

---

# TROT ATTELE/TROT MONTE : COMPARAISON DE LA PHYSIOLOGIE DE L'EFFORT ET DE LA LOCOMOTION

---

THESE  
pour obtenir le grade de  
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement en 2008  
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

*par*

**Virginia, Charlotte, Marie MOTTINI**  
Née, le 30 juillet 1984 à Aix-en-Provence

---

Directeur de thèse : **M. le Professeur Pierre-Louis TOUTAIN**

---

## JURY

PRESIDENT :

**Mme. Bettina COUDERC**

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEUR :

**M. Pierre-Louis TOUTAIN**  
**Mlle. Séverine BOULLIER**

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

MEMBRE INVITE :

**Mlle. Claire Leleu**

Docteur Vétérinaire



MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PECHE  
ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE

Directeur	: M.	<b>A. MILON</b>
Directeurs honoraires	M.	<b>G. VAN HAVERBEKE</b>
	M.	<b>P. DESNOYERS</b>
Professeurs honoraires	M.	<b>L. FALIU</b>
	M.	<b>C. LABIE</b>
	M.	<b>C. PAVAU</b>
	M.	<b>F. LESCURE</b>
	M.	<b>A. RICO</b>
	M.	<b>A. CAZIEUX</b>
	Mme	<b>V. BURGAT</b>
	M.	<b>J. CHANTAL</b>
	M.	<b>J.-F. GUELF</b>
	M.	<b>M. EECKHOUTTE</b>
	M.	<b>D. GRIESS</b>

**PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE**

---

- M. **BRAUN Jean-Pierre**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*  
M. **DORCHIES Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*  
M. **EUZEBY Jean**, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*  
M. **TOUTAIN Pierre-Louis**, *Physiologie et Thérapeutique*

**PROFESSEURS 1<sup>ère</sup> CLASSE**

---

- M. **AUTEFAGE André**, *Pathologie chirurgicale*  
M. **BODIN ROZAT DE MANDRES NEGRE Guy**, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*  
Mme **CLAUW Martine**, *Pharmacie-Toxicologie*  
M. **CORPET Denis**, *Science de l'Aliment et Technologies dans les industries agro-alimentaires*  
M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie pathologique*  
M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*  
M. **FRANC Michel**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*  
M. **MARTINEAU Guy-Pierre**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*  
M. **PETIT Claude**, *Pharmacie et Toxicologie*  
M. **REGNIER Alain**, *Physiopathologie oculaire*  
M. **SAUTET Jean**, *Anatomie*  
M. **SHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*

**PROFESSEURS 2<sup>e</sup> CLASSE**

---

- Mme **BENARD Geneviève**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*  
M. **BERTHELOT Xavier**, *Pathologie de la Reproduction*  
M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*  
M. **DUCOS Alain**, *Zootéchnie*  
M. **DUCOS de LAHITTE Jacques**, *Parasitologie et Maladies parasitaires*  
Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*  
M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*  
Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la Reproduction*  
M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*  
M. **LIGNEREUX Yves**, *Anatomie*  
M. **PICAVET Dominique**, *Pathologie infectieuse*  
M. **SANS Pierre**, *Productions animales*  
Mlle. **TRUMEL Catherine**, *Pathologie médicale des équidés et des carnivores domestiques*

**INGENIEUR DE RECHERCHE**

---

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

**PROFESSEURS CERTIFIES DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE**

---

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

**MAÎTRE DE CONFERENCES HORS CLASSE**

---

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

#### MAÎTRES DE CONFERENCES CLASSE NORMALE

---

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*  
M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*  
Mme **BENNIS-BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*  
M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*  
M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*  
Mme **BOUCLAINVILLE –CAMUS, Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*  
Mlle **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*  
Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*  
M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Physiologie et Thérapeutique*  
M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*  
Mlle **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie*  
Mme **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*  
M. **DOSSIN Olivier**, *(DISPONIBILITE) Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*  
M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie du bétail*  
M. **GUERIN Jean-Luc**, *Elevage et Santé Avicoles et Cunicoles*  
M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*  
M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*  
Mlle **LACROUX Caroline**, *Anatomie Pathologie, Histologie*  
Mme **LETRON –RAYMOND, Isabelle**, *Anatomie pathologique*  
M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*  
M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*  
M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*  
Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie chirurgicale*  
M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*  
M. **MONNEREAU Laurent**, *Anatomie, Embryologie*  
Mlle **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*  
Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*  
Mme **TROEGELER –MEYNADIER, Annabelle**, *Alimentation*  
M. **VERWAERDE Patrick**, *Anesthésie, Réanimation*  
M. **VOLMER Romain**, *Infectiologie*

#### MAÎTRES DE CONFERENCES CONTRACTUELS

---

- M. **CASSARD Hervé**, *Pathologie du bétail*  
Mlle **GOSSOT Pauline**, *Pathologie Chirurgicale*  
Mlle **RATTEZ Elise**, *Médecine*

#### ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

---

- Mlle **BIBBAL Delphine**, *H.I.D.A.O.A Sciences de l'Alimentation*  
M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*  
M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*  
M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*  
M. **NOUVEL Laurent-Xavier**, *Pathologie de la reproduction*  
M. **PAIN Amélie**, *Médecine Interne*  
M. **RABOISSON Didier**, *Productions animales*  
M. **TREVENNEC Karen**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles et porcins*

