANCE CRITIQUE

III - NOTION DE PUISSANCE CRITIQUE

3.1 - TRAVAIL LIMITE ET TEMPS LIMITE AU COURS D'UN EXERCICE MUSCULAIRE EXHAUSTIF

MONOD et SCHERRER 1965 (56) introduisent la notion de "puissance critique" d'un muscle ou d'un groupe musculaire à l'issue d'une série d'exercices locaux, indépendants les uns des autres et différents en puissances. Chaque exercice étant effectué jusqu'à épuisement, la relation entre le travail limite (quantité du travail réalisé jusqu'à l'épuisement) et le temps limite (temps pendant lequel l'exercice a pu être soutenu) peut être représentée par une droite dont la pente correspond à la "puissance critique" du muscle ou groupe musculaire considéré; l'expression est la suivante (fig.18) :

$$W_{lim} = a + b t_{lim}$$

où W_{lim} est le travail limite

t_{lim} est le temps limite

b , la pente de la droite, représente la puissance critique

Le facteur "a" quant à lui, représente, pour ces auteurs, la réserve énergétique rapidement mobilisable dans le muscle lui-même. Cette réserve correspond aussi bien à l'énergie contenue dans les composés phosphorés qu'à celle provenant de la dégradation anaérobie du glycogène ou de l'utilisation de ce substrat dans des réactions aérobies au contact de l'oxygène de la myoglobine (MONOD et FLANDROIS 1985) (57).

Si la puissance de l'exercice à accomplir est égale ou inférieure à b c'est à dire à la puissance critique, celui-ci n'engendre pas de fatigue et peut être théoriquement poursuivi pendant un temps très long.

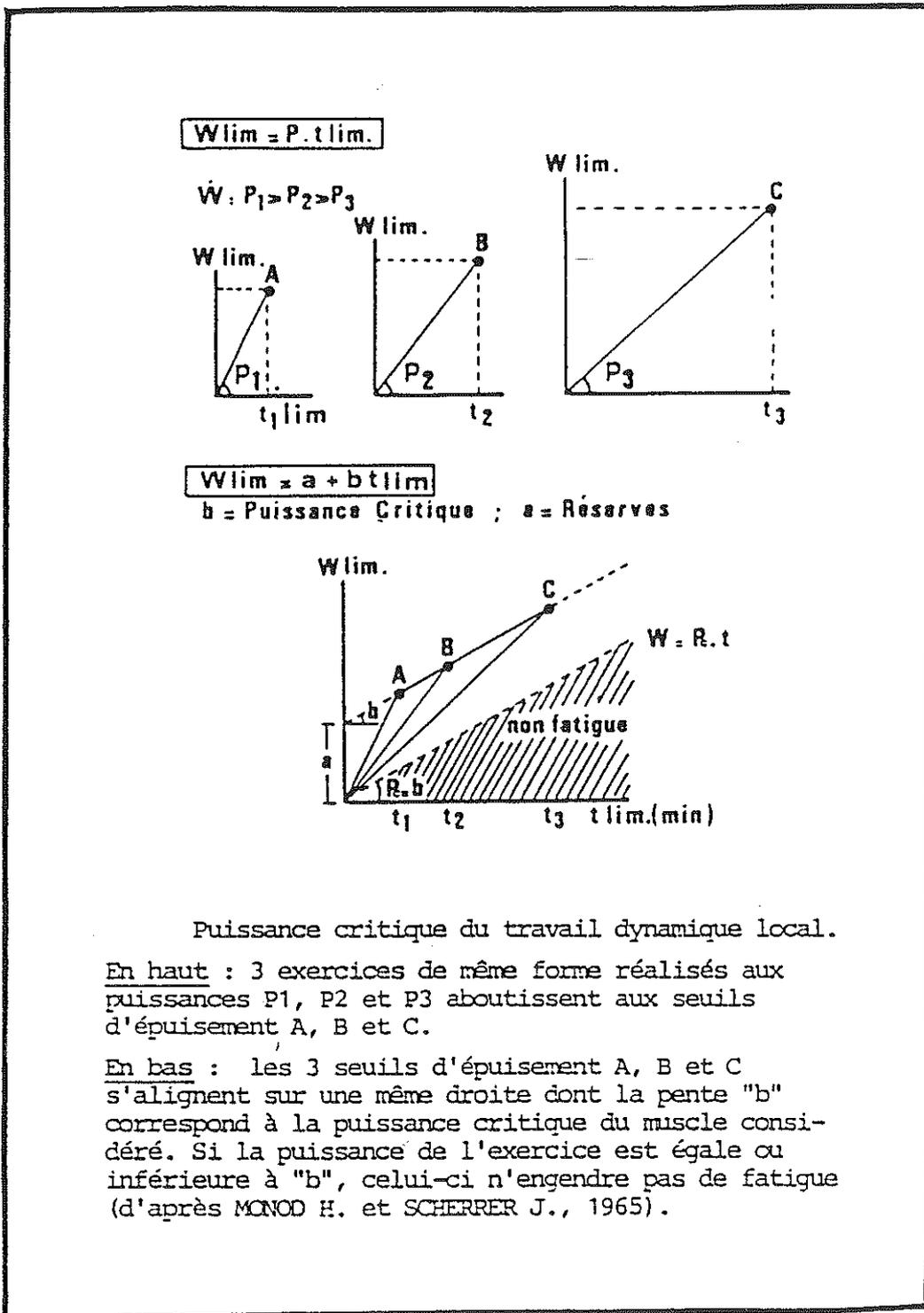


Figure 18

Cette notion de "puissance critique" est ensuite considérée et appliquée à l'organisme entier par MORITANI en 1981 (58) qui étudie l'évolution du "temps limite" pour différentes puissances d'exercices sur ergocycle, comprises entre 175 et 300 watts.

L'analyse des résultats met alors en évidence une régression linéaire dont le coefficient est proche de 1 ($r = 0,982$).

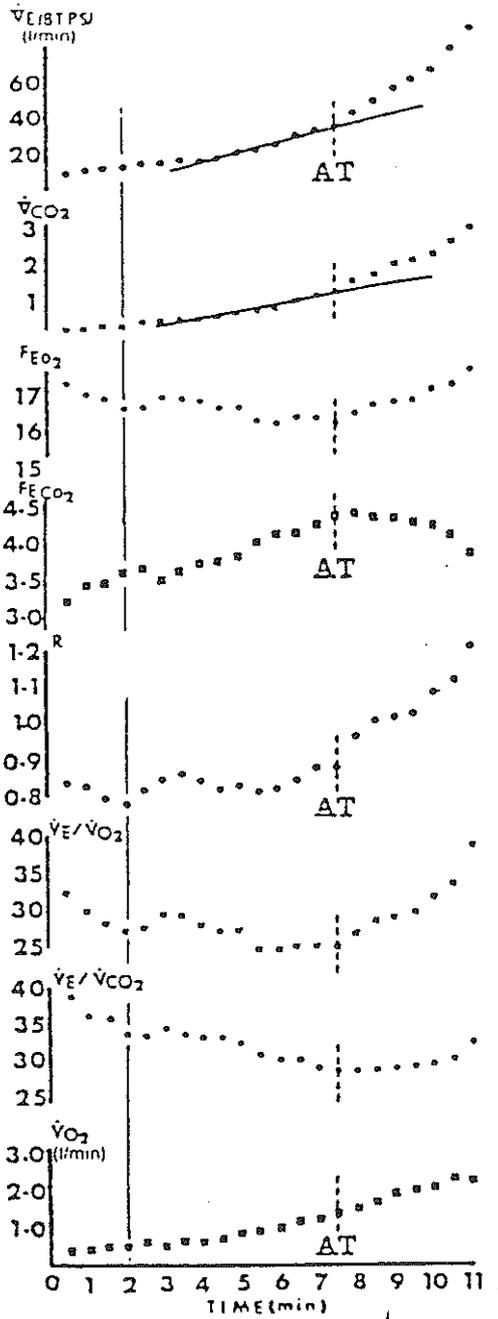
Une excellente corrélation est par ailleurs observée entre le seuil anaérobie "AT" (ou Anaerobic Threshold) défini selon la méthode de WASSERMAN et la puissance critique (CP) exprimée en Watts ou en équivalents d'oxygène au cours de ces mesures. (fig.19-20)

DE VRIES et coll. 1982 (78), à partir des travaux de MORITANI, mettent en évidence une relation entre les données de l'électromyographie exprimant la fatigue musculaire, et la puissance critique. En effet l'arrêt d'un exercice volontaire de type maximal dépendant fortement de la motivation du sujet, pouvait ne pas refléter de façon stricte l'influence de la fatigue sur la poursuite ou non de l'effort fourni.

La puissance critique est alors considérée comme étant la plus haute puissance n'entraînant pas d'augmentation de l'activité électromyographique avec le temps et ceci pour la majorité des muscles impliqués dans l'exercice effectué.

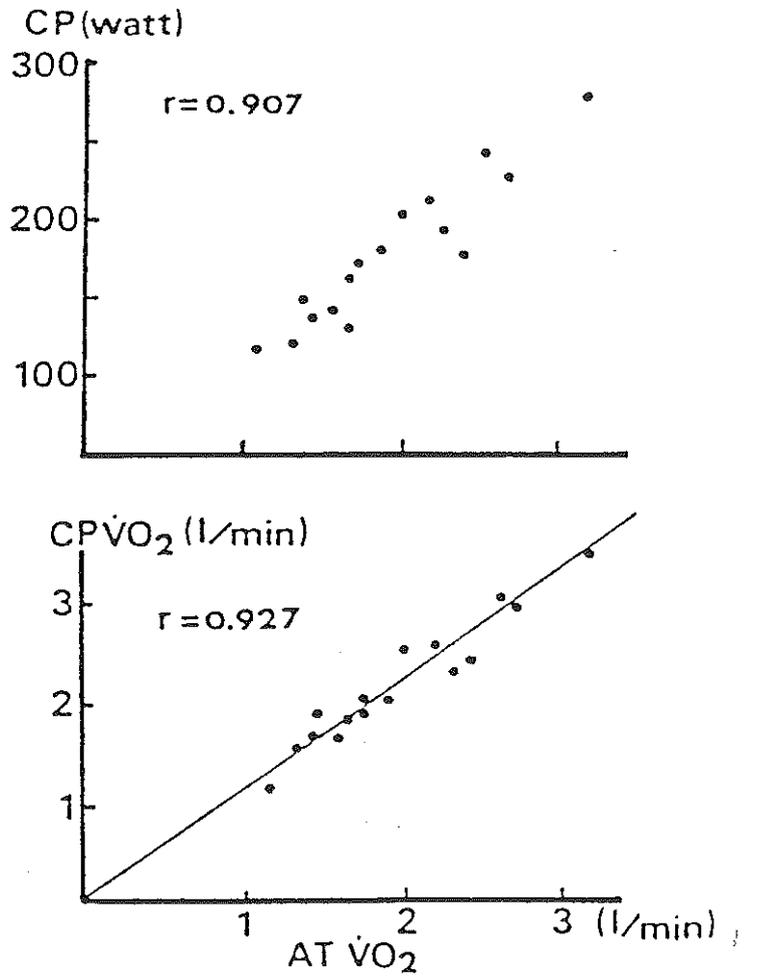
3.2 - PUISSANCES CRITIQUES DE L'ADAPTATION FONCTIONNELLE ET METABOLIQUE AU COURS DE L'ACTIVITE MUSCULAIRE

Considérant que pour être soutenue longtemps, l'activité physique intense exige nécessairement une adaptation fonctionnelle adéquate et le maintien à un nouveau régime stable des variables biologiques de l'organisme, CHASSAIN et coll. 1983, 1986 (22,23,70) proposent un autre mode



Détermination du seuil anaérobie (AT) selon la méthode ventilatoire utilisée par comparaison avec la puissance critique (CP).

Figure 19



Relation entre le seuil anaérobie (AT) exprimée en fonction de \dot{V}_{O_2} ($AT\dot{V}_{O_2}$) et la puissance critique (CP) exprimée en Watts (en haut) et en équivalent \dot{V}_{O_2} ($CP\dot{V}_{O_2}$) (en bas).

Tiré de Moritani, 1981.

Figure 20

d'appréciation de l'aptitude énergétique, qui ne nécessite pas, cette fois, la répétition d'exercices musculaires exhaustifs.

La méthode consiste à mesurer "la puissance critique" de sollicitation du système cardio-vasculaire par l'observation de la fréquence cardiaque et "la puissance critique" de l'adaptation métabolique par l'observation de la lactatémie d'exercice en fonction du temps.

L'idée à l'origine est la séparation des effets du temps et de la puissance sur la variable biologique représentative du système exploré : une mesure différentielle dans le temps de la variable choisie est effectuée au cours d'une série d'exercices musculaires de puissances différentes, en régime sous-maximal, indépendants les uns des autres et identiques en formes et en durées.

"C'est une méthode de zéro" :

L'accroissement dans le temps de la variable considérée Δy au cours de chaque niveau d'effort est exprimée en fonction de la puissance développée en vue de déterminer la puissance critique pour laquelle $\Delta y = 0$.

Deux approches méthodologiques sont proposées, l'une pour un régime discontinu d'exercice musculaire avec le comportement de la fréquence cardiaque et de la lactatémie, l'autre pour un régime continu concerne la lactatémie d'exercice de longue durée.

3.2.1 - Puissance critique de récupération de la fréquence cardiaque " \dot{W}_{CRfc} " et puissance critique de la lactatémie " \dot{W}_{CRL} " dans le cadre d'un régime discontinu d'exercice musculaire

" \dot{W}_{CRfc} " et " \dot{W}_{CRL} " correspondent aux puissances maximales tolérées, n'entraînant pas d'augmentation de ces variables biologiques entre un premier et un second exercice de même forme et de même puissance séparés l'un de l'autre par un temps de repos fixe.

Dans le cadre de ce double échelon (DE) (19) d'exercice musculaire " \dot{W}_{CRfc} " et " \dot{W}_{CRL} " mesurent donc l'aptitude fonctionnelle de l'appareil cardiovasculaire et l'aptitude des métabolismes énergétiques de l'organisme à maintenir constantes leurs grandeurs représentatives.

Pour un protocole donné caractérisé par la forme, le temps de travail et la durée du repos intermédiaire du double échelon E_1 (premier exercice) et E_2 (deuxième exercice), les puissances critiques " \dot{W}_{CRfc} " ou " \dot{W}_{CRL} " sont déterminées à partir de la relation

$$\Delta fc = fc_{E2} - fc_{E1}$$

$$\text{ou } \Delta L = L_{E2} - L_{E1}$$

(les fréquences cardiaques et les lactatémies de fin d'exercice E_1 et E_2) en fonction de la puissance des doubles échelons correspondants.

" \dot{W}_{CRfc} " ou " \dot{W}_{CRL} " sont alors donnés pour $\Delta fc = 0$ et $\Delta L = 0$ (fig 21 et 22).

Plusieurs doubles échelons sont donc nécessaires.

La relation Δfc - puissance d'exercice étant linéaire, deux doubles échelons de puissances différentes sont suffisants pour connaître " \dot{W}_{CRfc} " (fig 21). La relation ΔL - puissance n'étant pas linéaire, un nombre plus important de doubles échelons (3 ou 4) accroît la précision de " \dot{W}_{CRL} ".

3.2.2 - Signification Biologique de " \dot{W}_{CRfc} " et " \dot{W}_{CRL} " mesurées dans ces conditions

" \dot{W}_{CRfc} " et " \dot{W}_{CRL} " représentent les puissances maximales permettant une "récupération" complète pendant l'intervalle de repos du double échelon. Jusqu'à ce niveau de puissance, le sujet doit pouvoir continuer longtemps cette forme d'exercice (théoriquement sans limite de temps).

Au delà de cette puissance caractéristique, la répétition des échelons engendre la fatigue des systèmes explorés et, à plus ou moins long terme

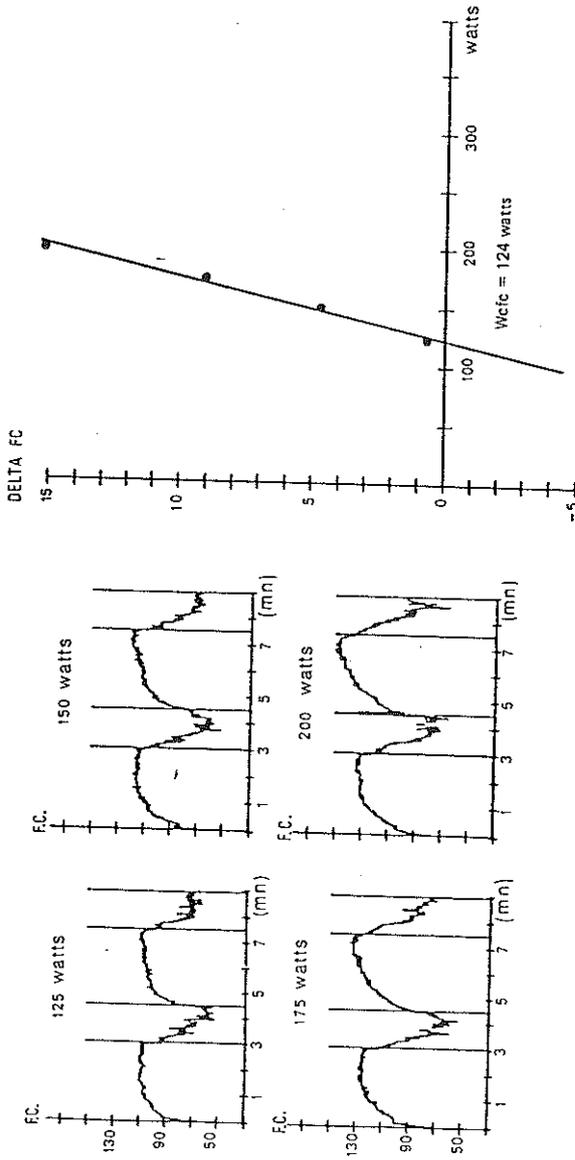


Figure 21 : Série de doubles échelons d'exercice musculaire chez un sportif vétérán.
A droite : régression $\Delta fc - W$

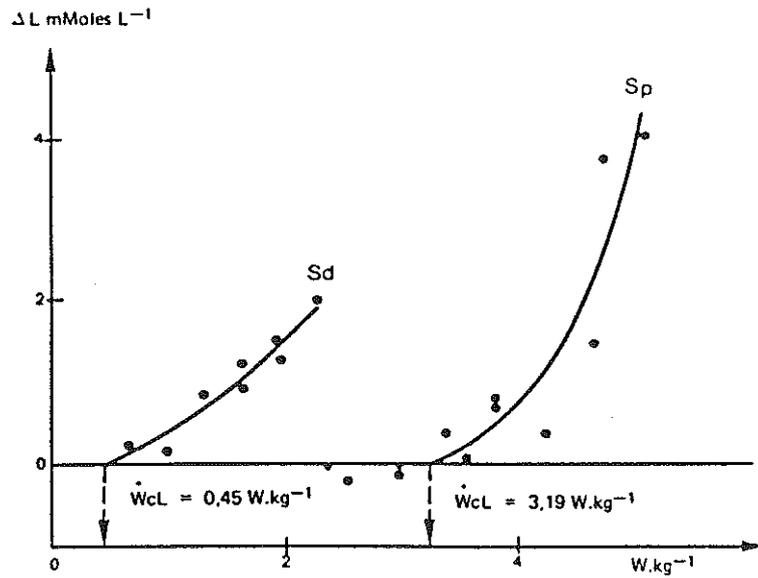


Figure 22 : Accroissement de la lactatémie de fin d'exercice

$\Delta L = L_{E2} - L_{E1}$ au cours de trois séries de doubles échelons chez deux sujets d'aptitudes physiques différentes (Sd : sédentaire 52 ans), (Sp : sportif de haut niveau, coureur demi-fond 26 ans). Les prélèvements de sang sont fait à l'aide d'un cathéter veineux mis en place au niveau de l'avant bras. La lactatémie est mesurée par la méthode enzymatique HOHORST et NOLL, dosage spectrophotométrique (coffrets Boehringer).

l'interruption ou tout au moins la réduction de l'intensité de l'exercice physique considéré.

Un sujet "récupèrera" d'autant mieux que sa puissance critique sera plus élevée.

Deux propriétés physiologiques caractérisent particulièrement la puissance critique de récupération de la fréquence cardiaque :

- La première est effectivement en rapport avec l'aptitude du sujet à "récupérer" après l'activité musculaire :

" \dot{W}_{CRfc} " diminue en effet avec la réduction de l'intervalle de repos entre les deux échelons de travail (fig 23).

- La deuxième : dans le cadre d'un protocole donné, " \dot{W}_{CRfc} " paraît être une référence caractéristique de l'espèce. En effet le comportement de tous les sujets explorés, quels que soient leur âge ou leur aptitude physique, peut être représenté par une expression linéaire entre " Δfc " (l'accroissement de fc E_1 et E_2) et la puissance du double échelon d'exercices exprimée de façon relative (en pourcentage) par rapport à la puissance critique individuelle. (fig 24)

Ce mode de représentation prend donc ici la dimension d'un modèle de comportement de la fréquence cardiaque à l'effort dans le cadre du protocole.

3.2.3 - Puissance critique de la lactatémie en régime continu d'exercice musculaire

La lactatémie au cours d'un exercice musculaire continu à puissance croissante évolue différemment en fonction du temps, selon la puissance développée (20,21) :

- quand l'exercice est de faible puissance (au dessous de 60 pour cent de $\dot{V}O_2$ max chez la plupart des sujets), après une période d'augmentation

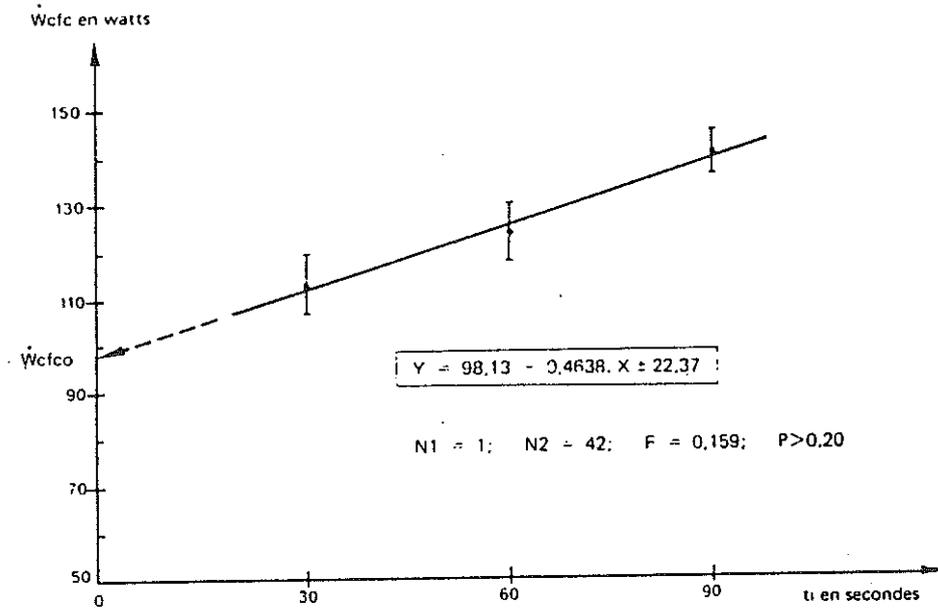


Figure 23 : Evolution de la puissance critique \dot{W}_{cfc} en fonction du temps intermédiaire de repos (t_i) séparant les doubles échelons de travail de trois minutes chez un groupe de 15 sujets (de 20 ans, appelés au Service National Actif). Chaque sujet a à effectuer, a des jours différents (en moins de 15 jours), 3 séries de doubles échelons d'exercices musculaires avec des temps de repos intermédiaires (t_i) entre les échelons de 30, 60 et 90 secondes. Dans ces conditions, la puissance critique de la fréquence cardiaque caractéristique du groupe " \dot{W}_{cfc} " diminue avec le temps intermédiaire de récupération " t_i ". L'extrapolation à l'origine de la relation observée donne " \dot{W}_{cfc0} ", la puissance critique théorique en situation d'exercice musculaire continu (CHASSAIN 1982).

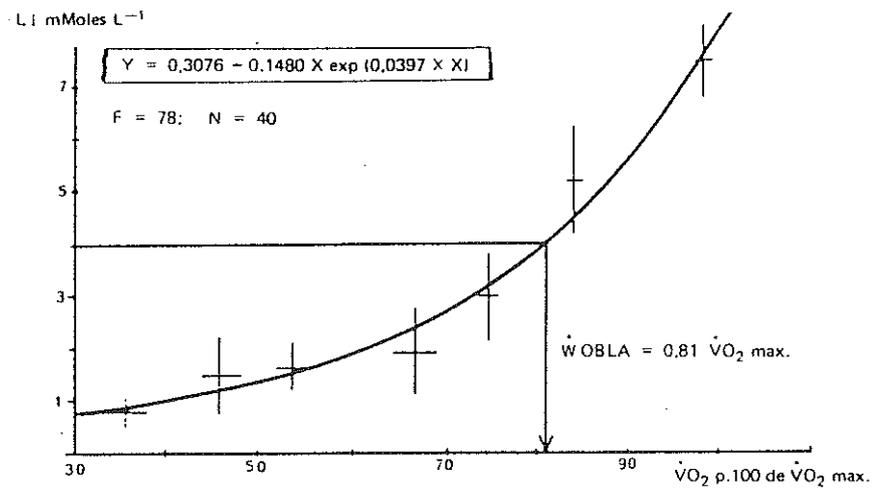


Figure 24 : Relation lactates - $\dot{V}O_2$ (en % de $\dot{V}O_2$ max) chez 7 Triathlètes de niveau national et international dont 2 femmes.
La puissance OBLA ou "seuil anaérobie" correspond à 4 mmol.l⁻¹ de lactates sanguins et se situe pour le groupe à 81 % de $\dot{V}O_2$ max.
Les "croix" indiquent les moyennes et erreurs types des valeurs individuelles.

qui se situe dans les 5 premières minutes d'exercice (lactate précoce), la lactatémie redescend pour tendre vers sa valeur de repos.

- quand l'exercice est de forte puissance (au dessus de 85 pour cent de $\dot{V}O_2$ max la plupart du temps) la lactatémie continue d'augmenter avec l'épuisement grandissant des sujets.

Il existe donc nécessairement une situation "critique", entre les deux précédentes, au cours de laquelle, au lieu de continuer d'augmenter ou de redescendre, la lactatémie se stabilise avec le temps pendant la période d'observation. (fig.25)

" $\dot{W}_{CR L}$ ", la puissance critique pour le métabolisme lactique, est alors par définition, la puissance d'exercice particulière qui engendre cette situation "critique" en régime d'exercice continu (fig.26)

3.2.4 - Signification biologique de \dot{W}_{CL} en régime d'exercice continu :

\dot{W}_{CL} est la puissance d'exercice maximale entraînant la stabilisation du lactate sanguin au delà de la période de début pendant laquelle s'effectue l'adaptation des processus énergétiques aérobie. Dans ces conditions, la stabilisation de la lactatémie implique deux phénomènes :

- 1 - l'égalisation des débits d'apparition et de disparition du lactate dans le sang.
- 2 - l'optimisation de l'ensemble des processus métaboliques et fonctionnels contribuant à l'utilisation énergétique du lactate produit.

\dot{W}_{CL} correspond ainsi à la puissance maximale d'exercice musculaire en aérobie stricte à l'échelle de l'organisme.

Une puissance d'exercice supérieure à \dot{W}_{CL} entraînera un accroissement de la lactatémie avec le temps, signant par la même une contribution anaérobie dans l'énergétique globale.

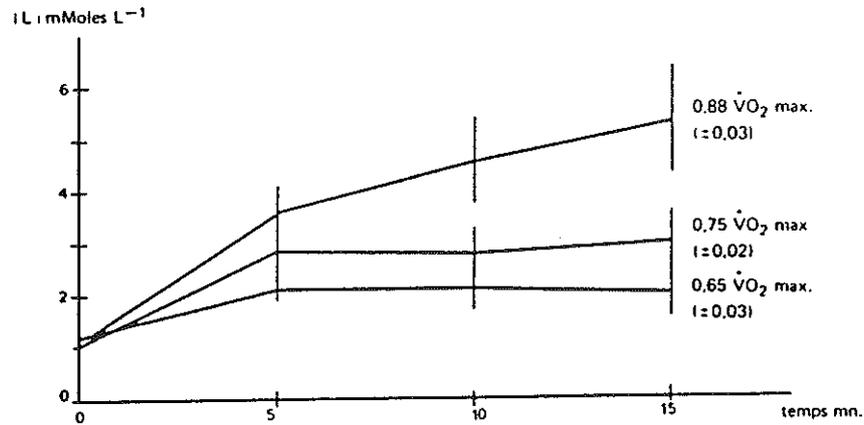


Figure 25 : Evolution de la lactatémie en fonction du temps chez 7 triathlètes de niveau national et international dont 2 femmes au cours de 3 paliers d'exercices musculaires indépendants de 15 minutes (moyennes erreurs types). La puissance de l'effort fourni (moyenne et erreurs types des valeurs individuelles de $\dot{V}O_2$ à la 10ème et à la 15ème minute en pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$) est indiqué à droite de chaque courbe.

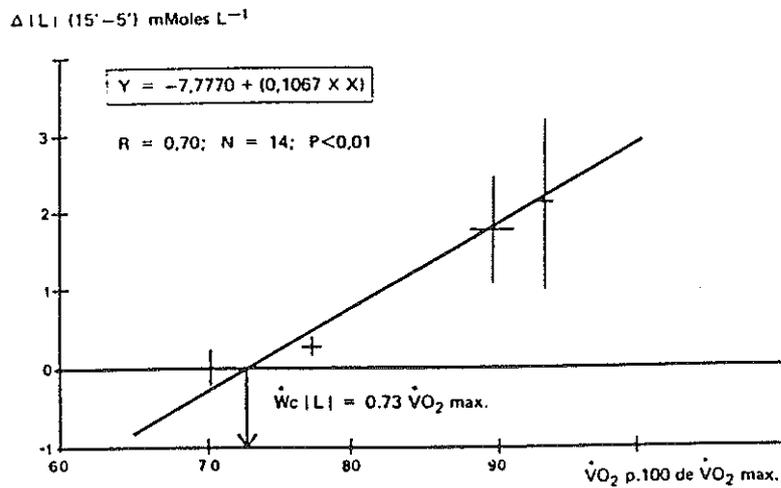


Figure 26 : Accroissement de la lactatémie ΔL (15' - 5') entre la 5ème et la 15ème minute d'un exercice musculaire continu en fonction de la puissance de l'effort fourni exprimé en % de $\dot{V}O_2 \text{ max}$ (observation chez 7 triathlètes de niveau national et international, dont 2 femmes).

3.2.5 - Intérêt de \dot{W}_{CL} en régime d'exercice musculaire continu

Une augmentation de \dot{W}_{CL} sur un plan individuel, comme une augmentation du seuil anaérobie "S₄" d'un point de vue statistique, est en faveur d'une amélioration des performances dans les exercices de longue durée. Cette corrélation attendue est en rapport avec la différence de rendement énergétique entre la glycolyse aérobie et la glycolyse anaérobie : 39 ATP par molécule de glycogène en régime aérobie, 3ATP seulement, soit 13 fois moins en régime anaérobie. Au delà de \dot{W}_{CL} quand l'organisme fait intervenir son énergie anaérobie, cette différence de rendement peut entraîner une accélération sensible de la fonte des réserves en glycogène musculaire, et donc la limitation à terme de l'exercice.

IV

ETUDE EXPERIMENTALE

IV - ETUDE EXPERIMENTALE

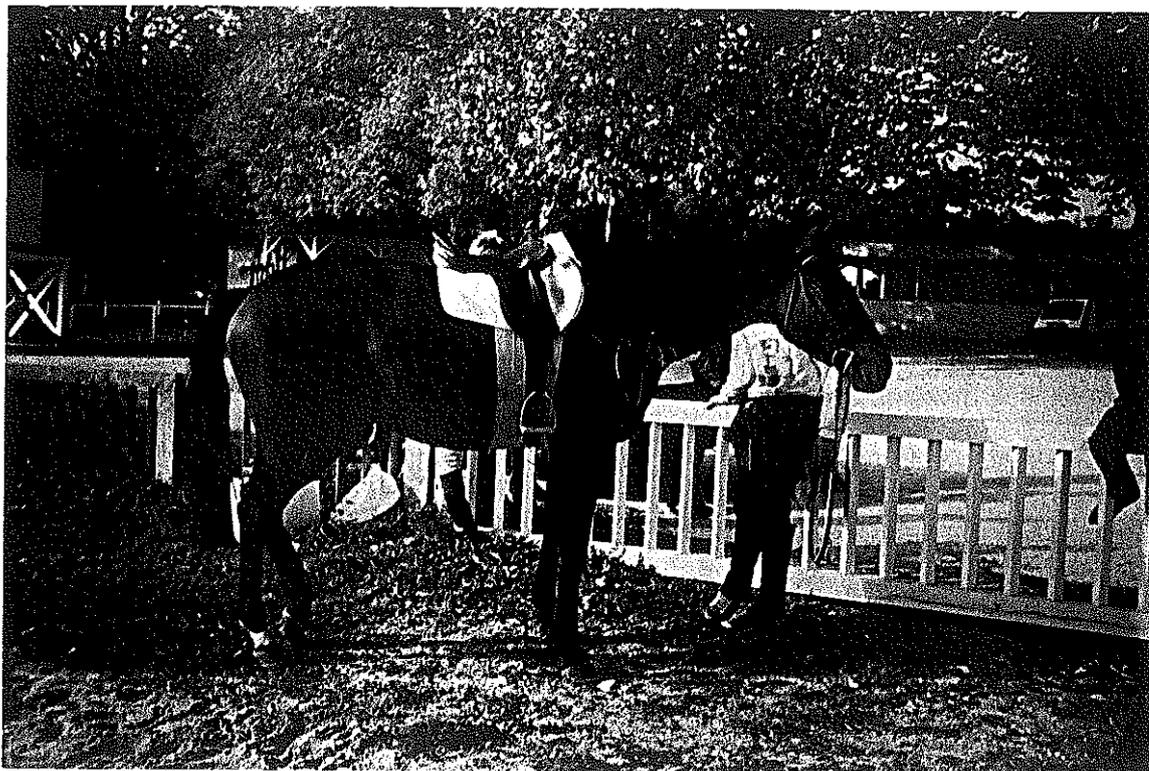
4.1 - PRESENTATION DES CHEVAUX

Les chevaux utilisés dans le cadre de cette étude sont ceux des haras de Pompadour. Leurs caractéristiques sont rapportées dans les tableaux des pages suivantes.

Le lot est relativement homogène car ce sont tous des chevaux d'obstacle entraînés en vue de concours hippiques. De plus la quantité de travail effectuée quotidiennement est la même pour tous (environ 1 heure de travail par jour).

Le sexe (3 femelles - 2 hongres) et l'âge (entre 4 et 12 ans) varient, mais nous avons vu que ces trois paramètres n'avaient pas d'influence sur le taux d'acide lactique sanguin (31).

Nous avons vu, par contre, l'existence significative de sous population selon la race (LENGRONNE - (45) lactatémie de repos). Sur les cinq chevaux, trois sont des Anglo-Arabs et deux, des Selles Français.



NOM : COTISE

DATE DE NAISSANCE : 8 MARS 1985 (4 ans)

LIEU DE NAISSANCE :Domaine de Pompadour

SEXE : Femelle

RACE : Anglo-Arabe (33,70%) par *Fast* et *Cybele V*

TAILLE : 1 .63 m

POIDS :570 kgs

ROBE : Bai foncé

TRAVAIL : 1 heure par jour

GAINS : 0 F (4 ans)



NOM : DEB A.A

DATE DE NAISSANCE : 12 mars 1978 (11 ans)

LIEU DE NAISSANCE : Dun le Palestel (Creuse)

SEXE : Femelle

RACE : Anglo-Arabe (36,36 %) par *Yamol* et *Coba*

TAILLE : 1,65 m

POIDS : 650 kgs

ROBE : Bai

TRAVAIL : 1 heure par jour

GAINS : 6000 F



NOM : LONG DRINK II

DATE DE NAISSANCE : 10 avril 1977 (12 ans)

LIEU DE NAISSANCE : Haras de Texonnieras (Couzeix)

SEXE : Mâle Hongre ,

RACE : cheval de Selle Français par *Vent des Courres* (Anglo-Arabe) et *Madelon* (demi-sang)

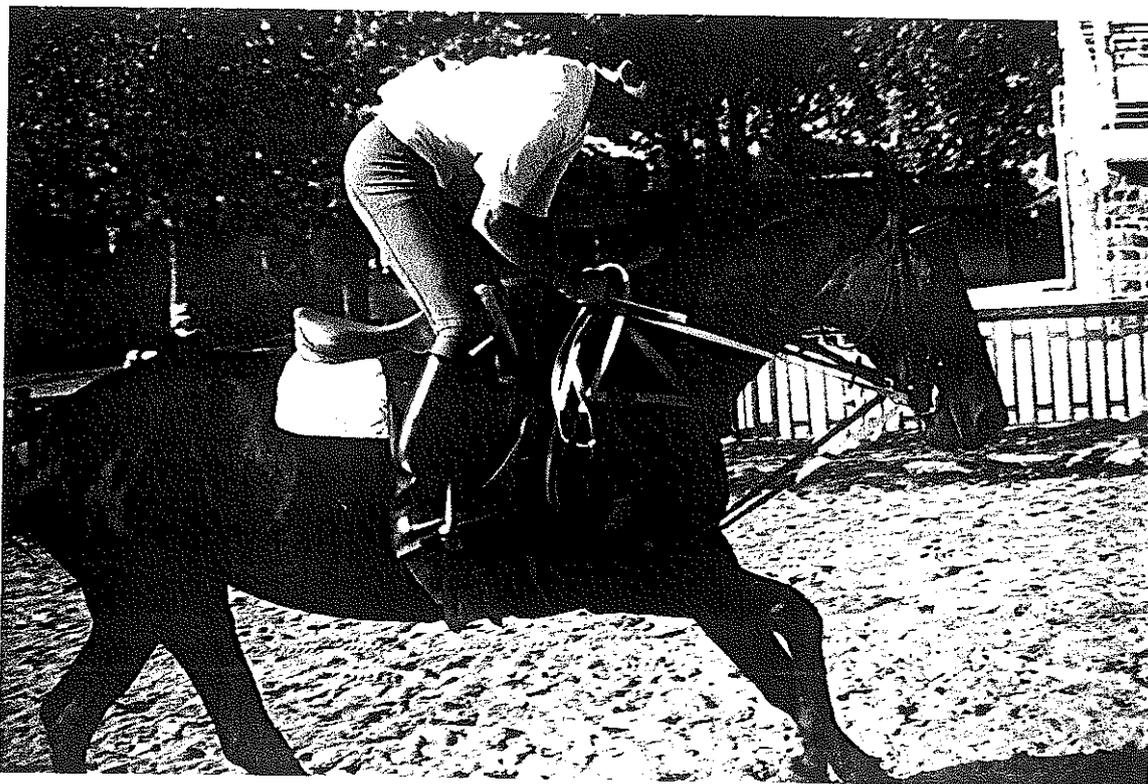
TAILLE : 1,65 m

POIDS : 550 kgs

ROBE : Bai

TRAVAIL : 1 heure par jour

GAINS : 8000 F



NOM : RIVALE'JAC

DATE DE NAISSANCE : 2 avril 1983 (6 ans)