# REMERCIEMENTS

A notre jury de thèse,

*A Madame le Professeur Bettina COUDERC*

Professeur des Universités

Praticien hospitalier

*Médecin biologiste*

**Qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse,  
Hommages respectueux.**

*A Monsieur le Professeur Pierre-Louis TOUTAIN*

Professeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

*Physiologie et Thérapeutique*

**Qui nous a fait l'honneur d'encadrer ce travail et de nous guider au cours  
de sa réalisation,  
Sincère reconnaissance.**

*A Mademoiselle le Docteur Séverine BOULLIER*

Maître de conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

*Immunologie générale et médicale*

**Pour avoir accepté de juger ce travail et de faire partie de notre jury de  
thèse,  
Sincères remerciements.**

*A Mademoiselle le Docteur Claire LELEU*

Membre invité

*Docteur Vétérinaire*

**Pour être à l'origine de ce projet et pour l'avoir guidé,  
Pour avoir été d'une grande disponibilité,  
Qu'elle trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.**



***A Juliette,***

Mon souhait le plus cher est de te voir retrouver goût à la vie.  
Que le bonheur arrive enfin sur ton chemin.  
Je tiens tellement à toi...

***A mes parents,***

Pour cet amour dont vous m'avez toujours entourée, pour cette merveilleuse enfance que vous m'avez offerte.  
Merci de m'avoir toujours soutenue et encouragée dans tous mes projets.  
A Maman, pour ta générosité sans limites et ton dévouement permanent à mon égard.  
Merci de m'avoir aidée à en arriver là, « ensemble, nous l'avons franchi... »  
A Papa, merci de m'avoir si bien guidée, je t'en suis très reconnaissante.  
Vous êtes des parents exceptionnels.  
Je vous aime tendrement.

***A Jérôme,***

Mon grand-frère bienveillant,  
Pour ton immense générosité, pour tes conseils, ton écoute, ta franchise et ta bonne humeur,  
Merci d'être toujours là pour moi.  
Malgré la distance tu occupes une grande place dans mon cœur...

***A mes grands-mères,***

A Mamie pour ta générosité, ton optimisme et ta philosophie de la vie.  
A Gram, pour tous ces moments magiques passés à Menthon, pour ton énergie et ton courage.  
Restez encore longtemps parmi nous, je vous admire.

***A Louise, Vic, Camille, Isabelle et Julie,***

Pour toutes ces vacances inoubliables passées ensemble,  
Pour cette complicité qui nous unit,  
Je vous souhaite beaucoup de bonheur à toutes.

***A Agathe,***

Pour ta gentillesse, ta simplicité et ton naturel.

A ces belles années d'école et à notre aventure québécoise, que de bons souvenirs...

A ces boums inoubliables, à Cascada, nos chorés et séances de gym.

Tu me manques de l'autre coté de l'Atlantique...

Vive la « poulp' attitude » et continue d'être si drôle sans le faire exprès!

***A Bep,***

Avec qui j'ai passé des années d'école mémorables.

A nos fous rires, à nos discussions philosophiques, aux triomphes culinaires et à toutes nos danses sur le bar très légèrement éméchés...

Pour ta franchise, ton humour, ta sensibilité... et ton intolérance !

***A Aurore,***

A tous ces moments si particuliers partagés à l'hippodrome, quelle équipe de stallistes !

Pour ta gentillesse, ta gaité de vivre et ton écoute.

Plein de bonheur pour la suite.

***A Lucile,*** pour ton franc parler, nos rigolades, nos passions partagées et fais gaffe tu râles presque autant que moi... ! Et au fait, avec Guillaume vous vous mariez quand... ?

J'espère vous revoir bientôt du côté de Lyon.

***A Crécré,*** à la cuisine créole, aux pâtes et à ces soirées d'anniversaire laissant des traces bleues sur les bouches...

***A Cyrielle,*** et à tous ces délires vécus en ta compagnie. J'espère que tu tiens le coup en Normandie !

***A Gazou,*** même si nos chemins se sont éloignés je garde un souvenir mémorable de nos soirées de poulottes.

***A mes docs*** et à ces brimades exceptionnelles.

***A mes poulots,*** et à ces clandés hors du temps !

***A Pépée, Jane, Marjo, Mathilde et Isa*** pour ces supers moments passés ensemble chez les Caribous. Vive le bar laitier !

Un grand merci à Marjo de m'avoir transmis ta petite « maison », même si je n'y suis pas souvent je m'y sens si bien.

***A Coline, Nanou, Béré, Ben, Molit', Marion, Céline et Auré,*** et à cette année à venir qui s'annonce riche et intense à tous points de vue.

*A Marc,*

Mon plus grand bonheur,  
A notre amour grandissant malgré les épreuves et la distance,  
Tu me rends heureuse comme personne,  
Merci pour ton soutien infailible qui m'a aidée à surmonter ces moments difficiles.  
A tous nos projets qui, j'espère, se réaliseront rapidement,  
Merci d'être là,  
Je t'aime.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>	<b>1</b>
<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS .....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>9</b>
<b>ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>13</b>
<b>I – BASES DE PHYSIOLOGIE DE L’EFFORT DU TROTTEUR .....</b>	<b>15</b>
A) <i>Le métabolisme énergétique du muscle.....</i>	<i>15</i>
1- L’ATP et les différentes sources d’énergie .....	15
2- Les différentes voies énergétiques .....	16
a- Les voies anaérobies .....	16
b- Les voies aérobies .....	17
c- BILAN : Contribution des différentes voies énergétiques en fonction de la durée et de l’intensité de l’effort .....	17
B) <i>Adaptation cardiovasculaire et respiratoire à l’effort.....</i>	<i>18</i>
1- Adaptations cardiovasculaires .....	19
2- Adaptations respiratoires.....	20
C) <i>Caractéristiques de l’effort en courses de trot .....</i>	<i>21</i>
D) <i>Modifications physiologiques liées à l’effort de demi-fond .....</i>	<i>22</i>
1- Voies énergétiques sollicitées et modification des stocks énergétiques.....	22
2- Accumulation d’acide lactique et phénomène de fatigue.....	24
3- Effets de l’entraînement sur les voies métaboliques .....	24
<b>II – L’EPREUVE D’EFFORT STANDARDISEE DE TERRAIN ET LES PARAMETRES D’APTITUDE SPORTIVE .....</b>	<b>27</b>
A) <i>Le test d’effort standardisé.....</i>	<i>27</i>
B) <i>La fréquence cardiaque.....</i>	<i>27</i>
1- Evolution de la fréquence cardiaque avec la vitesse.....	28
2- Effet de l’entraînement sur la fréquence cardiaque .....	29
C) <i>La lactatémie .....</i>	<i>30</i>
1- Diffusion du lactate hors de la cellule musculaire et répartition dans les différents secteurs.....	31
2- Cinétique de l’acide lactique sanguin pendant l’effort.....	33
3- Clairance de l’acide lactique sanguin après l’effort.....	34
4- Effet de l’entraînement sur la lactatémie et lien avec les indices de performances en course .....	36

D) <i>Notion de seuils et description de paramètres d'aptitude physique</i> .....	38
1- Seuils aérobie et anaérobie .....	38
2- Description de paramètres d'aptitude physique.....	39
a- Rapport vitesse /lactatémie : le paramètre $V_4$ .....	39
b- Rapport vitesse / fréquence cardiaque : le paramètre $V_{200}$ .....	40
c- Valeurs de $V_4$ et $V_{200}$ en fonction de l'âge et de l'état d'entraînement.....	41
d- Relation entre paramètres d'aptitude physique et indices de performances .....	41
<b>III- LE SCHEMA LOCOMOTEUR DU TROT</b> .....	<b>43</b>
A) <i>Description de l'allure</i> .....	43
B) <i>Les différentes phases du trot</i> .....	44
1- La phase d'appui.....	44
2- La phase de suspension .....	45
C) <i>Modifications du schéma locomoteur avec la vitesse</i> .....	45
1- Dissociation diagonale et « flying-trot » .....	45
2- Modification des caractéristiques spatio-temporelles des foulées .....	46
D) <i>Localisation et mouvements du centre de gravité</i> .....	47
E) <i>Reproductibilité et efficacité énergétique du trot</i> .....	48
<b>IV- INFLUENCE DE L'AJOUT D'UNE CHARGE ET ETUDE DE L'INTERACTION CHEVAL - CAVALIER</b> .....	<b>49</b>
A) <i>Effet de l'ajout d'une charge</i> .....	49
B) <i>Effet du cavalier sur la locomotion du cheval</i> .....	50
<b>ETUDE EXPERIMENTALE</b> .....	<b>53</b>
<b>I – MATERIEL ET METHODE</b> .....	<b>55</b>
A) <i>Les chevaux</i> .....	57
B) <i>Les jockeys et drivers</i> .....	57
C) <i>Déroulement des tests d'effort standardisés</i> .....	57
D) <i>Le terrain</i> .....	58
E) <i>Méthodes de mesure des paramètres physiologiques</i> .....	58
1- Mesure de la vitesse .....	58
a- Cheval attelé.....	58
b- Cheval monté .....	60
2- Mesure de la fréquence cardiaque.....	60
3- Mesure de la lactatémie.....	61
4- Méthode d'analyse de la respiration .....	62
F) <i>Méthode de mesure des paramètres locomoteurs</i> .....	63

1- Le système de mesure des variables locomotrices .....	63
2- Définition des variables locomotrices .....	64
<i>G) Méthodes d'analyse et de traitement des données.....</i>	<i>65</i>
1- Analyse et traitement des paramètres physiologiques et locomoteurs .....	65
a- Analyse des enregistrements de vitesse et de fréquence cardiaque.....	66
b- Analyse des enregistrements de la respiration.....	66
c- Analyse des paramètres locomoteurs.....	67
2- Analyse statistique des données.....	68
<b>II- RESULTATS .....</b>	<b>71</b>
<i>A) La vitesse .....</i>	<i>71</i>
<i>B) Comparaison des paramètres physiologiques.....</i>	<i>71</i>
1- La fréquence cardiaque .....	71
2- La lactatémie .....	73
3- V <sub>4</sub> et V <sub>200</sub> .....	74
4- La fréquence respiratoire.....	76
<i>C) Comparaison des paramètres locomoteurs.....</i>	<i>77</i>
1- Longueur et fréquence des foulées .....	77
2- Symétrie et régularité.....	79
3- Déplacements latéraux, verticaux et longitudinaux .....	81
a- Déplacements verticaux .....	81
b- Déplacements longitudinaux .....	82
c- Déplacements latéraux.....	83
4- Comparaison des variables locomotrices selon la discipline.....	84
<i>D) Couplage locomotion / respiration.....</i>	<i>85</i>
<b>III– DISCUSSION.....</b>	<b>87</b>
<i>A) Analyse du protocole expérimental.....</i>	<i>87</i>
1- Limites de l'étude .....	87
2- Pertinence de la méthode utilisée.....	89
a- Paramètres physiologiques.....	89
b- Les paramètres locomoteurs.....	90
c- Autres données.....	91
<i>B) Analyse des résultats.....</i>	<i>92</i>
1- La vitesse.....	92
2- La fréquence cardiaque .....	92
3- V <sub>4</sub> et V <sub>200</sub> .....	92
4- La fréquence respiratoire.....	93
5- Longueur et fréquence de foulée .....	93
6- Couplage locomoteur et respiratoire .....	94
7- Symétrie et régularité.....	95
8- Déplacements dans les trois dimensions .....	95
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>99</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>103</b>