LIEU DE NAISSANCE : Domaine de Pompadour

SEXE : Femelle

RACE : Anglo-Arabe(36,15 %) par *Fol Avril* et *Erryme Jac*

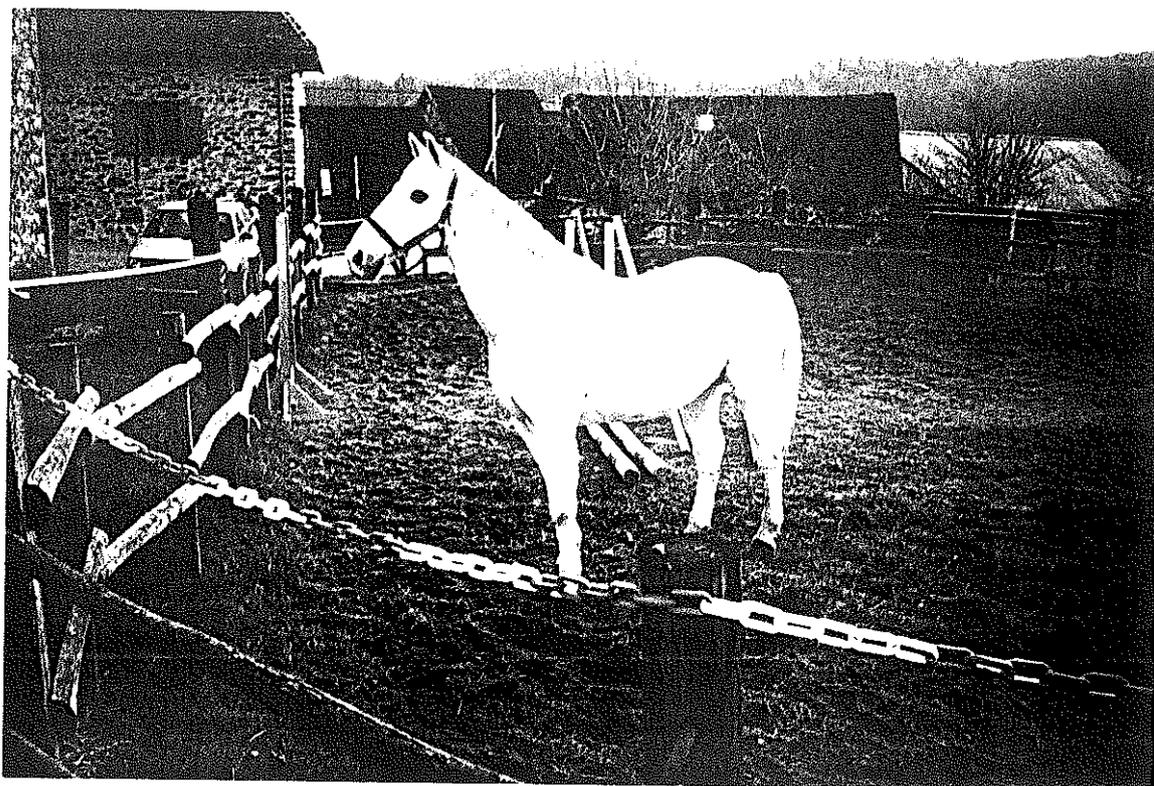
TAILLE :1,64 m

POIDS : 520 kgs

ROBE : Alezan

TRAVAIL : 1 heure par jour

GAINS : 7 000 F



NOM : LISTIGRIS

DATE DE NAISSANCE : 1er avril 1977 (12 ans)

LIEU DE NAISSANCE : Manche

SEXE : Male Hongre ,

RACE : Cheval de Selle Français par *Largny* (Pur Sang) et *Floride* (Selle Français)

TAILLE : 1,65 m

POIDS : 670 kgs

ROBE : Aubere

TRAVAIL : 1 heure par jour

GAINS : 72 000 F

	COTISE (1)	DEB AA (2)	LONG DRINK (3)	RIVALE'JAC (4)	LISTIGRIS (5)
Race	Anglo-Arabe	Anglo-Arabe	Selle Français	Anglo-Arabe	Selle Français
Age	4 ans	11 ans	12 ans	6 ans	12 ans
Sexe	Femelle	Femelle	Hongre	Femelle	Hongre
Foulee	Grande	Petite	Moyenne	Grande (moins d'efforts)	Petite
Morphologie	Complet	obstacle (lourd musclé)	Complet	Complet	Obstacle (lourd musclé)
Poids	570 kgs	650 kgs	550 kgs	520 kgs	670 kgs
Stress	-	++	-	++	++
Particularités	origine course			Travail plus poussé à l'obstacle. spécialisation obstacle. grosses épreuves (B1)	Travail plus poussé à l'obstacle. spécialisation obstacle. grosses épreuves (B1)

TABLEAU VII : Tableau récapitulatif des caractéristiques de ces 5 chevaux

4.2 - EPREUVE D'EFFORT

4.2.1 - Modalités

Le test se déroule sur l'hippodrome de Pompadour situé en face du château et des écuries. Le terrain est par définition très plat et très régulier.

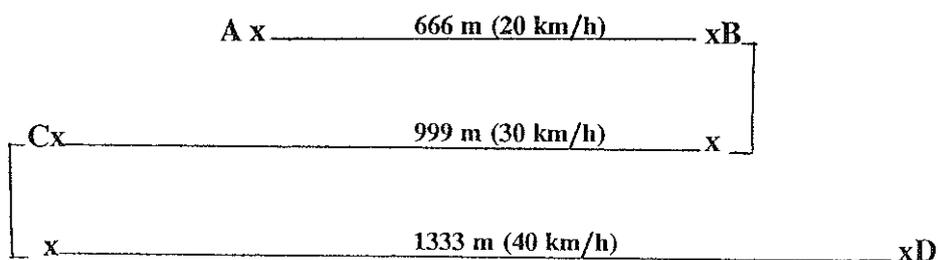
Nous nous sommes rendus quatre fois à Pompadour pour y réaliser une épreuve d'effort de type triangulaire et 3 épreuves d'effort de type rectangulaire .

Les quatre fois nous avons bénéficié de conditions idéales, tant au niveau des conditions climatiques qu'au niveau du maintien de la vitesse et du déroulement même de ces galops.

Le travail est calculé en temps, la vitesse étant imposée par une moto. Le cheval galope sur la piste en sable à côté de la moto en essayant de se maintenir au même niveau.

* Epreuve Triangulaire (13 octobre 1989)

Cette épreuve d'effort de type triangulaire et maximale comporte 3 galops à vitesses croissantes (20 km/h - 30 km/h - 40 km/h) et ceci par paliers de 2 minutes. Les prélèvements sont donc effectués en A (c'est à dire au repos) , puis en B, C, et D. (voir schéma suivant)



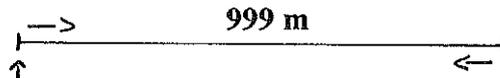
La personne effectuant le prélèvement est donc derrière sur la moto. Un premier groupe responsable des tubes se situe en A (puis en C) tandis que le 2ème groupe réceptionne les tubes en B et en D.

*** 1ère épreuve de type rectangulaire (23 octobre 1989)**

- Temps : 6 minutes avec prélèvement au repos $t = 0$

puis à $t = 2 \text{ mn}$, $t = 4 \text{ mn}$, $t = 6 \text{ mn}$.

- Vitesse fixée à 30 km/heure donc la distance à parcourir entre chaque prélèvement est 999m



*** 2ème épreuve type rectangulaire (25 octobre 1989)**

- toujours paliers de 2 minutes avec prélèvement au repos,

à $t = 2 \text{ mn}$, $t = 4 \text{ mn}$, $t = 6 \text{ mn}$.

- vitesse fixée à 35 km/heure donc distance entre chaque prélèvement de 1166 m.

*** 3ème épreuve de type rectangulaire (1er novembre 1989)**

- toujours paliers de 2 mn

- Vitesse à 40 km/heure donc trois fois 1333 mètres à parcourir, ce qui représente un effort maximal chez ces chevaux.

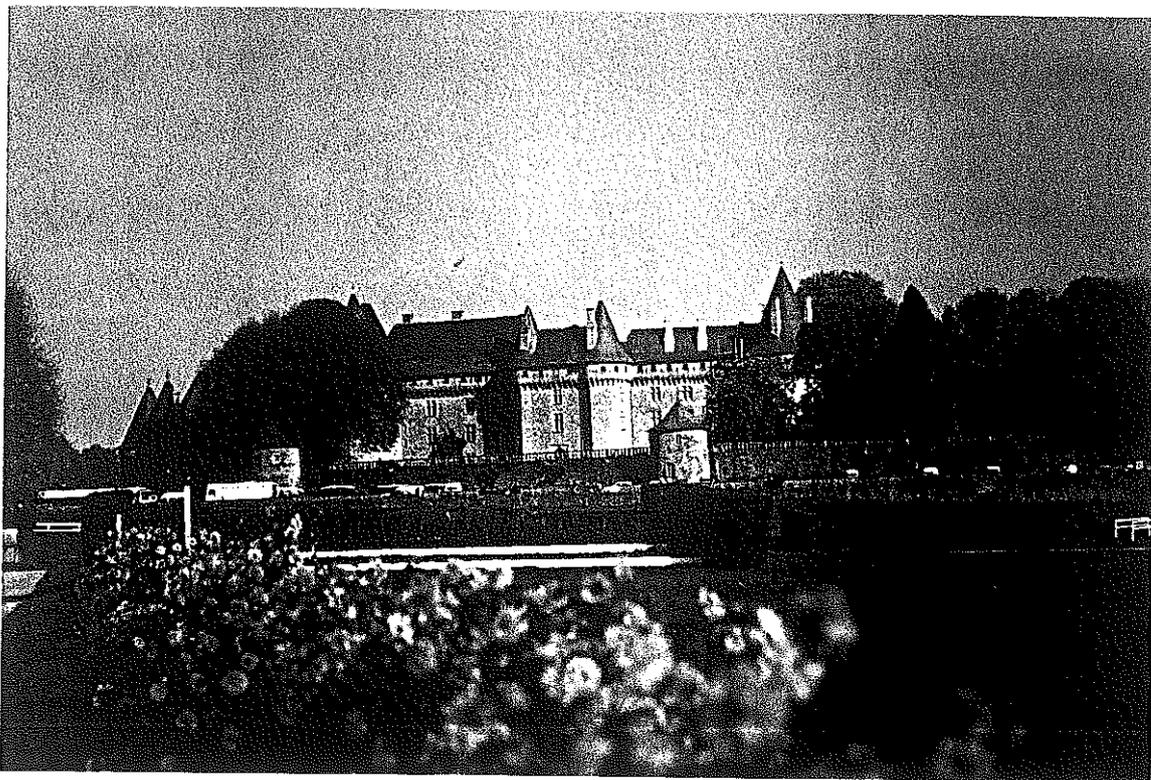


Figure 27 : POMPADOUR : son hippodrome, son chateau.

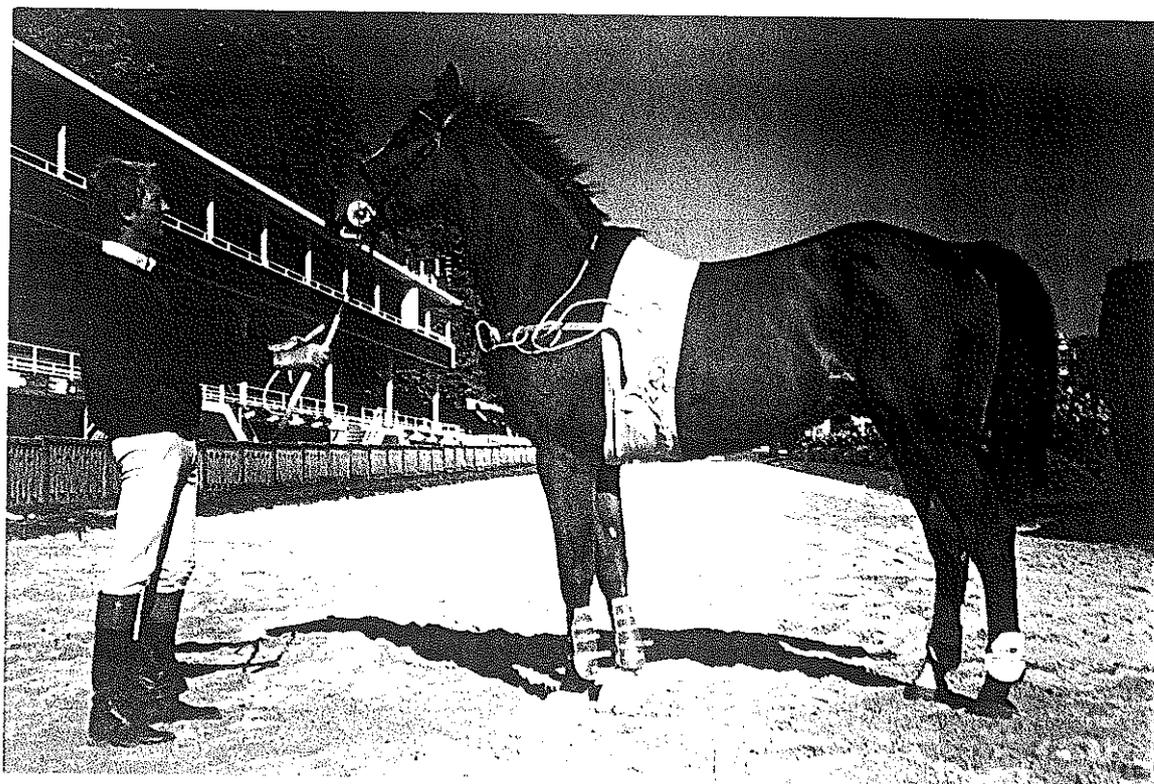


Figure 28 : Présentation du cheval juste avant le départ.