## TABLE DES ILLUSTRATIONS

<b>Figure 1 :</b> Temps réalisés ces 25 dernières années dans le Critérium des 3 ans (attelé) et le Prix de Vincennes (monté).....	10
<b>Figure 2 :</b> Temps réalisés ces 25 dernières années dans le Critérium des 5 ans (attelé) et le Prix de Normandie (monté).....	10
<b>Figure 3 :</b> Mise en jeu des trois voies du métabolisme énergétique lors d'un effort maximal (Wolter, 1987).....	18
<b>Figure 4 :</b> Evolution de la fréquence cardiaque en fonction de la vitesse de travail chez deux chevaux (FC1 et FC2) à différentes périodes d'entraînement (Rose et Evans, 1987).....	19
<b>Figure 5 :</b> Participation relative des différentes voies métaboliques selon la discipline du cheval (Couroucé-Malblanc, 2007).....	22
<b>Figure 6 :</b> Valeurs des concentrations musculaires (en mmol/kg de muscle) en ATP, créatine phosphate (CP), glycogène et glucose-6-phosphate (G6P) mesurées sur 5 Trotteurs au repos (colonnes blanches) et après une course (colonnes noires), à partir de biopsies de muscle glutéal médial effectuées 2-3 minutes après la course (Lindholm et Saltin, 1974).	23
<b>Figure 7 :</b> Valeurs de fréquences cardiaques moyennes chez des Trotteurs français obtenues lors de tests d'efforts de terrain (Couroucé, 1999a).....	28
<b>Figure 8 :</b> Relation entre la vitesse de course (V) et la fréquence cardiaque (HR) chez des chevaux non-entraînés (courbe de gauche), faiblement entraînés (courbe centrale) et ayant subi un entraînement d'endurance (courbe de droite). Les flèches indiquent les limites approximatives de la linéarité de la réponse cardiaque (Thornton, 1985).....	29
<b>Figure 9 :</b> Valeurs moyennes de concentrations en acide lactique (mmol/L) dans le plasma, sang total et érythrocytes, avant (symboles vides), pendant (symboles et traits pleins) et après (symboles vides et pointillés) un exercice prolongé sur tapis roulant (Persson et al., 1995).....	32
<b>Figure 10 :</b> Evolution de la lactatémie en fonction de la vitesse chez des chevaux entraînés (o) et des chevaux au repos (●) (Thornton et al., 1983).....	33
<b>Figure 11 :</b> Cinétique des lactates sanguins après un effort maximal ou supramaximal chez l'homme (Auvinet et al., 1991b).....	34
<b>Figure 12 :</b> Cinétique des lactates sanguins chez des chevaux soumis à différentes vitesses post-exercice sur tapis roulant incliné à 5° pendant 40 minutes (Marlin et al., 1991).....	35
<b>Figure 13 :</b> Concentrations sanguines en lactates chez des chevaux entraînés (o) et désentraînés (●), lors d'un test d'effort sur tapis roulant (graphique gauche) et lors de la phase de récupération (graphique droit) (Rainger et al., 1994).....	37
<b>Figure 14 :</b> Evolution de la lactatémie et de la fréquence cardiaque en fonction de la vitesse et position des points V <sub>4</sub> et V <sub>200</sub> .....	39