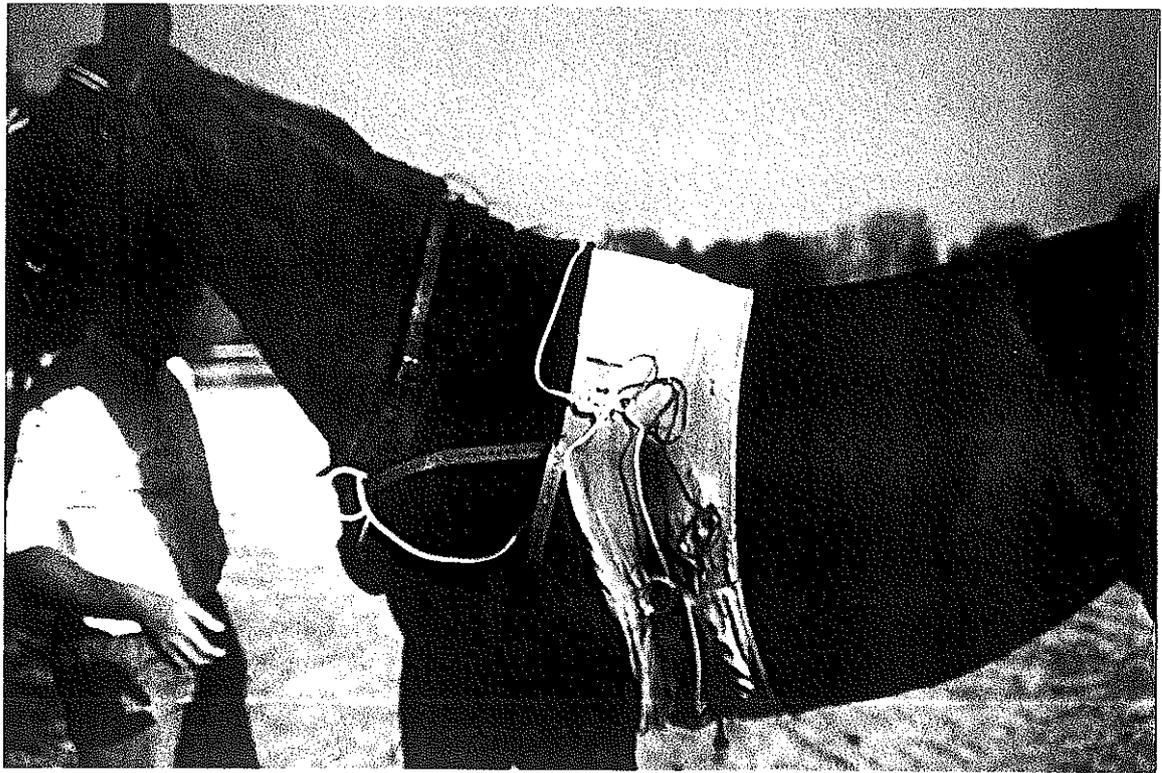


Figure 29 : La sangle

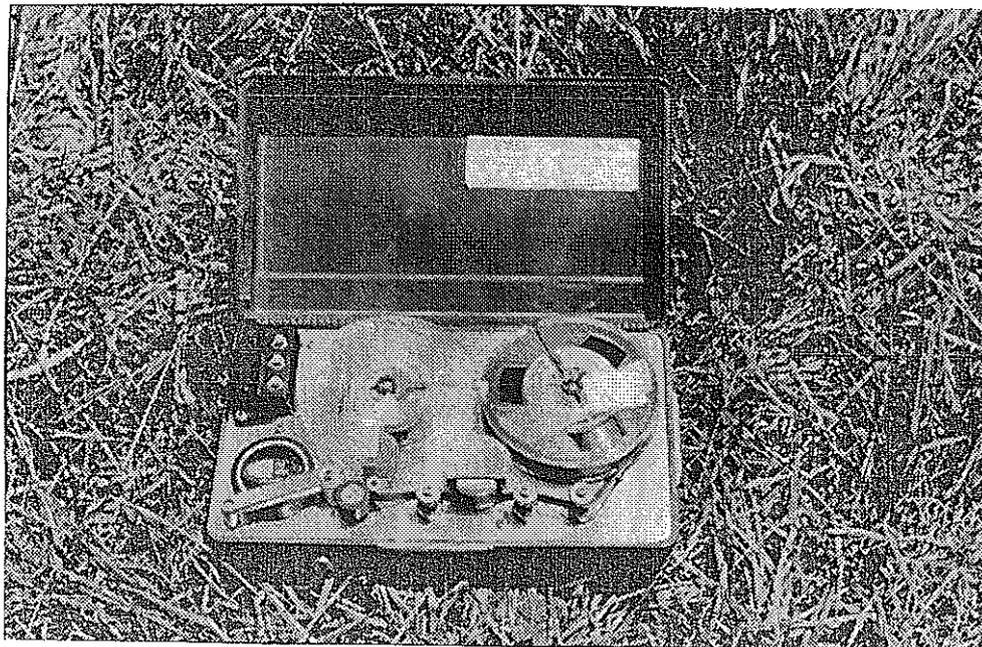


Figure 30 : Boitier Holter



Figure 31 : Prélèvement sang

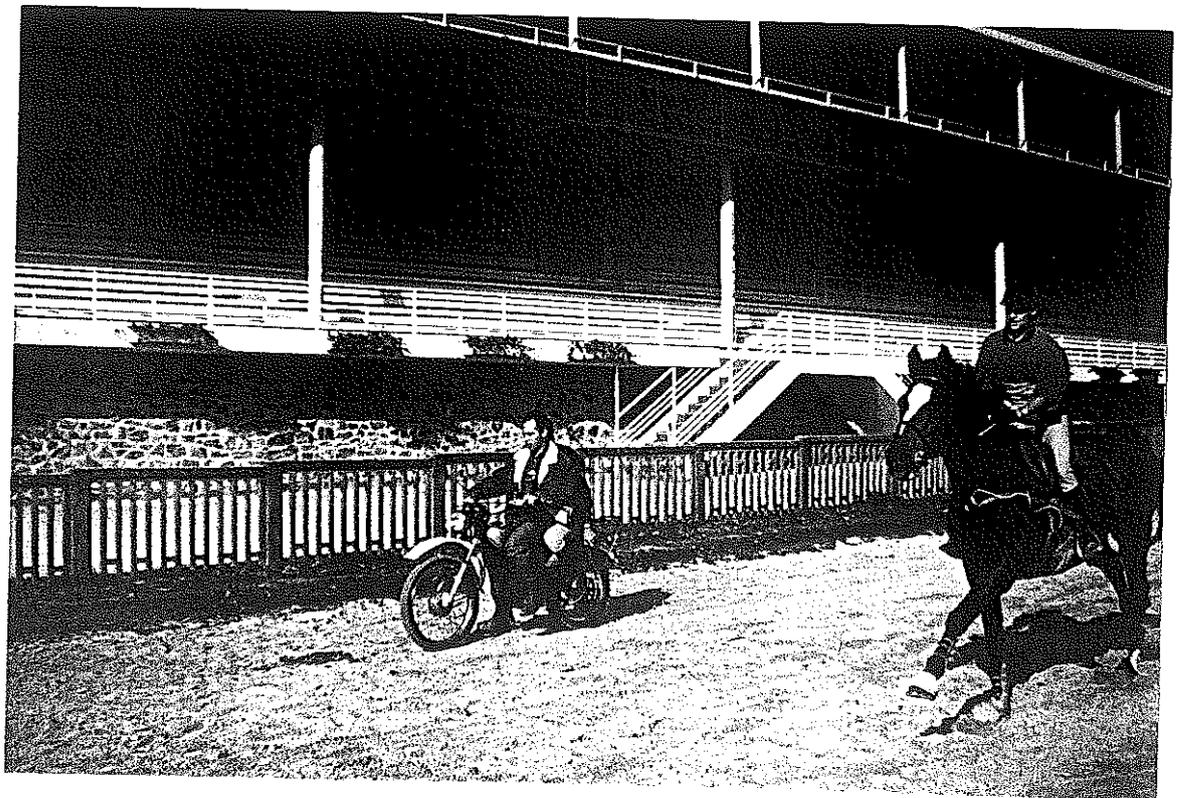


Figure 32 : Déroulement de l'épreuve

4.2.2 - Recueil des différents paramètres

4.2.2.1 - *La fréquence cardiaque*

Pour mesurer la fréquence cardiaque nous avons utilisé la méthode HOLTER. L'inconvénient majeur est la lecture différée mais cet appareil a été préféré aux mesures télémétriques en raison des facilités de manipulation. De plus le traitement des résultats est plus facile.

A) Théorie

a) *Rappels anatomiques*

Le coeur du cheval est suspendu par de gros vaisseaux et s'appuie sur le sternum. Situé de la troisième à la sixième côte, il est recouvert de chaque côté, par les poumons. (74)

Il pèse en moyenne 3,5 kg et présente la forme d'un cône à "base supérieure", dont le grand axe est légèrement incliné de gauche à droite. Malgré la masse musculaire importante, le coeur du cheval peut battre à une fréquence élevée procurant à l'animal un débit sanguin très important durant l'effort.

b) *technique*

* Principe de l'ECG

L'électrocardiogramme consiste à enregistrer l'activité électrique du coeur. Ce courant d'action, commun à tout travail musculaire, produit un champ électrique.

Un galvanomètre, dont les pôles sont reliés à des électrodes placées en des points déterminés du corps, mesure les variations de ce champ.

Lorsqu'une partie du myocarde devient négative, alors que le reste est positif, le coeur se comporte comme un dipôle c'est à dire comme un système à deux charges concentrées de polarités opposées.

Ainsi, l'onde de dépolarisation, issue du noeud sinusal et matérialisée par ce dipôle instantané, se propage à travers tout le myocarde.

Il agit comme une multitude de dipôles successifs : myocarde auriculaire droit puis gauche, noeud de Keith et Flack, faisceau de Hiss, myocarde ventriculaire, de l'intérieur vers l'extérieur.

*** Dérivations électrocardiographiques**

Chez le cheval, l'utilisation des dérivations précordiales semble très malaisée :

- d'une part, les groupes musculaires constitués par les pectoraux et les anconés sont d'une importance telle qu'ils limitent considérablement les territoires d'exploration.
- d'autre part les repères anatomiques sont peu précis, or de légères variations dans la position de l'électrode rendent le tracé inutilisable pour l'interprétation, que ce soit par rapport au tracé normal ou, par rapport à lui-même.

Par contre les dérivations monopolaires ou bipolaires sont couramment utilisées. Le choix de la dérivation varie avec les auteurs (30, 47, 71, 72).

*** Tracé électrocardiographique normal de cheval**

Le tracé électrocardiographique normal du cheval dépend des légères variations anatomiques rencontrées chez les différents individus. Il dépend aussi du choix des dérivations, cependant le schéma général reste le même.

- . onde P = dépolarisation auriculaire, généralement bifide en raison du temps mis par l'onde de dépolarisation pour se propager du noeud sinusal au myocarde auriculaire gauche.
- . complexe QRS = dépolarisation des ventricules
- . onde T = repolarisation ventriculaire

L'analyse morphologique des tracés est très malaisée. En effet, la polarité, l'amplitude et la forme des déflexions varient avec les techniques de dérivation. Dans notre étude, l'ECG sert uniquement à la mesure de la fréquence cardiaque et non à l'étude du fonctionnement du myocarde.

Les dérivations ont donc été choisies sans référence à la bibliographie, dans le seul but d'obtenir une trace interprétable pour le calcul de la fréquence cardiaque.



Dérivations D₁(Membres)

c) Matériel utilisé

* L'enregistreur

- *Principe de l'enregistrement magnétique*

L'enregistrement magnétique utilise la propriété de certains matériaux de conserver une aimantation durable après avoir été soumis à un champ magnétique.

Le ruban porteur du matériau magnétique défile devant un dispositif appelé tête d'enregistrement réalisant ainsi l'enregistrement. Le rôle de la tête est de créer un flux proportionnel au signal à enregistrer et de le

transmettre au ruban. Au cours de son passage, chaque point de la couche sensible primitivement neutre, acquiert et conserve un degré d'aimantation proportionnel à la valeur instantanée du flux au moment de son passage devant la tête d'enregistrement. On intercale un amplificateur faisant circuler vers la tête d'enregistrement un courant basse fréquence proportionnel aux signaux électrocardiographiques. La tête d'enregistrement est un minuscule électro-aimant, son bobinage reçoit la somme de 2 courants :

- . Le courant basse fréquence venant de l'amplificateur
- . Un courant de fréquence plus élevée (en général une centaine kHz) fournit par un oscillateur.

La majorité des systèmes de Holter enregistre en modulation d'amplitude, la modulation de fréquence posant de difficiles problèmes techniques. Les deux types de systèmes étant absolument incompatibles.

- Les enregistreurs

Ce sont des enregistreurs magnétiques portatifs pesant de 400 à 900 grammes fonctionnant à pile ou à batterie rechargeable. Ils enregistrent l'ECG sur une cassette ou une bande magnétique. Sur un patient ambulatoire, ils peuvent enregistrer, à très faible vitesse (1 à 2mm/s), deux dérivations simultanées de l'ECG pendant 24 heures consécutives.

La connaissance des données techniques de l'enregistrement est indispensable pour être sûr que certains impératifs ont bien été respectés.

Nous retiendrons parmi ceux-ci, que :

- La vitesse d'enregistrement doit être précisément réglée de façon à conserver constant le facteur de compression temporelle représenté par les vitesses entre le lecteur et l'enregistreur.

- La bande passante de l'enregistreur doit être comprise entre 0,05 et 80 Hertz (-3décibels) pour chaque voie, afin de restituer fidèlement le signal électrocardiographique et surtout les segments ST traités.
- L'impédance d'entrée de l'enregistreur doit être 100 à 1000 fois plus grande que celle des électrodes recueillant l'ECG afin d'avoir une bonne restitution de la morphologie du signal.

Si l'impédance d'entrée de l'amplificateur de l'enregistreur était plus faible que l'impédance des électrodes, on aurait apparition d'une onde S artéfactuelle à la suite du versant rapide négatif de l'onde R.

Dans les autres caractéristiques importantes nous retiendrons:

- . qu'à l'enregistrement, une piste est réservée au codage de l'heure, ce qui permet de relier précisément les événements ECG aux circonstances de la vie courante.
- . que tout enregistrement doit être réalisé au début par des signaux d'amplitude et de forme connues (de même que pour l'ECG standard).
- . que les amplificateurs de l'enregistreur et du lecteur doivent avoir une bonne linéarité et assurer un gain identique pour toutes les fréquences du signal ECG.

*** L'analyseur**

La bande magnétique une fois enregistrée à faible vitesse, est ensuite rembobinée rapidement sur l'analyseur qui permettra de l'étudier en temps accéléré.

L'analyseur permet de lire la bande enregistrée de 30 à 480 fois plus vite. Le temps minimum de lecture est donc compris entre 48 minutes et à peine plus de 3 minutes.

L'appareil de lecture est presque toujours muni d'un écran de visualisation sur lequel s'affichent les complexes cardiaques.

La plupart des appareils s'en tiennent au principe d'affichage originel de Holter, c'est à dire que chaque QRS déclenche son affichage sur l'écran, et que l'ensemble des QRS se superpose.

Cet affichage peut être modifié de telle sorte que le balayage ne se déclenche qu'un complexe sur deux ou trois, ce qui amène deux ou trois complexes consécutifs sur l'écran d'affichage.

L'écran peut, lui, être de type tube de télévision (magnétique) ou de type tube d'oscilloscope (statique) ce dernier donnant en général une meilleure définition.

B) Pratique

Nous avons travaillé avec des électrodes rectangulaires en argent fixées sur une sangle élastique destinée à les maintenir en place sans gêner les mouvements du cheval.

Les dérivations utilisées ont été choisies arbitrairement de façon à obtenir un tracé interprétable pour le calcul de la fréquence cardiaque en éliminant le plus possible les interférences myographiques rendant le tracé complexe au garrot.

Pour simplifier nous avons retenu des dérivations au niveau du passage de sangle, l'une à la verticale du garrot (10 cm au dessus du sternum), l'autre au garrot (appendice xiphoïde).

Une fois cette sangle en place, le cheval est ensuite harnaché normalement. Le holter est lui aussi fixé à l'aide d'une sangle élastique dans le dos du cavalier . (fig.29)

Une fois le cavalier à cheval, les électrodes sont branchées au holter ce qui déclenche automatiquement le début de l'enregistrement. La lecture de la bande sera faite ultérieurement au laboratoire.

4.2.2.2 - Acide lactique

Le prélèvement s'effectue au niveau de la veine jugulaire au repos après chaque palier. Cette piqûre est non traumatisante et peut donc être répétée sans aucun problème. Le sang est recueilli dans un tube hépariné.

On prélève le plus rapidement possible 100 microlitres de sang qui sont déprotéinisés sur le terrain par 500 microlitres d'acide perchlorique galcial 0,6 N.

Le dosage est effectué ultérieurement au laboratoire (technique de HOHORSTH) (32).

Le déprotéinisé est centrifugé, le surnageant est recueilli et dosé avec un coffret BOEHRINGER référence 256773, suivant le protocole ci-dessous :

En cas d'impossibilité de dosage immédiat, le surnageant peut être conservé six jours à 4°C.

	Témoin	Dosage
Tampon carbonate glutamate	1 cc	1cc
Surnageant	200 ul	200 ul
Mélanger		
NAD	200 ul	200 ul
Enzyme LDH OU (NH ₄) ₂ SO ₄	20 ul (NH ₄) ₂ SO ₄	20 ul LDH

Incuber les tubes réactionnels pendant 15 mn à température ambiante et lire immédiatement à 340 nm .(Spectrophotomètre LKD, Ultrolab system 2074, Bromma, Suède).

Les dosages sont effectués par rapport à une solution étalon du commerce (BOEHRINGER, MANNHEIM, PRECINORM).

La précision de la méthode est 0,05 mmol.l⁻¹, soit un pourcentage de plus ou moins 1,5 % exprimé par rapport à une moyenne de 3,5 mmol.l⁻¹.

4.3 - RESULTATS

4.3.1 - Expression des Résultats

La fréquence cardiaque et la lactatémie sont exprimées en fonction de la puissance et du temps.

* Au cours des épreuves triangulaires

$$L = f(V)$$

La détermination de VS_4 est faite par interpolation linéaire entre les 2 valeurs de L encadrant une lactatémie de 4 mmol.l⁻¹ (méthode des segments) (fig 33)

* Au cours des épreuves rectangulaires

$L = F(t)$ au cours des différents essais, aux différentes vitesses de course.

Les déterminations de "VcL" et de la lactatémie "LV_C" sont faites à partir des expressions utilisées chez l'homme (fig 34 et 35).