<b>Figure 15</b> : Le schéma locomoteur du trot attelé : visualisation d'une foulée complète (Drevemo et al., 1980a). .....	44
<b>Figure 16</b> : Les différentes phases d'une foulée de trot (Leleu, 2004a). .....	45
<b>Figure 17</b> : Schématisation de la dissociation du diagonal droit à grande vitesse : les schémas a et b illustrent la dissociation au poser du membre et les schémas d et e au lever (Drevemo et al., 1980b). .....	46
<b>Figure 18</b> : Localisation du centre de gravité chez le cheval à l'arrêt (Clayton, 1989). .....	47
<b>Figure 19</b> : Aimant du tachymètre fixé à la roue du sulky (photo gauche) et écran du tachymètre fixé sur le sulky de façon à être visible par le driver (photo droite). .....	59
<b>Figure 20</b> : Power Control V (rouge) et GPS (noir) fixés au brancard du sulky. ....	59
<b>Figure 21</b> : Dispositif GPS fixé au bras du cavalier. ....	60
<b>Figure 22</b> : Montre Polar et émetteur des électrodes fixés au brancard du sulky (photo gauche) et positionnement des électrodes sur le harnais du cheval (photo droite). .....	61
<b>Figure 23</b> : Réalisation d'un prélèvement sanguin à la jugulaire pour doser la lactatémie. ....	62
<b>Figure 24</b> : Cheval équipé du microphone, relié au boîtier enregistreur sur le brancard du sulky. ....	63
<b>Figure 25</b> : Position du capteur accélérométrique et de l'enregistreur (d'après Leleu, 2004a). .....	64
<b>Figure 26</b> : Exemple d'enregistrement de vitesse et de fréquence cardiaque transféré sur ordinateur. ....	66
<b>Figure 27</b> : Exemple d'enregistrement de la respiration transféré sur ordinateur. ....	67
<b>Figure 28</b> : Exemple d'analyse de variables locomotrices grâce au logiciel Equimetrix. ....	68
<b>Figure 29</b> : Vitesses comparées dans les deux disciplines (attelé vs monté) pour chaque palier, 10 chevaux. ....	71
<b>Figure 30</b> : Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de la Fréquence Cardiaque avec la vitesse, 4 paliers, moyennes ± écarts-types. ....	72
<b>Figure 31</b> : Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de la lactatémie avec la vitesse, 3 paliers, moyennes ± écarts-types. ....	73
<b>Figure 32</b> : Paramètres physiologiques $V_4$ et $V_{200}$ (m/min) comparés pour les deux disciplines (attelé vs monté), 10 chevaux, moyennes ± écarts-types. ....	74
<b>Figure 33</b> : $V_4$ (m/min) attelé et monté comparées pour chaque cheval. ....	75
<b>Figure 34</b> : $V_{200}$ (m/min) attelé et monté comparées pour chaque cheval. ....	75

<b>Figure 35:</b> Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de la fréquence respiratoire (cycle respiratoire/sec) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes $\pm$ écarts-types. ....	76
<b>Figure 36:</b> Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de la fréquence de foulées FF (foulées/sec) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes $\pm$ écarts-types. ....	78
<b>Figure 37:</b> Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de la longueur de foulée LF (m) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes $\pm$ écarts-types. ....	78
<b>Figure 38 :</b> Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de la Symétrie (%) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes $\pm$ écarts-types .....	79
<b>Figure 39 :</b> Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de la Régularité (/200) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes $\pm$ écarts-types.....	80
<b>Figure 40 :</b> Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution du déplacement dorso-ventral avec la vitesse, 4 paliers, moyennes $\pm$ écarts-types . ....	81
<b>Figure 41 :</b> Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de l'activité dorso-ventrale (g2/Hz) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes $\pm$ écarts-types.....	82
<b>Figure 42 :</b> Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de l'activité longitudinale (g2/Hz) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes $\pm$ écarts-types.....	83
<b>Figure 43 :</b> Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de l'activité latérale (g2/Hz) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes $\pm$ écarts-types.....	84
<b>Figure 44 :</b> Comparaison de tous les paramètres locomoteurs mesurés selon la discipline (attelé vs monté). ....	84
<b>Figure 45 :</b> Fréquence de foulée (nb de foulées/s), fréquence respiratoire (cycle respiratoire/s) et ratio FF / FR pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, 10 chevaux, moyennes $\pm$ écarts-types .....	85
<b>Tableau 1 :</b> Vitesses (en m/min) imposées lors de l'épreuve d'effort standardisé ( <i>Demonceau et Auvinet, 1992</i> ). ....	27
<b>Tableau 2 :</b> Valeurs moyennes et intervalles de confiance ( $\pm$ 95 %) de V4 et V200 en m/min à différents âges et états d'entraînement, calculées chez 194 Trotteurs Français réalisant 1105 tests d'efforts standardisés sur une piste d'une longueur de 720 m ( <i>Couroucé et al., 2002</i> ). ....	41
<b>Tableau 3 :</b> Résumé du déroulement du test d'effort et vitesses fixées pour chaque palier.....	58
<b>Tableau 4 :</b> Moyennes et écarts-types de la Fréquence Cardiaque (battements/min) pour les quatre paliers de vitesse en fonction de la discipline (attelé vs monté), 10 chevaux.. ....	72

<b>Tableau 5 :</b> Moyennes et écarts-types de la Fréquence Cardiaque (battements/min) pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, 10 chevaux. ....	72
<b>Tableau 6 :</b> Moyennes et écarts-types de la lactatémie (mmol/L) pour les trois paliers de vitesse en fonction de la discipline (attelé vs monté), 10 chevaux.....	73
<b>Tableau 7 :</b> Moyennes et écarts-types de la lactatémie pour chaque discipline (attelé vs monté) toutes vitesses confondues, 10 chevaux. ....	74
<b>Tableau 8 :</b> Moyennes et écart-types de $V_4$ et $V_{200}$ (m/min) pour chaque discipline (attelé vs monté), 10 chevaux.....	74
<b>Tableau 9 :</b> Moyennes et écarts-types de la fréquence respiratoire (cycle respiratoire/sec) pour les quatre paliers de vitesse en fonction de la discipline (attelé vs monté), 10 chevaux. ....	76
<b>Tableau 10 :</b> Moyennes et écart-types de la fréquence respiratoire (cycle respiratoire/sec) pour chaque discipline (attelé vs monté) toutes vitesses confondues, 10 chevaux .....	77
<b>Tableau 11 :</b> Moyennes et écarts-types des variables fréquence de foulée FF (foulées/sec) et longueur de foulée LF (m) pour chaque palier de vitesse en fonction de la discipline (attelé vs monté), 10 chevaux .....	77
<b>Tableau 12 :</b> Moyennes et écarts-types de la fréquence de foulée FF (foulées/sec) et de la longueur de foulée LF (m) pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, 10 chevaux.....	79
<b>Tableau 13:</b> Moyennes et écarts-types des variables Symétrie (%) et Régularité (/200) pour chaque palier de vitesse en fonction de la discipline (attelé vs monté), 10 chevaux.....	79
<b>Tableau 14 :</b> Moyennes et écarts-types de la régularité (/200) et de la symétrie (%) pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, 10 chevaux .....	80
<b>Tableau 15 :</b> Moyennes et écarts-types du déplacement dorso-ventral DDV, de l'activité dorso-ventrale DVA, de l'activité latérale Lat et de l'activité longitudinale A.Long pour chaque palier de vitesse en fonction de la discipline (attelé vs monté), 10 chevaux.....	81
<b>Tableau 16 :</b> Moyennes et écarts-types du déplacement dorso-ventral DDV (cm) et de l'activité dorso-ventrale DVA ( $g^2/Hz$ ) pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, 10 chevaux. ....	82
<b>Tableau 17:</b> Moyennes et écarts-types de l'activité longitudinale ( $g^2/Hz$ ) pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, 10 chevaux. ....	83
<b>Tableau 18 :</b> Moyennes et écarts-types de l'activité latérale ( $g^2/Hz$ ) pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, 10 chevaux .....	83
<b>Tableau 19 :</b> Moyennes et écarts-types de la fréquence de foulée FF (nb de foulées/s), de la fréquence respiratoire FR (cycle respiratoire/s) et ratio FF / FR pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, .....	85

# INTRODUCTION

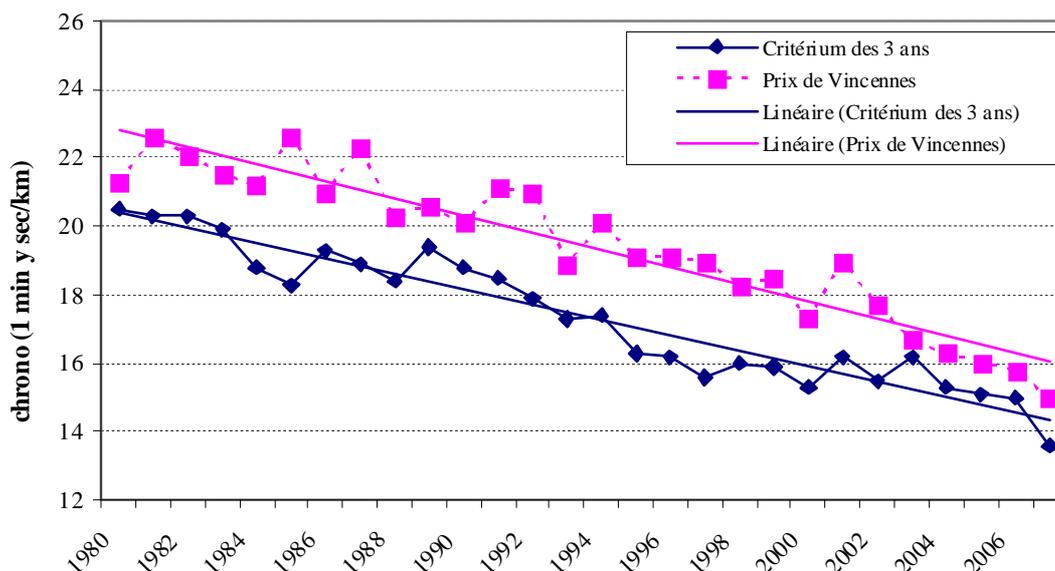
C'est en 1836 que sont créées les premières courses officielles de trot en France (Cherbourg). Depuis, ce qui n'était alors qu'un passe-temps d'amateurs s'est progressivement développé, pour devenir aujourd'hui un sport, mais surtout une véritable filière professionnelle et économique. En effet, le trot est à présent un des sports hippiques les plus populaires : six millions et demi de joueurs parient sur ces courses chaque année.

Le Trotteur français est une race qui trouve ses origines au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle : il est issu de croisements de juments normandes avec des étalons Pur-sang et surtout avec des trotteurs Norfolk venus de Grande-Bretagne. De son ascendance Normande, le Trotteur français a conservé de la charpente et de l'ampleur, mais il accuse de plus en plus de sang.