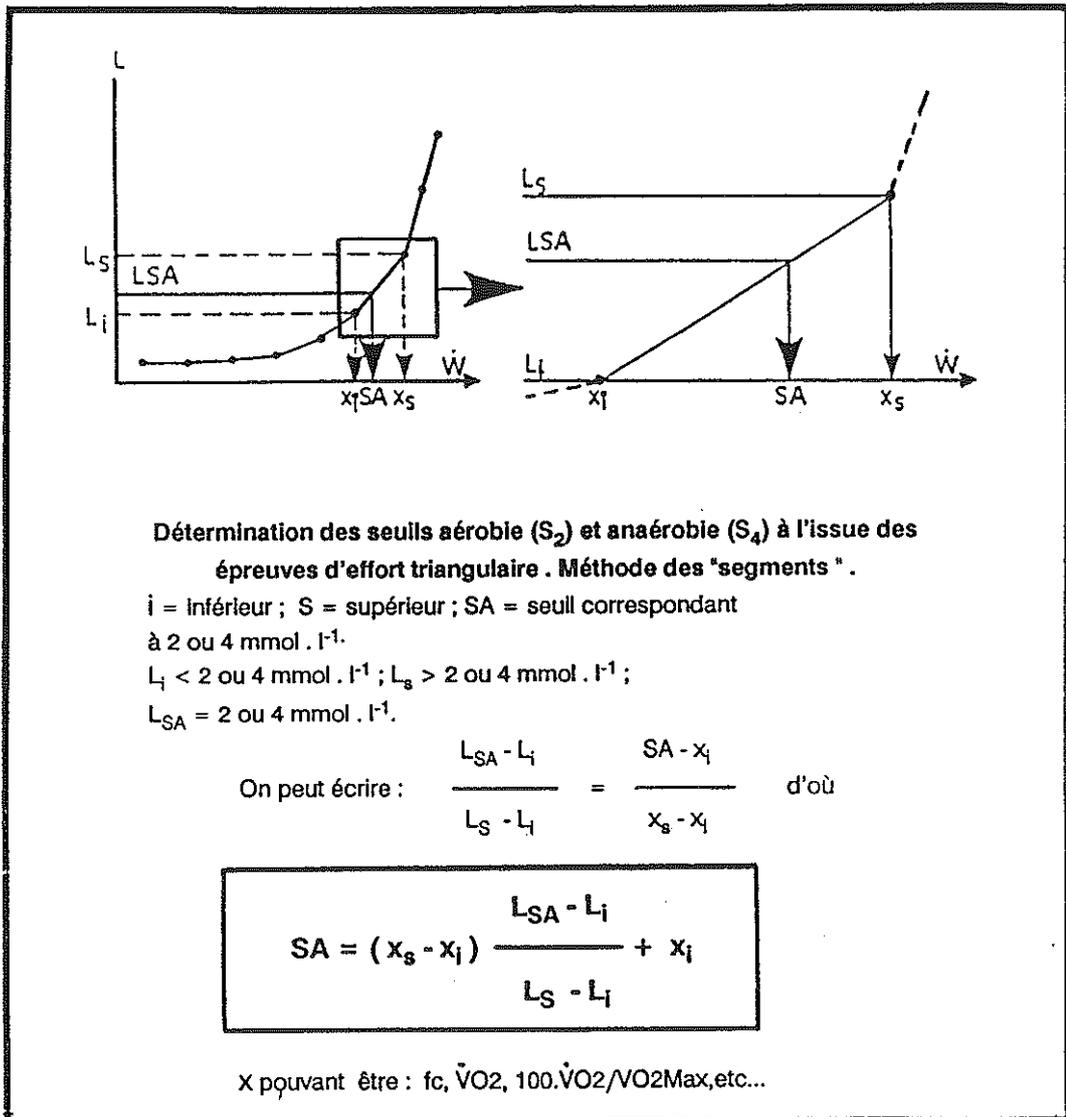


figure 33

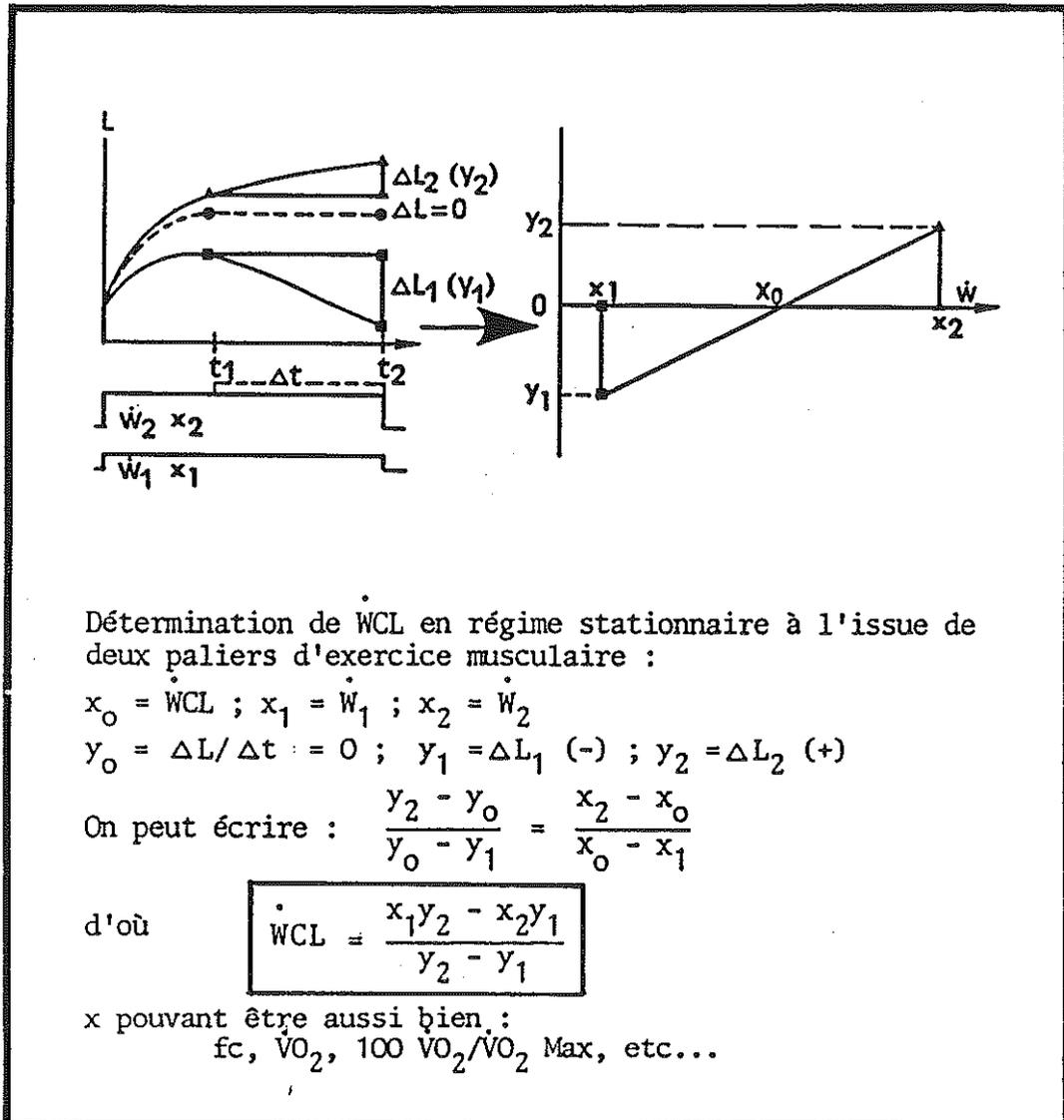


Figure 34

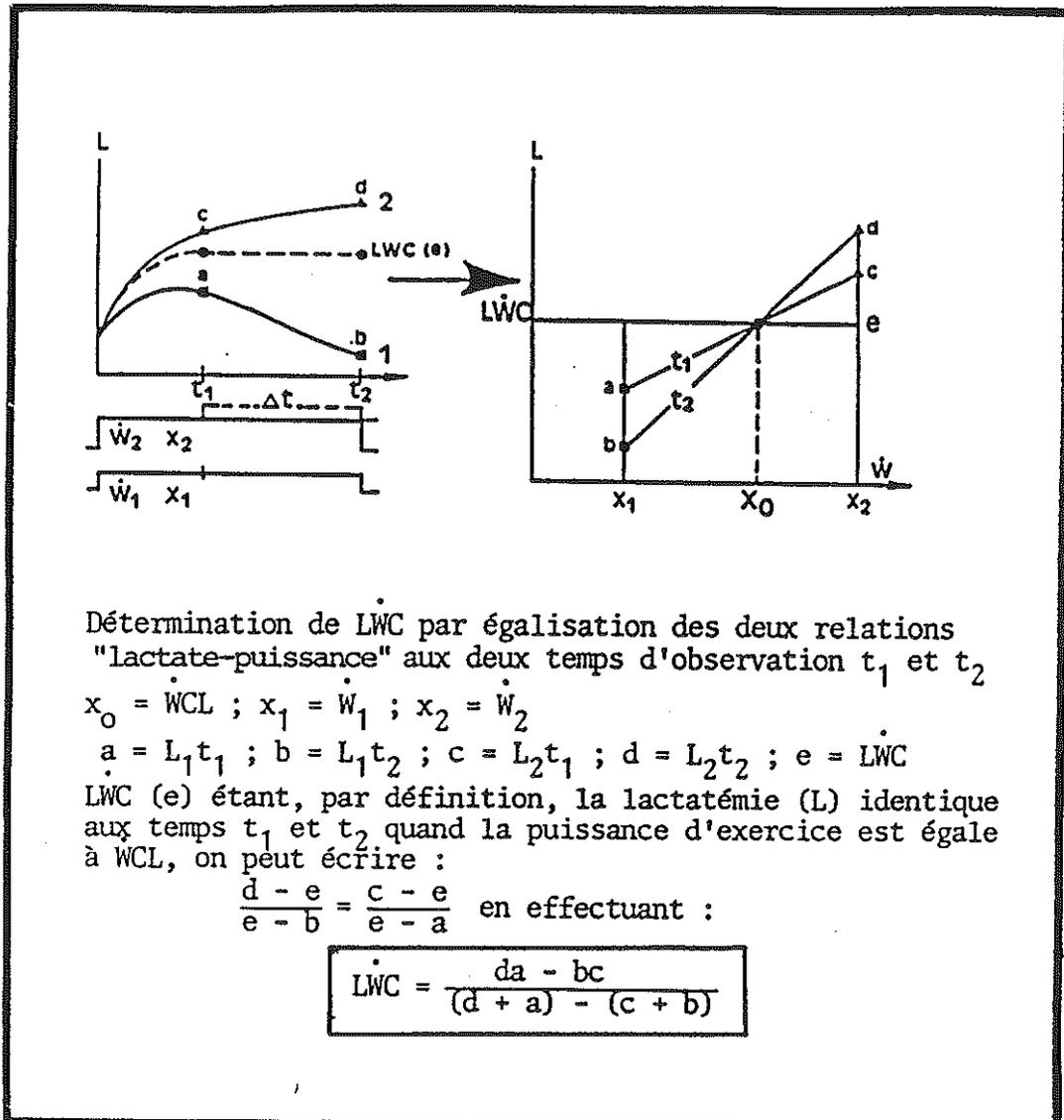


Figure 35

4.3.2 - Valeurs numériques

4.3.2.1 - *Epreuves Triangulaires*

a) Valeurs observées et vitesses " seuils" (VS₂ et VS₄)

Le tableau VIII montre l'ensemble des mesures effectuées. La fréquence cardiaque et la lactatémie de fin de paliers de vitesse (2 minutes de course avec un arrêt d'une minute entre les paliers) sont rapportées chez chacun des 5 chevaux. Les vitesses de course " VS₂" : la vitesse de course entraînant une lactatémie de 2 mmol.l⁻¹ et "VS₄" la vitesse entraînant une lactatémie de 4 mmol.l⁻¹ sont également représentées en bas du tableau avec les fréquences cardiaques correspondantes.

Les grandeurs moyennes représentatives de cet échantillonnage de 5 chevaux sont ici :

$$\begin{aligned} & \text{(moyenne } \pm \text{ écart type)} \\ \overline{VS_2} &= 22,84 \pm 1,08 \text{ km.h}^{-1} \\ \overline{VS_4} &= 31,23 \pm 1,32 \text{ km.h}^{-1} \end{aligned}$$

avec des fréquences cardiaques correspondantes

$$fc \text{ VS}_2 = 113 \pm 8 \text{ bpm}$$

$$fc \text{ VS}_4 = 138 \pm \text{ bpm}$$

bpm = battements par minute

b) Fréquence cardiaque en fonction de la vitesse de course

Le tableau IX montre les régressions fc - Vitesse de course chez les 5 chevaux.

La même régression pour l'ensemble des valeurs recueillies (chez les 5 chevaux au cours des 3 différents paliers de vitesse : 20 30 et 40 km.h⁻¹) est donnée en bas du tableau et représenté par la figure 36. Cette figure

CHEVAUX	.1.		.2.		.3.		.4.		.5.		\bar{fc}	\bar{L}
	fc	L										
Vit .km .h-1												
0	38	0.5	56	0.66	100	0.87	83	0.95	80	0.45	71 ± 24	0.69 ± 0.22
20	105	1.2	96	1.42	100	1.7	110	1.5	110	1.24	104 ± 6	1.41 ± 0.20
30	150	3.1	125	3.12	135	4.02	130	3.41	130	4.09	134 ± 10	3.55 ± 0.48
40	180	6.9	170	6.95	165	6.69	150	6.55	150	7.14	163 ± 13	6.85 ± 0.23
	fc	Vit.	\bar{fc}	$\bar{Vit.}$								
S2	124	24.21	106	23.41	105	21.29	115	22.62	115	22.67	113	22.84
S4	154	32.37	139	32.3	133	29.91	134	31.88	129	29.68	± 8	± 1.08
											138	31.23
											± 10	± 1.32

TABLEAU VIII : Epreuve d'effort triangulaire chez 5 chevaux

Fréquence Cardiaque et Lactatémie (L en mmol.l-1)

3 paliers successifs de 2 mn de course séparés par 1 mn de repos

S2 = "Seuil aérobie " S4 = " Seuil anaérobie "

regressions chevaux N°	$y = a + b x \pm \sqrt{x}$	singification de la régression		
	y = fc x = vit. km.h-1	n	x	p
1	$y_1 = 33 + 3,7500x \pm 6$	3	0,9934	<0,01
2	$y_2 = 19 + 3,7000x \pm 7$	3	0,9923	<0,01
3	$y_3 = 36 + 3,25000x \pm 2$	3	0,9990	<0,001
4	$y_4 = 70 + 2,0000x \pm 0$	3	1,0000	<0,001
5	$y_5 = 70 + 2,0000 x \pm 0$	3	1,0000	<0,001
tous	$y_t = 46 + 2,9400x \pm 10$	15	0,9369	<0,001

Tableau IX
FREQUENCE CARDIAQUE
EPREUVE TRIANGULAIRE
fc en fonction de la vitesse de course
(mesures en fin de palier de 2 minutes de course)

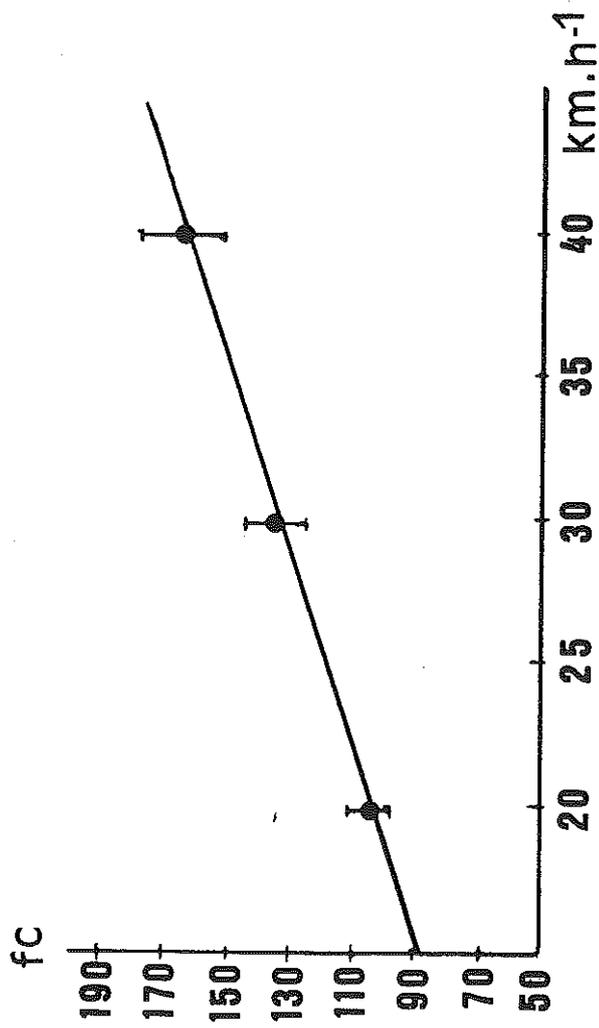


Figure 36 : Epreuve d'effort triangulaire: fréquence cardiaque fc en fonction de la vitesse de course. Mesures en fin de paliers de 2 minutes (5chevaux). 3 paliers successifs séparés par une minute de repos.

montre ainsi l'excellente relation linéaire entre fréquence cardiaque et vitesse de course dans l'intervalle des mesures effectuées.

c) Lactatémie en fonction de la vitesse de course

Construite à partir des données du tableau VIII, la figure 37 montre l'évolution de la lactatémie avec la vitesse de course et la détermination des seuils VS_2 et VS_4 . La figure 38 quant à elle, montre l'accroissement de la lactatémie (ΔL) entre chaque palier de vitesse éliminant ainsi l'effet d'accumulation du lactate habituellement exprimé par la relation curviligne $L = f(V)$ (fig 37).

L'intérêt de cette représentation de $\Delta L = f(V)$ et sa forme linéaire permettent la détermination de la vitesse théorique à partir de laquelle on observe un accroissement de la lactatémie.

4.3.2.2 - *Epreuves Rectangulaires*

- Le tableau X montre l'ensemble des valeurs de la fréquence cardiaque observées au repos et à la fin des 3 échelons de vitesse de course au cours des différents essais. La figure 39 représente ces différentes observations en fonction du temps.

- Le tableau XI et la figure 40 représentent l'ensemble des valeurs de la lactatémie observée au repos et à la fin de 3 échelons de vitesse de course dans les mêmes conditions de mesure de la fréquence cardiaque au cours des différents essais.

La figure 40 montre l'évolution de cette lactatémie au cours des essais de vitesse inférieure (30 km.h^{-1}) et supérieure (40 km.h^{-1}).

a) Calcul de la vitesse critique " V_{cL} " et de la lactatémie correspondant à la vitesse critique " L_{Vc} "

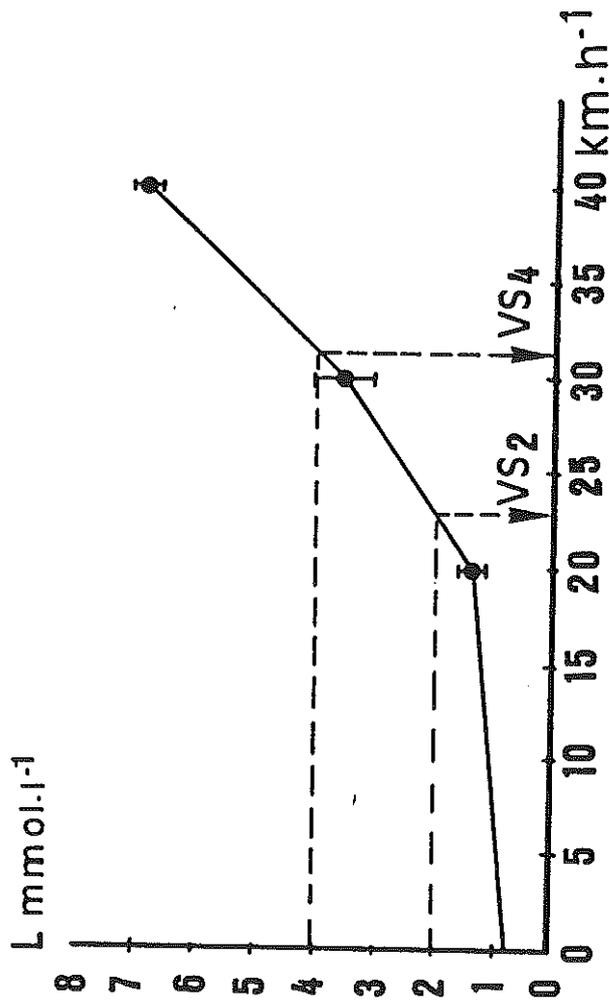


Figure 37 : Epreuve d'effort triangulaire chez 5 chevaux :
3 paliers de vitesse de course de 2 minutes chacun à 20, 30, 40 km.h⁻¹, séparés par un intervalle de repos de 1 minute. "L" = lactatémie observée au repos (vitesse 0) et en fin de chaque palier.
"S₂" : seuil aérobie - moyenne 22,84 km.h⁻¹ (valeurs extrêmes 21,29 et 24,21 km.h⁻¹).
"S₄" : seuil anaérobie - moyenne de 31,23 km.h⁻¹ (valeurs extrêmes 29,68 et 32,37 km.h⁻¹).

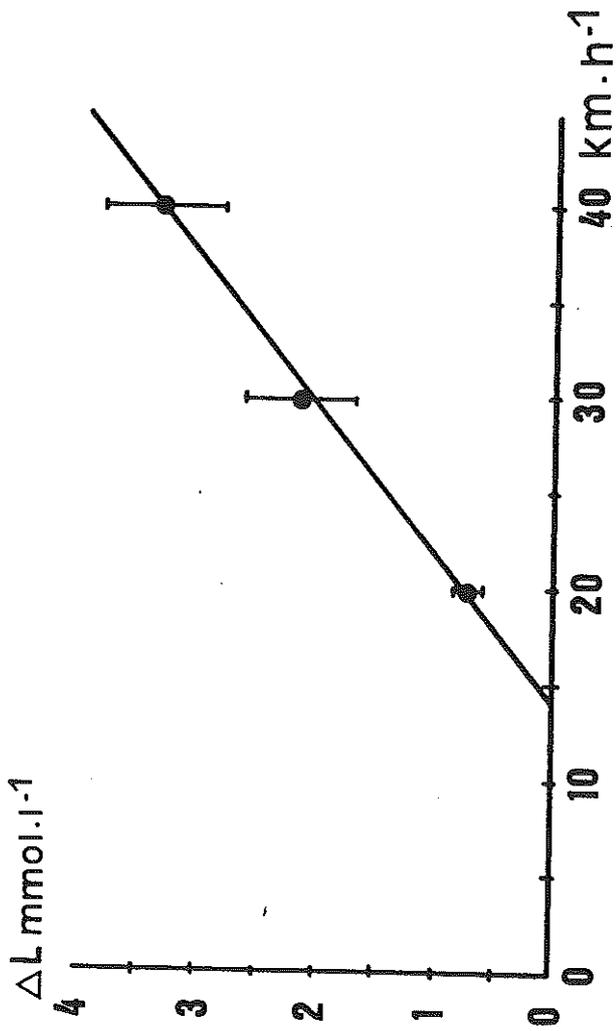


Figure 38 : Epreuve d'effort triangulaire chez 5 chevaux : 3 paliers de course de 2 minutes chacun, à 20, 30, 40 km.h⁻¹, séparés par un intervalle de repos d'une minute.

ΔL = accroissement de la lactatémie entre les différents paliers de vitesse ΔL = 0 pour x = 14,03 km.h⁻¹.

$$y = - 1,80 + 0,12860 x \pm 0,39 \quad n = 15 \quad r = 0,9457 \quad p < 0,001$$

Temps min. chevaux	0	2	5	8
vitesse de course : 30 km.h-1				
1	53	140	160	150
2	49	137	143	150
3	92	135	150	150
4	112	140	140	140
5	47	128	135	150
\overline{Y}	71	136	146	148
∇Y	30	5	10	4
vitesse de course : 35 km.h-1				
1	52	133	170	167
2	55	150	150	160
3	40	157	165	165
4	120	145	150	150
5	58	150	165	172
\overline{Y}	65	147	160	163
∇Y	31	9	9	8
vitesse de course : 40 km.h-1				
1	42	155	180	185
2	46	205	200	205
3	50	179 x	180 x	180 x
4	52	140	150	155
5	41	195	200	205
\overline{Y}	46	175	182	186
∇Y	5	27	20	21

x : valeurs obtenues par extrapolation

TABLEAU X
FREQUENCE CARDIAQUE EN FONCTION DU TEMPS
(entre 0 et 8 mn) ET DE LA VITESSE DE COURSE

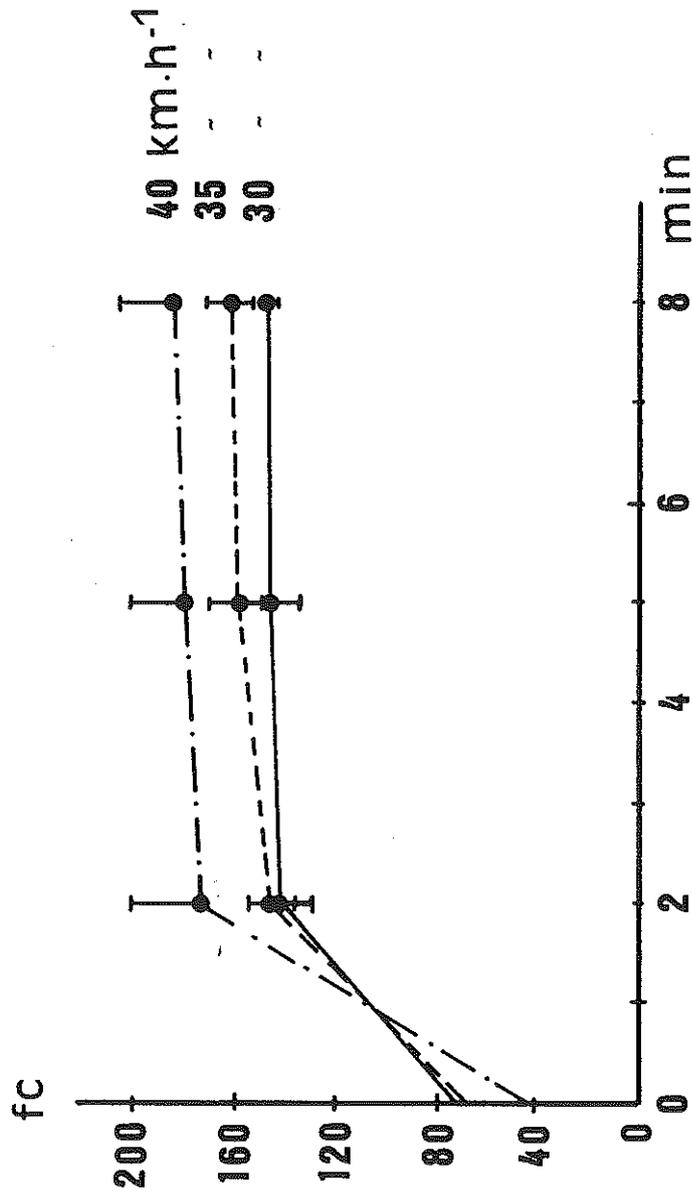


Figure 39 : Fréquences cardiaques chez le cheval en fonction de la vitesse de course et du temps (5 chevaux).

Mesures au repos et en fin d'échelons : régime rectangulaire.

Temps min. chevaux	0	2	5	8
vitesse de course : 30 km.h-1				
1	0.74	1.3	1.63	2.09
2	0.69	1.84	2.95	2.9
3	1.28	2.46	3.35	2.91
4	0.6	2.2	3.47	3.05
5	0.59	2.1	2.41	2.27
\bar{Y}	0.78	1.98	2.76	2.64
\sqrt{Y}	0.29	0.44	0.76	0.43
vitesse de course : 35 km.h-1				
1	0.49	1.89	2.8	2.23
2	0.62	3.33	8.3 X1	14.23 X2
3	0.51	2.55	4.6	3.77 X3
4	1.12	3.05	3.62	4.45
5	0.87	3.42	4.9 X4	4.8 X5
\bar{Y}	0.72	2.85		
\sqrt{Y}	0.27	0.63		
vitesse de course : 40 km.h-1				
1	0.4	3.07	6.62	4.14
2	0.59	6.25	8.71	9.29
3	0.42	3.34	3.87	7.66
4	0.73	6.12	7.68	8.92
5	0.8	6.83	11.9	13.65
\bar{Y}	0.58	5.12	7.16	8.73
\sqrt{Y}	0.18	1.77	3.48	3.42

X1 et X2 cheval emballé

X3 réserve sur cette gandeur car forte différence

entre 2 prélèvements identiques au même moment

X4 et X5 difficultés de lecture au spectrophotomètre

TABLEAU XI
LACTATEMIE EN FONCTION DU TEMPS
(entre 0 et 8 mn) ET DE LA VITESSE DE COURSE

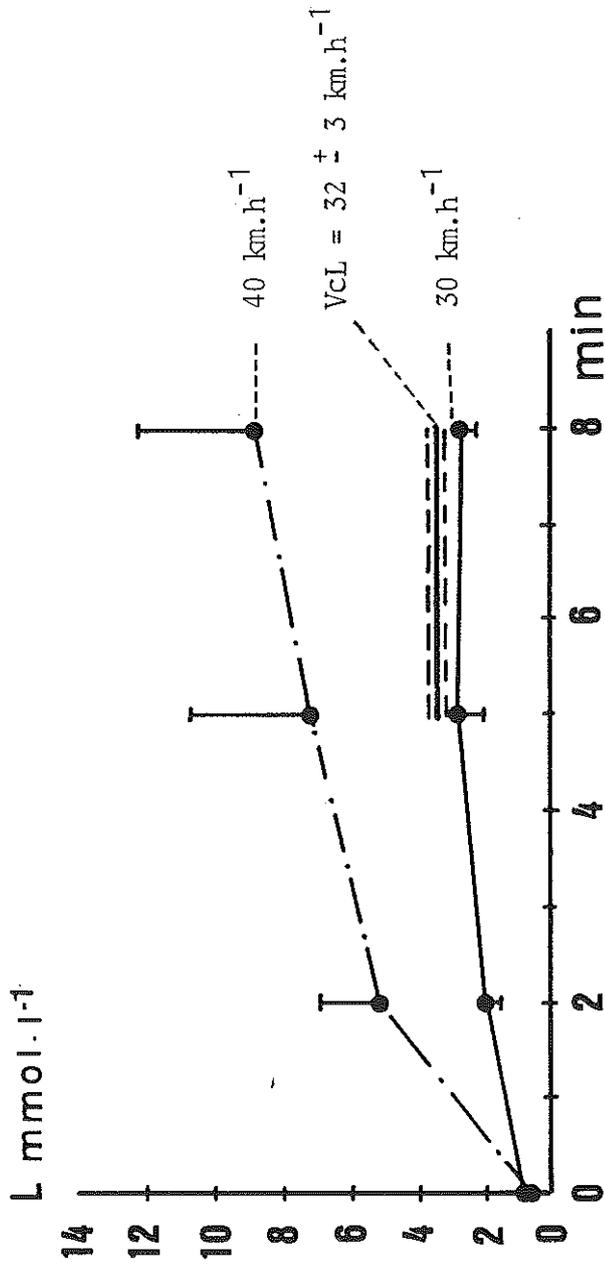


Figure 40 : Lactatémie chez le cheval en fonction du temps et de la vitesse de course. Représentation de la lactatémie stabilisée entre 5 et 8 minutes de course (LVc) correspondant à la vitesse critique lactate (VcL) calculée à partir de 2 vitesses de course inférieure et supérieure. Régime rectangulaire : mesures au repos et en fin d'échelons.

Ces calculs sont effectués à partir des données recueillies entre la 5ème et la 8ème minute de course.

- Pour la vitesse inférieure (V_i) c'est la vitesse de course la plus élevée donnant une évolution négative de la lactatémie entre la 5ème et la 8ème minute.

- Pour la vitesse supérieure (V_s) c'est la vitesse la moins élevée donnant une évolution positive de la lactatémie dans le même temps.

Trois cas échappent toutefois à ces règles :

. Le cheval 2 qui s'est emballé au delà de la 2ème minute de course quand il devait courir à 35 km.h^{-1} (voir X1 et X2 dans le **tableau XI**).

. Le cheval 3 chez qui la lactatémie à la 8ème minute de course à 35 km.h^{-1} est également donnée avec réserve (voir X3 dans le **tableau XI**)

. Le cheval 5 chez qui l'on fait la même réserve à cette même vitesse de 35 km.h^{-1} (voir X4 et X5 dans le **tableau XI**).

Le **tableau XII** donne les différentes valeurs retenues, à partir desquelles les calculs ont été effectués.

. V_{cl} = la Vitesse Critique Lactate a été calculée selon l'expression donnée avec la **figure 34**.

. L_{vc} = la Lactatémie correspondant à V_{cl} a été calculée selon l'expression donnée avec la **figure 35**.

Données chevaux	Vi km h-1	L5	L8	L	VS km.h-1	L5	L8	L
1	35	2,8	2,23	-0,57	40	3,62	4,14	+0,52
2	30	2,95	2,9	-0,05	40	8,71	9,29	+0,58
3	30	3,35	2,91	-0,44	40	3,87	7,66	+3,79
4	30	3,47	3,05	-0,42	35	3,62	4,45	+0,83
5	30	2,41	2,27	-0,14	40	11,9	13,65	+1,75

L5 = lactatémie à la 5ème minute de course

L8 = lactatémie à la 8ème minute de course

Ces valeurs peuvent évidemment être retrouvées dans le tableau XI

TABLEAU XII

Chevaux	VcL km.h-1	LVC mmol.-1
1	37,61	3,23
2	30,79	3,41
3	31,04	3,40
4	31,68	3,52
5	30,74	3,11
\bar{X}	32,37	3,33
\sqrt{X}	2,95	0,16

Valeurs de Vcl (vitesse Critique Lactate)
et LVC (Lactatémie correspondant à VcL)
chez 5 chevaux

Tableau XIII

Le **tableau XIII** rapporte ses différentes valeurs.

b) Fréquence cardiaque et Vitesse Critique VcL

La fréquence cardiaque correspondant à VcL : fc_{VcL} est calculée à partir des régressions Fc - Vitesse en régime d'exercice rectangulaire (fc = moyenne des valeurs observées à la 5ème minute et à la 8ème minute de course).

Ces régressions sont données dans le **tableau XIV**.

4.3.2.3 - Comparaisons entre les épreuves d'effort triangulaire et les épreuves d'effort rectangulaire

a) VS₄ et VcL

Ces 2 modes d'approche de la vitesse maximale en régime aérobie strict donnent des résultats très voisins. Comme le montre le **tableau XV**, malgré des différences individuelles, il n'est pas possible d'observer de différences entre les vitesses moyennes VS₄ prenant donc en référence statistique la vitesse correspondante à une lactatémie de 4 mmol.l⁻¹ et VcL la vitesse critique calculée par comparaison du sujet à lui-même au cours de deux exercices faible et fort.

Test de t pairé sur les différences individuelles :

$$t = -1,0105 \quad n = 5 \quad P > 0,20$$

b) Référence 4 mmol.l⁻¹ et LVc

A l'inverse de ce que l'on observe pour VS₄ et VcL, le **tableau XVI** montre l'existence d'une différence significative entre la lactatémie de 4 mmol.l⁻¹ admise en référence statistique (S4) et LVc, la lactatémie correspondant à la vitesse critique calculée entre la 5ème et la 8ème

CHEVAUX	Régressions	significations		
	$Y_i = a + bX \pm \sqrt{X}$	n	r	p
	$Y = fc \quad X = \text{Vitesse (km .h-1)}$			
1	$Y_1 = 71 + 2.8 X \pm 0$	5	1.000	---
2	$Y_2 = - 28 + 5.6 X \pm 16$	5	0.9245	<0.01
3	$Y_3 = 60 + 3 X \pm 0$	5	1.000	---
4	$Y_4 = 102 + 1.3 X \pm 3$	5	0.9549	<0.01
5	$Y_5 = - 38 + 6 X \pm 3$	5	0.9970	<0.001

**TABLEAU XIV : fréquence cardiaque en fonction de la vitesse de course:
régressions et significations .**

Chevaux	VS4	VcL	Différence VS4 - VcL
1	32,37	37,61	- 5,24
2	32,30	30,79	1,51
3	29,91	31,04	-1,13
4	31,88	31,68	0,20
5	29,68	30,74	-1,06
<u> </u> x	31,23	32,37	-1,14

Tableau XV : Comparaison entre VS4 et VcL

Chevaux	Lactatémie		Différence LVc - 4
	LVc	référence	
	ép. rectangulaire	ép. triangulaire	
1	3.23	4	-0.77
2	3.41	4	-0.59
3	3.4	4	-0.6
4	3.52	4	-0.48
5	3.11	4	-0.89
\bar{Y}	3.33	4	-0.67
\sqrt{Y}	0.16	0	0.16

TABLEAU XVI : comparaison
entre la référence de 4 mmol.l-1 et LVc

Chevaux	fréquence cardiaque		Différence fcVcL - fc VS4
	fc VcL	fcVS4	
	ép. rectangulaire	ép. triangulaire	
1	176	154	22
2	145	139	6
3	153	133	20
4	143	134	9
5	146	129	17
\bar{Y}	153	138	15
\sqrt{Y}	14	10	7

TABLEAU XVII : comparaison
entre fcVS4 et fcVcl

minute d'un exercice rectangulaire. LVc est inférieure chez les 5 chevaux.

Test de t pairé sur les différences individuelles :

$$t = -9,1603 \quad n = 5 \quad p < 0,001$$

c) Fc VS₄ et fcVcL

Comme pour la lactatémie, le **tableau XVII** montre l'existence d'une différence significative : toutes les valeurs individuelles de FcVcL sont supérieures à fc VS₄.

La moyenne des différences : 15 ± 7 bpm est hautement significative.

Test de t pairé sur les différences individuelles :

$$t = 4,7422 \quad n = 5 \quad p < 0,01$$

4.3.2.4 - *Accroissement de la lactatémie en fonction de la vitesse de course au cours d'échelons carrés indépendants.*

Si l'on prend en compte les premiers échelons de course effectués au cours des épreuves triangulaires et rectangulaires et que l'on considère l'accroissement de la lactatémie L au cours des 2 minutes de course en fonction de la vitesse, la relation ΔL - Vitesse est donnée par la **figure 41** :

$$y = 0,66 + 1,3692 \cdot 10^{-3} e^{0,1987 x}$$

avec

$$y = \Delta L$$

x = la vitesse de course en km.h⁻¹

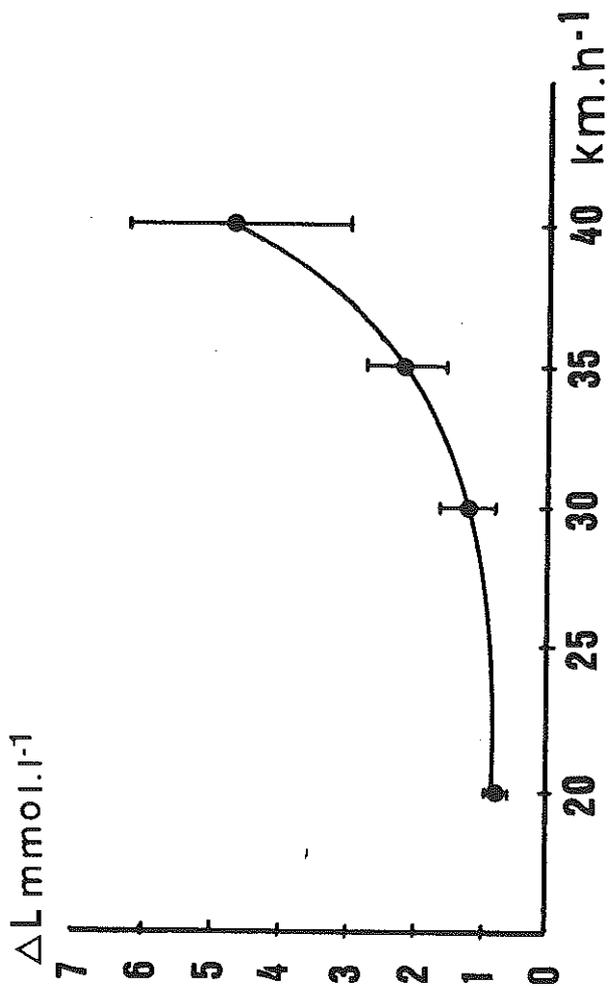


figure 41 : Accroissement de la lactatémie chez le cheval (ΔL) (2' - 0)
au cours d'un échelon carré de course de 2 minutes en fonction
de la vitesse (5 chevaux pour 4 vitesses de courses : 20, 30, 35
et 40 km.h⁻¹).

$$y = 0,66 + 1,3692 \cdot 10^{-3} e^{0,1987 x} \quad \text{avec } y = \Delta L \quad \text{et } x = \text{vitesse en km.h}^{-1}.$$

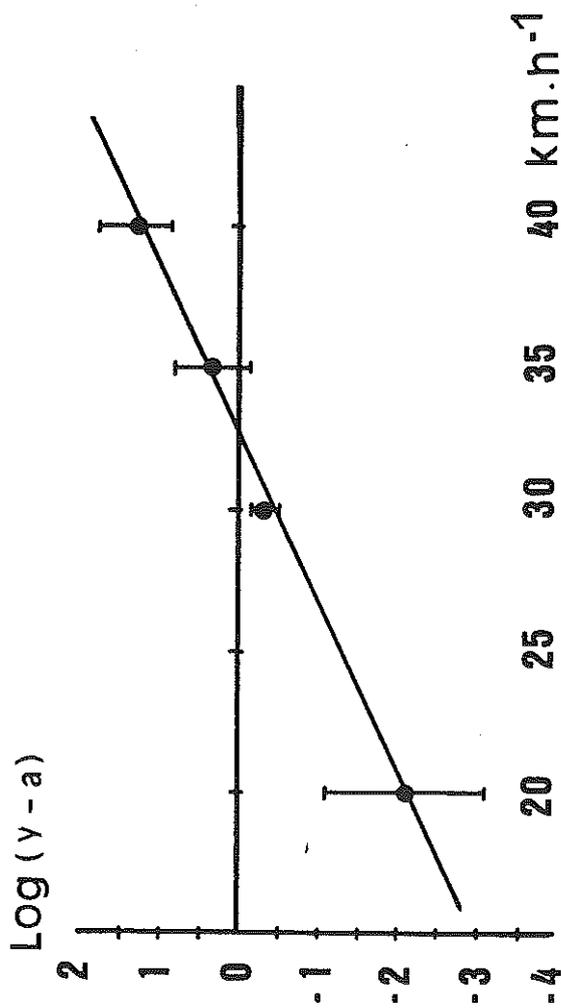


figure 42 : Représentation semi-logarithmique de l'accroissement de la lactatémie ΔL chez le cheval au cours d'un échelon carré de course de 2 minutes en fonction de la vitesse de course (5 chevaux pour 4 vitesses de course : 20, 30, 35 et 40 km.h⁻¹)
 $\log (y-a) = \log(\Delta L-a)$, a étant l'ordonnée pour $x = 0$ de l'exponentielle croissante représentative de l'évolution individuelle de L en fonction de la vitesse. (cf figure 41)

La représentation semi-logarithmique de ces observations faite sur la **figure 42** confirme l'expression exponentielle croissante la relation :

$$y = -5,46 + 0,16742 x \pm 0,56$$

avec

$$y = \log (\Delta L - a)$$

(a étant égal à 0,66 l'ordonnée à l'origine de l'exponentielle correspondante)

et

$$x = \text{la vitesse de course en km.h}^{-1}$$

Les **figures 43, 44** et le **tableau XVIII** confirment qu'une représentation exponentielle individuelle est également possible pour chacun des chevaux.