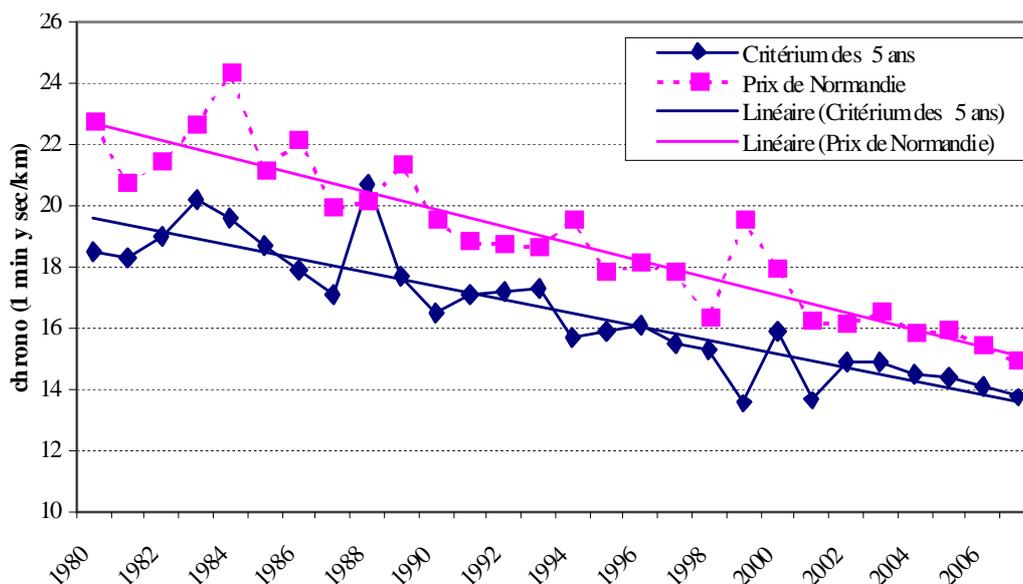
Les courses de trot sont au nombre d'environ 10 000 par an et offrent une grande variété de caractéristiques : en effet, les distances de courses varient beaucoup selon les compétitions (entre 1.600 et 4.400m), les modalités de départ sont elles aussi variables (départ arrêté, à l'autostart). De plus, chaque hippodrome possède ses propres caractéristiques : la nature du sol (en machefer, en sable ou en herbe), la longueur de la piste (de 1.000 à 2.000m), le tracé (virages plus ou moins serrés), le sens de course (piste à droite ou à gauche),...sont autant de facteurs de variation qui vont solliciter les chevaux différemment. Enfin deux grands types de disciplines de trot existent, impliquant pour les chevaux des qualités physiologiques et biomécaniques particulières. La discipline dominante est le trot attelé, où le cheval tracte un sulky et son driver, tandis qu'en trot monté, discipline moins répandue (environ un tiers des courses), le jockey monte le cheval.

Comme dans de nombreux sports humains, le trot connaît d'années en années une amélioration des performances réalisées. En effet, lorsqu'on compare les temps record réalisés sur les 25 dernières années, que ce soit en trot attelé ou monté, on note une augmentation considérable des vitesses de courses. Cela s'explique aisément par l'amélioration des techniques d'entraînement et du matériel (pistes, sulkys,...), mais aussi par l'amélioration génétique des trotteurs liée à une sélection accrue.

Cependant, en comparant les temps records réalisés dans des épreuves classiques attelées (critérium des 3 et 5 ans) avec ceux des épreuves équivalentes montées (même piste et même distance) comme le prix de Vincennes ou de Normandie, on constate une différence moyenne de chronomètres d'environ 2 s/km, les chevaux attelés étant plus rapides que les chevaux montés :



**Figure 1** : Temps réalisés ces 25 dernières années dans le Critérium des 3 ans (attelé) et le Prix de Vincennes (monté) (Graphique élaboré grâce aux réductions kilométriques provenant du site internet *Palmarès des courses classiques au trot attelé et trot monté en France*).



**Figure 2** : Temps réalisés ces 25 dernières années dans le Critérium des 5 ans (attelé) et le Prix de Normandie (monté) (Graphique élaboré grâce aux réductions kilométriques provenant du site internet *Palmarès des courses classiques au trot attelé et trot monté en France*).

Cette différence de temps record d'un même cheval qu'il soit attelé ou monté témoigne d'une différence de difficultés d'effort. On peut donc se demander en quoi le fait de monter le cheval plutôt que de l'atteler le ralentit. Est-ce lié à une sollicitation physiologique accrue ? Dans quelle mesure ? Le trot attelé et le trot monté requièrent-ils une biomécanique différente, impliquant un geste différent en fonction de la discipline ?

Il s'agit là d'interrogations auxquelles notre protocole vise à apporter des réponses. Pour cela, un rappel bibliographique concernant la physiologie de l'effort du trotteur et les moyens de tester l'aptitude physique à un effort, est présenté dans un premier temps. Puis seront évoquées la biomécanique du trot en général ainsi que les données actuelles concernant l'influence d'un poids, et plus particulièrement du cavalier, sur la locomotion du trotteur. Ensuite, nous détaillerons le protocole mis en œuvre pour récolter les données relatives à la physiologie et à la locomotion des chevaux testés, selon qu'ils sont attelés ou montés. Les résultats permettront d'évaluer dans quelle mesure la sollicitation est différente et de voir en quoi le geste est modifié. Enfin, des résultats recueillis et de leur analyse devraient naître des éléments de réponse pour comprendre pourquoi les chevaux présentent de meilleures performances lorsqu'ils sont attelés plutôt que montés.