Deux groupes peuvent alors être constitués :

Le premier groupe avec les chevaux 1 et 3, le deuxième avec les chevaux 2,4 et 5.

* chevaux 1 et 3 :

$$y_{1+3} = 0,65 + 1,5902.10^{-3}e^{0,1804x}$$

* chevaux 2,4 et 5 :

$$y_{2+4+5} = 0,67 + 1,3550.10^{-3} e^{0,2054x}$$

avec

$$y = \Delta L$$

et

$$x = \text{vitesse de course en km.h}^{-1}$$

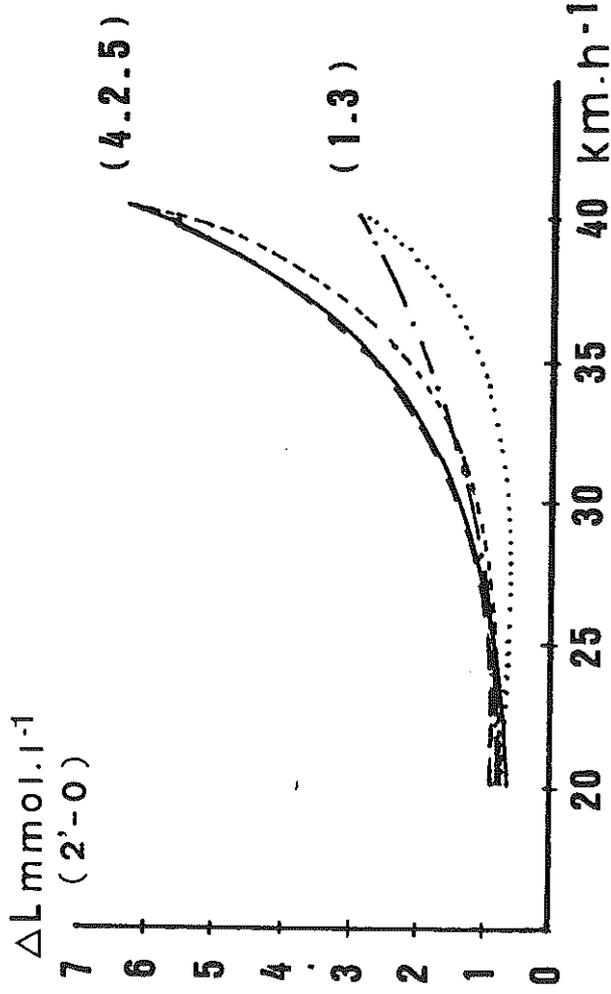


Figure 43 : Accroissement de la lactatémie chez chacun des chevaux au cours d'un échelon carré de course de 2 minutes en fonction de la vitesse.

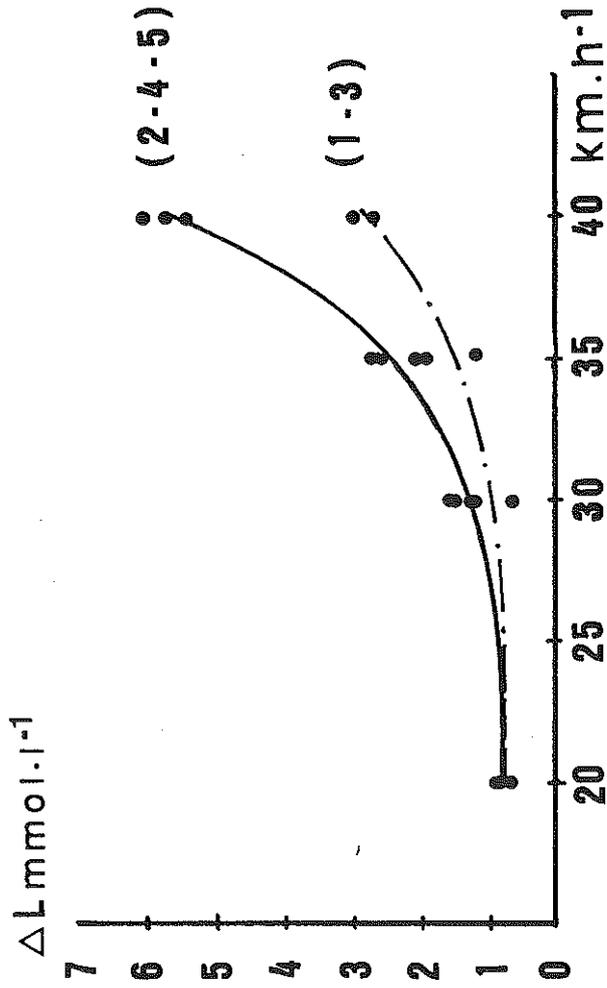


Figure 44 : N° 1 et 3 $y = 0,65 + 1,5902 \cdot 10^{-3} x$ $e^{0,1804 x}$

N° 2, 4 et 5 $y = 0,67 + 1,3550 \cdot 10^{-3} x$ $e^{0,2054 x}$

$y = L$ $x = \text{vitesse en km.h}^{-1}$

subdivision en deux groupes de chevaux supposés différents.

Chevaux	relations exponentielles y en fonction de x
1	$y_1 = 0,59 + 3,5408.10^{-5} e^{0,2746 x}$
3	$y_3 = 0,53 + 2,7824.10^{-2} e^{0,1117 x}$
4	$y_4 = 0,73 + 4,0315.10^{-4} e^{0,2337 x}$
2	$y_2 = 0,55 + 3,0166.10^{-3} e^{0,1860 x}$
5	$y_5 = 0,76 + 1,2517.10^{-3} e^{0,2086 x}$

Tableau XVIII

Expressions individuelles de l'accroissement de la lactatémie (ΔL) au cours d'échelons carrés de course de 2 minutes en fonction de la vitesse $y = \Delta L \text{ mmol.l}^{-1}$
 $x = \text{vitesse de course en km.h}^{-1}$

V

DISCUSSION

V - DISCUSSION

Jusqu'à présent les travaux concernant le comportement de la lactatémie chez le cheval, ont toujours été réalisés au cours d'exercices de forme triangulaires, ou du moins ont-ils été exploités en tant que tels.

En effet la plupart des observations faites l'ont été à partir de protocoles à charge progressive avec des temps d'interruption fixes entre les paliers de vitesse pour permettre des prélèvements de sang (5,6,8,12,33,46,53,77,82,84)

D'autres travaux ont comporté des séries d'échelons de vitesse sans pour autant que les expérimentateurs ne traitent leurs observations en prenant en compte les variations de la lactatémie avec le temps au cours de leurs séries d'essais.(65)

La variation de la lactatémie n'a donc été considérée qu'en fonction de la vitesse c'est à dire en fonction de la dépense énergétique (puissance développée ou vitesse de course) ou de la fréquence cardiaque qui évolue comme elles de façon linéaire. L'effet du temps n'a donc pas été vraiment pris en considération.

A l'image de ce qui a été fait chez l'homme (CHASSAIN et coll. (22) (23) (70)) le présent travail a eu pour objet l'observation de la lactatémie en régime d'activité physique discontinu constant au cours de plusieurs niveaux de vitesses (ou puissances ou fréquences cardiaques) de course chez le cheval.

Les mesures ont été effectuées en vue de :

- a) - L'observation de la lactatémie dans ces conditions.
- b) - La détermination de la vitesse (ou puissance ou f_c) de course critique.
- c) - L'approche de la signification biologique de VS_4 , la vitesse au seuil anaérobie mesurée habituellement au cours d'un exercice triangulaire, VS_4 , qui est l'équivalent statistique de cette vitesse critique.

d) - La recherche d'un test physiologique d'aptitude à une forme de course, test, qui serait à la fois le plus court et le plus discriminant possible : ceci étant l'objectif pratique de ces essais .

Une observation de l'accroissement de la lactatémie a donc été faite sur des échelons de vitesse carrés, indépendants (les premiers de chaque essai enchaînés de façon triangulaire ou rectangulaire).

5.1 - PROTOCOLES

Les exercices triangulaires ont été effectués en respectant la durée des différents paliers de vitesse : 2 minutes chacun, ce qui n'a pas toujours été le cas dans la littérature. (5,33,46,48,65,82)

Ce respect strict des temps d'effort explique probablement le bon ajustement linéaire de l'accroissement de la lactatémie entre les différents paliers de vitesse (que l'on peut observer sur la figure 38) et l'excellente régression fréquence cardiaque - vitesse de course (de la figure 36).

Les épreuves rectangulaires (3 échelons également de 2 minutes séparés par 2 intervalles d'une minute pour les prélèvements de sang) ont également été effectuées en respectant de façon stricte les temps de travail et de repos.

5.2 - EXPLOITATION DES RESULTATS

La détermination de VS_2 et VS_4 respectivement les seuils "aérobie" et "anaérobie", a été faite de façon "classique" par interpolation selon la méthode des segments (figure 33).

La détermination de V_{cL} , la vitesse critique lactate, a été faite par observation de la différence de la lactatémie entre la 5^{ème} minute et la 8^{ème} minute c'est à dire entre la fin du 2^{ème} et du 3^{ème} échelon de vitesse.

Ce choix résulte de l'observation du comportement de la lactatémie avec le temps ; en effet, comme le montre la figure 40, la lactatémie ne redescend qu'à partir de la 5ème minute au cours de l'exercice "faible", ce qui laisserait supposer que la participation aérobie ne prend pleinement le relais de l'anaérobiose qu'au delà du 2ème échelon.

Dans ces conditions, l'exploitation des résultats a été simplifiée par rapport à celle effectuée chez l'homme au cours des travaux antérieurs (3 - 10 - 11); ces auteurs tenaient compte en effet de l'accroissement moyen de la lactatémie entre les bornes de temps de la période d'observation (entre la 5ème et la 20ème minute d'effort) pour le calcul de $\dot{W}cL$, l'équivalent en puissance de VcL .

Un regret, donc, a l'issu du présent travail : la durée effectivement courte des épreuves rectangulaires qui, du fait de la durée relativement longue de l'apparition des lactates précoces, n'a permis que la comparaison des lactatémies entre la 5ème et la 8ème minute c'est à dire de part et d'autre du dernier échelon de course.

Un autre regret est l'absence de vérification de la stabilisation de la lactatémie au niveau prévu par les calculs comme cela a été fait chez l'homme par BILLAT en 1988 (11).

Les entraînements rectangulaires ont toutefois permis au cours de ce travail, sur cette faible population de chevaux de concours hippique, d'observer que le niveau moyen de stabilisation de la lactatémie se situe légèrement au dessous de 4 mmol l^{-1} (niveau de la lactatémie retenu par analogie avec les observations faites chez l'homme pour définir le seuil anaérobie), à ce stade des essais effectués, selon cette forme d'exercice "rectangulaire", par simple comparaison du cheval à lui-même; là est l'information physiologique principale de ce travail.

De façon pratique l'épreuve triangulaire conserve son intérêt dans l'appréciation des qualités métaboliques de l'énergétique de course; les

épreuves rectangulaires telles qu'elles ont été effectuées au cours de ces essais (3 essais à plusieurs jours d'intervalle) sont en effet relativement lourdes.

La signification biologique des informations apportées par l'épreuve triangulaire reste néanmoins fragile:

- a - Le seuil anaérobie demeure une valeur statistique et arbitraire (DI PRAMPERO 1988) (24 bis).
- b - Seule reste valable la comparaison de la forme des courbes Lactate-Vitesse au cours de deux ou plusieurs essais encadrant une ou plusieurs périodes d'entraînement ou de désentraînement.

Le déplacement vers la droite de la relation Lactate-Puissance, si le protocole de mesure est resté strictement identique au cours des différents tests, prenant alors la signification d'une amélioration des conditions d'endurance de l'animal.

NB : La figure 38 montre que, dans ces conditions, une nouvelle grandeur pourrait être prise en considération et comparée d'un test à l'autre : la vitesse au delà de laquelle, indépendamment des données statistiques, le lactate augmente dans le sang.

Interêt d'un échelon carré court de course de grande vitesse

Les figures 41, 42, 43 et 44, montrent le caractère discriminant de tels échelons de course. Au cours de ces essais, chez cette population malheureusement trop faible, il n'est pas possible de corrélérer de façon significative, l'accroissement de la lactatémie avec les caractéristiques morphologiques, biologiques voir avec l'efficacité de la foulée du cheval et le but dans lequel celui-ci est travaillé.

Néanmoins, sur ces 5 chevaux, on peut remarquer une subdivision en 2 groupes :

- le premier groupe comprenant les chevaux 2, 4, 5 : ces chevaux ayant au départ une morphologie de cheval d'obstacle c'est à dire étant lourds, musclés (chevaux 2 et 5) ou bien étant travaillés de façon très poussée à l'obstacle (spécialisation obstacle) et sortant dans des grosses épreuves de concours hippique (chevaux 4 et 5).

NB : le cheval 5 cumulant ces 2 paramètres.

- le 2ème groupe comprenant les chevaux 1 et 3 : ayant plutôt une morphologie de concours complet et de plus n'ayant pas un travail aussi approfondi à l'obstacle.

La spécialisation en concours hippique se ferait donc au dépend des qualités de vitesse et d'endurance.

Des épreuves de ce genre : échelons de l'ordre de 2 minutes, de forme carrée, sollicitant très fortement l'énergétique de l'animal (grande vitesse de course pour sa spécialité) pourraient donc faire l'objet d'essais ultérieurs en vue de préciser ces observations à l'aide d'échantillons de populations différentes (chevaux endurants, chevaux de course, chevaux d'obstacle, chevaux de concours complet, chevaux de dressage...)

CONCLUSION

A l'issu de ce travail chez le cheval de concours hippique, la comparaison de courses de forme triangulaire et rectangulaire effectuées en régime d'exercices interrompus de 2 en 2 minutes pour permettre les prises de sang nécessaires, deux constations peuvent être faites :

1 - Bien que la signification biologique du "seuil anaérobie" fasse l'objet de nombreuses discussions, l'épreuve triangulaire conserve son intérêt pratique dans l'appréciation des qualités métaboliques de l'énergétique de course.

Les épreuves rectangulaires ont permis (malheureusement sur une faible population de chevaux) d'observer que le niveau moyen de stabilisation de la lactatémie de course se situe bien au voisinage de 4 mmol.l⁻¹, référence statistique du "seuil anaérobie".

2 - L'accroissement de la lactatémie pouvant être très différent d'un cheval à l'autre au cours d'un seul échelon de 2 mn (observation faite chez les 5 chevaux examinés au cours de ce travail), une recherche de corrélation paraît intéressante entre les caractéristiques du cheval et le comportement de sa lactatémie à grande vitesse. Pour cela un prolongement de ce travail serait souhaitable en prenant en considération un échantillonnage de populations différentes (chevaux endurants, chevaux de course, chevaux d'obstacle, chevaux de concours complet, chevaux de dressage...)

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - ANDERSON M.G

The effect of exercise on the lactic deshydrogenase and creatine kinase isoenzyme composition of horse serum.

Research in veterinary Science, 20, 191 - 196, 1976.

- 2 - ANDRE F.

Etude de paramètres biochimiques sanguins de chevaux de sport soumis à une épreuve standard.

Research and Results in clinical chemistry of domestic animals contributions to the first international conference of the A. C. B.

1983 Schwabisch Hall B. R. D.

H. Sommer ED 1983

- 3 - ANTONINI M. T., BILLAT V., BLANC P., CHASSAIN A.P., DALMAY F., MENIER R., VIROT P.

Comparaison de la lactatémie en régime transitoire et en régime stationnaire d'exercice musculaire.

Science et Sports, 2, 41 - 44, 1987

- 4 - ANTONINI M. T., BLANC P., DALMAY F., VIROT P., VILLENEUVE P., AUTEXIER V., NICOLAS A., CHASSAIN A. P.

Epreuve d'effort triangulaire chez le cheval : test d'aptitude pour la conduite de l'entraînement.

Médecine et Sports Equestres Saumur, 1989.

- 5 - AUTEXIER V.

Epreuve d'effort triangulaire "rapide" chez le cheval : test d'aptitude pour la conduite de l'entraînement.

Thèse pharmacie Limoges, 1989.

**- 6 - AUVINET B., GALLOUX P., MICHAUX J. M., LEPAGE O.,
FRANQUEVILLE M., DE FAUCOMPRET J., ANSALONI-GALLOUX A.**

Test d'effort standardisé de terrain pour chevaux de concours complet d'équitation.

Médecine et Sports Equestres, SAUMUR, septembre 89.

- 6bis - BARKER S.B. et SUMMERSON W. H.

The colometric determination of lactic acid in biological materiel.

J. Biol. Chem., 138, 535 - 544, 1941.

- 7 - BARMAN T. E.

Enzyme handbook

Springer - Verloq ed. 1969.

- 8 - BAYLY W.

From some pratical aspects of performance in the horse.

Equine Sports med. News, 5, 70 - 72, 1986.

- 9 - BERMEYER H.U.

Principes de l'analyse enzymatique.

Technique et Documentation ed. 1979.

- 10 - BILLAT V., CHASSAIN A. P.

Vitesse ou Puissance Critique : Méthode d'évaluation de l'endurance pour l'optimisation de la performance.

Revue de l'Amicale des Entraîneurs Français d'Athlétisme (AEFA) 101, 4-6, 5-8, Juin et juillet -août 1987.

- 11 - BILLAT V.

Puissance critique déterminée par la lactatémie, en régime continu d'exercice musculaire pour la validation d'une méthode d'évaluation de la capacité maximale aérobie.

Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier (mention STAPS), Grenoble, octobre 1988.

- 12 - BLANC P., ANTONINI M.T, VILLENEUVE P., VIROT P., DALMAY F., NICOLAS A., CHASSAIN A.P.

Aptitude physique du cheval, dosage du lactate au cours d'épreuves d'efforts triangulaires.

Congrès Chirurgie Equine et Médecine des Sports équestres, Genève, 1987.

- 13 - BOST J., FONTAINE M., JEAN.BLAIN M., LAPRAS M. ET MAGAT A.

Evaluation de certains constituants du sang chez des chevaux cliniquement normaux.

Ann. rech. veter. 1 (1), 63-91, 1970.

- 14 - BOYER P. D.

The enzymes. Tomes 1 -2.

BOYER ed. 1974

- 15 - BROOKS G. A.

Anaerobic Threshold : review of the concept and directions for future research.
Med. sci. sports exercices, 17(1), 22-31, 1985.

- 16 - BROUSTET

Cardiologie Sportive
2-6, 1978.

**- 17 - CAIOZZO V. J., DAVIS J.A., ELLIS J. F., AZUS J. L. , VANDAGRIFF R.,
PRIETTO C.A. et M. C. MASTER W. C.**

A comparaison of gas exchange indices used to detect the anaerobic threshold.
J. appl. physio., 53, 1184-1185, 1982.

- 18 - CERRETELLI P., PENDERGAST D., PAGANELLI W. C, RENNIE D. W.

Effects of specific muscle training on VO_2 on response and early blood lactate.
J. Appl. Physiol : Respirat. Environ. Exercise Physiol., 47, 761-769, 1979.

**- 19 - CHASSAIN A.P., ROULIERE C., SEGURA A., MACCARIO J., DALMAY
F et ANTONINI M. T.**

Attaque en double échelon de l'organisme et capacité physique.
Journées d'automne de médecine du sport, Montpellier, 21-22 Nov.1980.

- 20 - CHASSAIN A. P.

Méthode d'appréciation objective de la tolérance de l'organisme à l'effort :
application de la mesure des puissances critiques de la fréquence cardiaque et de
la lactatémie.
Science et sports, 1, 41-48, 1986.

**- 21 - CHASSAIN A. P., ANTONINI M. T., DALMAY F., FUSEILLER A. ,
MENIER R., ROULIERE C., SIMON-RIGAUD M. L.**

Détermination d'un niveau d'effort très significatif : la puissance d'exercice musculaire continue pour laquelle la lactatémie reste constante.

Médisport, Paris, 60, 135-137, 1986.

**- 22 - CHASSAIN A. P. , MENIER R. , ANTONINI M. T., DALMAY F., SIMON
RIGAUD M. L.**

Notions de "seuils" au cours de l'exercice musculaire : une méthode générale de détermination des puissances critiques de l'organisme, en vue de l'évaluation de l'aptitude physique.

Médisport, 60, 5, 30-34, 1986.

- 23 - CHASSAIN A. P., ROULIERE C., DALMAY F.

Considerations théoriques et pratiques sur la notion de seuils au cours de l'exercice musculaire.

Médecine du Sport, 60, 008-011, 1986.

- 24 - COUSTEAU J. P.

Cardiologie sportive

2-6,1988.

- 24 bis - DI PRAMPERO P. E.

La transition aérobie, anaérobie. Bioénergétique de l'exercice musculaire et de l'entraînement physique.

PUF, 234, 231-244, 1988.

- 25 - DUVALLET A.

Métabolisme anaérobie lactique et exercice musculaire.

Mémoire pour le DERBH Paris 1980.

**- 26 - DUVALLET A., MIDDLETON P., CERVITTI P., CAZORLA P. et
RIEU M.**

Seuil de croissance de la lactatémie : définition et méthode graphique
d'interprétation. Application au suivi d'une équipe de natation.

I. physiol. PARIS, 77, 8-6 - A, 1981.

- 27 - FISHBEIN W.N.

Lactate transporter defect : a new disease of muscle.

Science, 234, 1986.

- 28 - FOX et MATHEWS

Bases physiologiques de l'activité physique.

17-32, 1984.

- 29 - GOLLNICK P. D., BEYLEY W. M., HOGDSON D. R.

Exercise intensities, training, diet and lactate concentration in muscle and blood.

Med. Sci. sports exercises, 18(3), 334-340, 1986.

- 30 - HERMANSEN L.

Effets de l'acidose sur la performance du muscle squelettique pendant l'exercice
maximal chez l'homme.

In énergétique et Sports competitions.

C. R. du colloque international de Nice, 24-33, 1978.

- 31 - HERMANSEN L. et OSNES J. B.

Blood and muscles pH after maximal exercise in man.

J. appl. physiol. 32(3), 304-308, 1972.

- 32 - HOHORSTH J.

Enzymatische Bestimmung von L. Milchsäure

Biochem Z., 328, 509-521, 1958.

- 33 - ISLER R., STRAUB R., APPENZELLER Th., GYSIN J.

Beurteilung der aktuellen Leistungsfähigkeit zur Festlegung der optimalen Belastungsintensität für Intervalltraining bei Warmblut Pferden.

Sweig. Arch Tierheilk 123, 603-612, 1982.

- 34 - IVY J.C., CHIMM Y., HINTZ C. S., SHERMAN W.M., HELLENDAL R.P., LOWRY O. H.

Progressive metabolite changes in individual human muscle fibers with increasing work rates.

Am. J. Physiol. 252 : C 630 - C 639, 1987.

- 35 - JACOBS I

Lactate, muscle glycogen and exercise performance in man.

Acta physio. scand. suppl., 495, 5-35, 1981.

- 36 - JEFFCOTT L. B., DALIN G., DREVEMO S., FREDRIDSON I., BJORNE K. et BERGQUIST A.

Effect of inducted back pain on gait and performance of trotting horses.

- Eq. vet. J., 14,2, 129-133, 1982.

- 37 - JORFELDT L., JUHLIN - DANNFELT A. et KARLSON J.

Lactate release in relation to time lactate in human skeletal muscle during exercise.

J. appl. physiol., 44(3), 350-352, 1978.

- 38 - KARLSSON J. et JACOBS I.

Onset of blood lactate accumulation during muscular exercise as threshold concept.

Int J. sports med. 31, 190-201, 1982.

- 39 - KARPOVICH

Physiologie de l'activité musculaire

121 - 122, 1980.

- 40 - KEUL J., KINDERMANN W. et SIMON G.

La transition aérobie-anaérobie lors de la pratique de certains sports.

Energétique et Sports de compétition.

CR du colloque international de Nice, 37-64, 1978

- 41 - KINDERMANN W, SIMON G. et KEUL J.

The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training.

Eur. J. appl. physiol., 42, 25-34, 1979.

- 42 - KREBS H.A et WOODFORD M.

Fructose 1,6 disphosphatase in striated muscle.

Bioch. J., 94, 436-445, 1965.

- 43 - KRZYWANEK H.

Lactic acid concentration and Ph values in trotters after racing.

J.S. afr.vet.ass., 45(4), 355-360, 1974.

- 44 - KRZYWANEK H., MILNE D.N., GABEL A.A et SMITH L.G.

Acid-base values of standardbred horses recovering from strenuous exercise.

Amer. J. of vet. rec., 37(3), 291-294, 1976.

- 45- LENGRONNE D.

Etude de l'acide lactique chez le cheval. Essai d'une nouvelle méthode de dosage.

Thèse vet. Alfort. 1981.

- 46 - LEPAGE O.

Etude des paramètres biochimiques, physiologiques et hématologiques du cheval de sport soumis à une épreuve standard.

Thèse vet. Alfort, 1983.

- 47 - LESCURE F.

L'électrocardiogramme de longue durée (holter) chez le cheval.

C.R. onzième journée d'étude CEREOPA 1985.

- 48 - LINDHOLM A. et SALTIN B.

The physiological and biochemical response of standardbred horses to exercise of varying speed and duration.

Acta vet scand., 15 fsc. 3, 310-324, 1974.

- 49 - LUNDHOLM L., MOHME. LUNDHOLM E. ET SVEDMYR N.

Comparative investigation of methods for determination of lactic acid in blood and tissues extracts.

Scand. J. din. labo. invest., IS, 311-316, 1963

- 50 - MAILLET M.

Eléments de cytologie Animale.

Bordas Edition 1970.

- 51 - MARTIN-SISTERON.M, VERGER G., JOTIG.G, et FUNES A.

Variations au cours de l'effort de 34 paramètres biologiques chez le cheval.

Premier congrès européen de médecine et sports équestres, Saumur, 1981.

- 52 - MICHAUX J.M., FONDEUR S., ARDILLIER B., ROMDHANE N., GIRARD P., VAN HAVERBEKE G et MOUTHON G.

Biopsies, microscopie quantitative et morphométrie.

Sci. Tech. anim. lab. vol.8, (2), 99-104, 1983.

- 53 - MICHAUX J.M.

Détermination des seuils anaérobies chez le cheval d'endurance.

Mémoire de recherche pour le concours d'agrégation vétérinaire.

Ecole nationale vétérinaire de Lyon, 80 pages, 1988.

- 54 - MILNE D.W, GABEL A.A, MUCI W.W. et SKARDA R.T.

Effect of training on heart rate, cardiac output and lactic acid in standardbred horses, using a standardized exercise test.

Journal of equine medicine and surgery, 1, 4, 131-135,1977.

- 55 - MOLE P. A.

Exercise Metabolism-Exercise medicine: physiological principles and clinical applications.

Academic press, 43-87, 1983.

- 56 - MONOD H., SCHERRER J.

The work capacity of synergic muscular groups.

Ergonomics, 8, 329-338, 1965.

- 57 - MONOD H., FLANDROIS R.

Physiologie du sport.

Masson 1985.

- 58 - MORITANI T.

Critical power as a measure physical work capacity and anaerobic threshold.

Ergonomics, 24, 339-350, 1981.

- 59 - MOUTHON G.

Mise au point d'un test de contrôle de l'aptitude à l'effort chez le cheval de course.

Convention Haron 1979.

- 60 - MOUTHON G., VALLAS C., THERY B. et SILLIART B.

Aspects biochimiques de l'effort chez le cheval de course.

Le Point Vétérinaire 8, 40, 19-24, 1979.

- 61 - MOUTHON G., ARDILLIER B., MICHAUX JM, FONDEUR S. et GIRARD P.

Biochimie de la résistance à l'effort musculaire chez le cheval.

C.R. septième journée d'étude CEREOPA, 92-104, 1981.

- 62 - MOUTHON G., MICHAUX JM, ARDILLIER B., LAUZE M. et ROCHE-FONDEUR S.

Exploration biochimique et morphologique du tissu musculaire du cheval : application à l'aptitude à l'effort.

CR neuvième journée d'étude CEREOPA 1983.

- 63 - MOUTHON G., MICHAUX JM, ARDILLIER B., ROCHE - FONDEUR S. COLIN M. et HERVY Y.

Exploration biochimique histométrique du tissu musculaire du cheval : application à l'effort.

Sci. vet. med. comp. 85, n 4-5, 179-182, 1983.

- 64 - NOLL F.

Methods of enzymatic analysis.

In Bergmeyer Verlag chemie Weinheiz 1974.

- 65 - PANNDORF H., SCHNEIDER J., MOHRING B. et WERNER G.

Zum Verhalten des Milchsäurekonzentration im Blut beim Training von Galopenpferden.

Mih. vet. med. 35, 734-739, 1980.

- 66 - RICO A.G, GODFRAIN J.C., BRAUN J.P., BENARD P. et BURGAT-SACAZE V.

Dosage enzymatiques sériques en clinique équine.

Revue med. vét., 125, 6, 781 -794, 1974.

- 67 - SAIBENE F., CORTILI G., GAVAZZI P., SALA A., FAINA M., et SARDELLA F.

Maximal anaerobic (lactic) capacity and power of the horse

Eq. vét. J, 17, 2, 130-132, 1985.

- 68 - SANNA-RANDACCIO F. et CARTA P.

Point de rupture ventilatoire au cours de l'exercise.

Entretiens de physiopathologie respiratoire INSERM, Nancy, 1980.

- 69 - SEGURA A.

Puissances Critiques de l'organisme et activité physique.

Thèse de doctorat d'université. Limoges 1981.

- 70 - SEGURA A., FAURE A., CHASSAIN AP., CROS-COITTON P., ROULIERE C., DALMAY F., PIN M.

Puissances critiques de l'organisme et activité physique.

Médecine et armées, 11, 2, 135-140, 1983.

- 71 - SENTA T., SMETZER D.L. et ROGER-SMITH C.

Effects of exercise on certain electrocardiographic parameter and cardiac arrhythmias in the horse : a radiotelemetric study.

Carnet vet., 60,552-569, 1970.

- 72 - SEVESTRE J.

Variations physiologiques de l'électrocardiogramme et du vectogramme chez le cheval

Thèse doct. sc. Orsay 1972.

- 73 - SNOW D. H., HARRIS R. C. et GASH S. P.

Metabolic response of equine muscle to intermittent maximal exercise.

J. appl. physiol. 58(5), 1689, 1985.

- 74 - TAGAND R. et BARONE R.

Anatomie des équidés domestiques.

2, fasc. 4, p 1050, p 1019-1025, 1957.

- 75 - TAKAGI S. et SAKURAI N.

Changes of glucose, pyruvate and lactate in blood of horses at rest and during exercise.

Exp. rep. of equine health

lab, 8, 100-109, 1971.

- 76 - VALETTE J.P., WOLTER R.

Lactates et rythme cardiaque. Critères d'aptitude sportive chez le poney.

Congrès de chirurgie équine et médecine des sports équestres, Genève, 271-276, 25-28 mars, 1987.

- 77 - VILLENEUVE P.

Aptitude physique du cheval : dosage du lactate au cours d'épreuves d'efforts triangulaires.

Thèse Pharmacie Limoges 1986.

- 78 - DE VRIES H., MORITANI T., NAGATA A., MAGNUSSEN K.

The relation between critical power and neuromuscular fatigue as estimated from electromyographic data.

Ergonomics, 25, 783-791, 1982.

- 79 - WASSERMANN K. et MC ILROY M. B.

Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise.

Am. J. Cardiol. 14, 844-852, 1964.

- 80 - WASSERMAN K., WHIPP B.J., KOYAL S. N., et BEAVER W.L.

Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise.

J. appl. physiol., 39, 236-243, 1973.

- 81 - WASSERMAN K et WHIPP B. J.

Exercise physiology in healths and diseases

Am. rev. resp. dis., 112, 219-249, 1975.

- 82 - WILSON R. G., ISLER R.B., THORNTON J.R

Heart rate, lactic acid production and speed during a standardized exercise test in standardbred horses.

In equine exercise physiology, Burlington Press, Cambridge, 487-496, 1983.

- 83 - WOLTER R.

La nutrition de l'animal de sport.

Sciences et sports, 2,2, 63-93.

- 84 - WOLTER R., VALETTE JP.

Interêt des mesures de lactatémie et de fréquence cardiaque comme critères d'aptitudes sportives.

C.R. quatorzième journée d'étude CEREOPA du 9 mars 1988.

TABLE DES MATIERES

	Pages
<u>INTRODUCTION</u>	11
<u>I - ELEMENTS INTRODUCTIFS SUR LE METABOLISME DE L'EFFORT</u>	
<u>CHEZ LE CHEVAL</u>	13
1.1. - <u>Métabolisme énergétique de la cellule</u>	13
1.1.1 - Origine de l'ATP en présence d'oxygène : La voie aérobie	13
1.1.2 - Origine de l'ATP en l'absence d'oxygène	16
1.1.2.1 - <i>Anaérobie alactique</i>	16
1.1.2.2 - <i>Anaérobie lactique</i>	17
1.1.3 - Chronologie des événements métaboliques survenant lors d'exercices musculaires	19
1.2 - <u>Données Générales sur le métabolisme des lactates</u>	21
1.2.1 - Lactatémie de repos	21
1.2.2 - Métabolisme proprement dit	28
1.2.2.1 - <i>Origine et destinée du lactate</i>	28
1.2.2.2 - <i>Les organes producteurs de lactate</i>	30
1.2.2.3 - <i>Les organes consommateurs de lactate</i>	34
1.2.2.4 - <i>Elimination du lactate</i>	35
1.2.2.5 - <i>Renouvellement du lactate</i>	35
1.2.2.6 - <i>Transport du lactate</i>	37
1.2.3 - Méthodes de dosage de l'acide lactique	37
1.2.3.1 - <i>Méthodes Enzymatiques</i>	37
- dosage en présence d'un LDH de levure,	37
- dosage en présence d'une LDH d'origine musculaire,	39
1.2.3.2 - <i>Méthodes chimiques</i>	40
1.2.4 - Variation du lactate en fonction de l'intensité	40
1.2.5 - Acidose Lactique	41

	Pages
II - <u>CONCEPT DE SEUIL</u>	48
2.1 - <u>Historique</u>	48
2.2 - <u>Signification</u>	53
2.3 - <u>Application au cheval</u>	54
III - <u>NOTION DE PUISSANCE CRITIQUE</u>	65
3.1 - <u>Travail limite et temps limite au cours d'un exercice musculaire exhaustif</u>	65
3.2 - <u>Puissances critiques de l'adaptation fonctionnelle et métabolique au</u> <u>cours de l'activité musculaire</u>	67
3.2.1 - Puissance critique de récupération de la fréquence cardiaque	69
" W_{CRfc} " et puissance critique de la lactatémie " W_{CRL} " dans le cadre d'un régime discontinu d'exercice musculaire	
3.2.2 - Signification biologique de " W_{CRfc} " et de " W_{CRL} " mesurées dans ces conditions	70
3.2.3 - Puissance de la lactatémie en régime continu d'exercice musculaire	73
3.2.4 - Signification biologique de W_{cL} en régime d'exercice continu	76
IV - <u>ETUDE EXPERIMENTALE</u>	81
4.1 - <u>Présentation des chevaux</u>	81
4.2 - <u>Epreuve d'effort</u>	88
4.2.1 - Modalités	88
4.2.2 - Recueil des différents paramètres	93
4.2.2.1 - <i>Fréquence cardiaque</i>	93
A - Théorie	93
a) rappels anatomiques	93
b) technique	93
c) matériel utilisé	95
B - Pratique	98

	Pages
4.2.2.2 - <i>Acide lactique</i>	99
4.3 - <u>Résultats</u>	100
4.3.1 - Expression des résultats	100
4.3.2. - Valeurs numériques	104
4.3.2.1 - <i>Epreuves triangulaires</i>	104
a) valeurs observées et vitesses "seuils" (VS_2 et VS_4)	104
b) fréquence cardiaque en fonction de la vitesse de course	104
c) lactatémie en fonction de la vitesse de course	108
4.3.2.2 - <i>Epreuves rectangulaires</i>	108
a) Calcul de la vitesse critique lactate "VcL" et de la lactatémie	108
correspondant à la vitesse critique "LVc".	
b) Fréquence cardiaque et vitesse critique "VcL"	118
4.3.2.3 - <i>Comparaison entre les épreuves d'effort triangulaires et les épreuves d'effort rectangulaires.</i>	118
a) VS_4 et VcL.	118
b) Référence 4mmoles l^{-1} et LVc	118
c) fc_{VS_4} et fc_{VcL}	122
4.3.2.4 - <i>Accroissement de la lactatémie en fonction de la vitesse de course au cours d'échelons carrés indépendants.</i>	122
V - <u>DISCUSSION</u>	130
5.1 - <u>Protocole</u>	131
5.2 - <u>Exploitation des résultats</u>	131
<u>CONCLUSION</u>	135

DAURIAC (Elisabeth). — Fréquence cardiaque et lactatémie chez le cheval au cours d'échelons de course de courte durée : enchaînements triangulaires et rectangulaires. — 155 f. ; ill. ; tabl. ; 30 cm (Thèse : Pharm. ; Limoges ; 1990).

RESUME :

La plupart des auteurs qui se sont intéressés au comportement de la lactatémie chez le cheval l'ont fait à partir d'épreuves d'effort de type triangulaire. Ce travail propose un protocole de mesure en régime d'activité physique rectangulaire, discontinu, au cours de trois niveaux de course; les enchaînements d'échelons de même vitesse sont faits ici en vue de permettre le calcul de « VcL » la vitesse de course critique et de déterminer « LVc », la lactatémie stable correspondant à la vitesse critique observée.

Ces essais sont effectués de façon comparative avec une épreuve triangulaire constituée par trois galops de vitesse croissante. Deux observations résultent de ce travail :

1°) « LVc » se situe au voisinage de 4 mmol.l^{-1} : ce niveau de lactatémie pris en référence statistique dans les épreuves triangulaires paraît donc justifié.

2°) Une observation de l'accroissement du lactate sanguin à l'échelle d'un seul échelon d'exercice indépendant pourrait être proposée en vue d'une recherche de corrélation entre les caractéristiques du cheval et le comportement de sa lactatémie à grande vitesse.

MOTS CLES :

- Cheval.
 - Effort (épreuves d') triangulaire et rectangulaire.
 - Lactate.
 - Holter.
-

JURY : Président : Monsieur le Professeur NICOLAS J.-A.
Juges : Monsieur le Professeur CHASSAIN A.-P.
Mademoiselle ANTONINI M.-T.
Monsieur le Docteur BLANC P.

Adresse de l'auteur :

Le Verdier
87170 ISLE.