# **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**



# I – BASES DE PHYSIOLOGIE DE L'EFFORT DU TROTTEUR

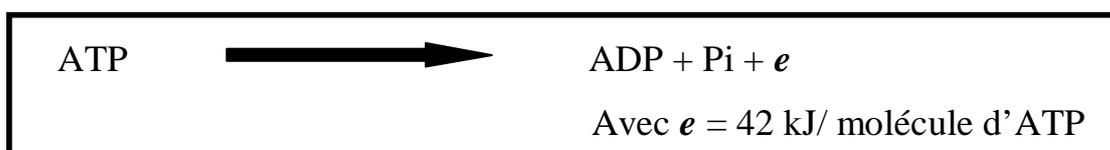
L'effort physique est un travail fourni par l'organisme, qui nécessite la mobilisation des systèmes locomoteurs, cardiovasculaires et respiratoires. L'ensemble de ces systèmes a un besoin commun pour fonctionner : l'énergie. Nous présenterons donc les voies énergétiques qui permettent d'assurer le travail musculaire, ainsi que leur lien étroit avec les systèmes impliqués dans la chaîne de transport de l'oxygène. Puis nous aborderons les particularités de l'effort en course de trot et leurs répercussions sur la physiologie de l'effort.

## *A) Le métabolisme énergétique du muscle*

La physiologie de l'exercice repose sur la conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique, grâce au travail musculaire. La performance en course dépend donc principalement de cette capacité métabolique à convertir l'énergie, afin de maintenir un apport suffisant pour permettre une contraction musculaire continue.

### 1- L'ATP et les différentes sources d'énergie

Toutes ces conversions se font grâce à l'ATP (Adénosine TriPhosphate), qui est le « carburant » unique de la cellule musculaire. En effet, il contient une liaison à haute énergie entre groupements phosphates. Lorsque l'ATP est dégradé, l'énergie libérée par la rupture de la liaison représente la source immédiate d'énergie pour la contraction musculaire.



Cependant, la concentration en ATP dans le muscle est très limitée (6 mmol/kg de muscle) (*McMicken, 1983*) et ne permet qu'une brève durée de contraction. Pour que le travail musculaire puisse durer, l'ATP doit être rapidement et continuellement synthétisé, grâce à l'oxydation biochimique des substrats métaboliques.

Les substrats majeurs utilisés pour la production d'énergie sont les glucides et les lipides, stockés dans les secteurs intra et extracellulaires (*Bayly, 1989*). Les sources intracellulaires d'énergie sont sous forme de glycogène et de triglycérides. Les carburants d'origine extramusculaire (glucose et acides gras libres), sont apportés aux muscles par le sang, depuis les stocks périphériques de glycogène (muscle et foie) et de lipides (tissu adipeux).

La contribution relative de chaque carburant dans la contraction musculaire dépend de l'intensité et de la durée de l'exercice, du régime alimentaire, du niveau d'entraînement et de la condition physique. La compréhension des voies par lesquelles l'énergie est libérée est un pré requis à l'étude des capacités d'un animal à l'exercice et de ses réponses à l'entraînement.

## 2- Les différentes voies énergétiques

Ainsi, il existe plusieurs systèmes par lesquels l'ATP est mis à disposition des cellules musculaires. Ces voies métaboliques se relaient dans le temps pour assurer la continuité d'un effort une fois celui-ci commencé.

### a- Les voies anaérobies

- **La voie anaérobie alactique :**

Une fois les faibles réserves musculaires en ATP utilisées, celui-ci est d'abord renouvelé grâce à la voie anaérobie alactique ou système des phosphagènes. Il s'agit de la voie anaérobie la plus simple. Elle permet de reformer de l'ATP à partir de l'énergie stockée dans la créatine phosphate (CP), qui est stockée dans les cellules musculaires.

Cette réaction constitue la source la plus rapide d'ATP pour le muscle, mais elle ne permet de soutenir un effort de forte intensité que pendant quelques secondes. En effet, dès 20 secondes d'exercice intense, les stocks musculaires de créatine phosphate sont épuisés.

- **La réaction catalysée par la myokinase :**

Cette réaction permet de générer de l'ATP lors d'un effort très intense et maintien l'équilibre entre ATP et ADP dans le muscle.

- **La voie anaérobie lactique (ou glycolyse anaérobie) :**

Elle se met en place lorsque la synthèse d'ATP par les deux voies décrites précédemment ne suffit pas à couvrir les besoins en énergie. Quantitativement, il s'agit de la source d'énergie anaérobie la plus importante (*McMicken, 1983*). Elle permet la dégradation du glycogène ou du glucose en acide pyruvique sans utilisation d'O<sub>2</sub>.

Cette voie débute 30 secondes après le début de l'exercice et elle est d'autant plus intense que la teneur du muscle en ATP est faible. Notons qu'elle fournit une énergie considérable, le muscle du cheval possédant un fort taux de glycogène (126 mmol/kg muscle) (*McMicken, 1983*).

Le devenir de l'acide pyruvique dépend de la présence d'oxygène dans la cellule ; en conditions anaérobies, il est réduit en lactate avec production d'ATP. Cependant, ce système a une faible efficacité énergétique par rapport à la voie aérobie, mais présente l'avantage d'assurer une production rapide d'ATP en condition anaérobie.

L'acide lactique ainsi produit diffuse du muscle vers les fluides interstitiels et via la circulation vers le foie où il est converti en glycogène.

### *b- Les voies aérobies*

La source majeure d'énergie dans la cellule musculaire provient de l'oxydation des lipides et des glucides, qui utilise l'oxygène apporté par la circulation. Lors de cette oxydation, les substrats sont utilisés plus efficacement mais plus lentement que dans les voies anaérobies, car les réactions chimiques sont plus complexes et leur vitesse dépend du délai d'approvisionnement des cellules en oxygène par le système cardio-vasculaire.

- **La glycolyse aérobie :**

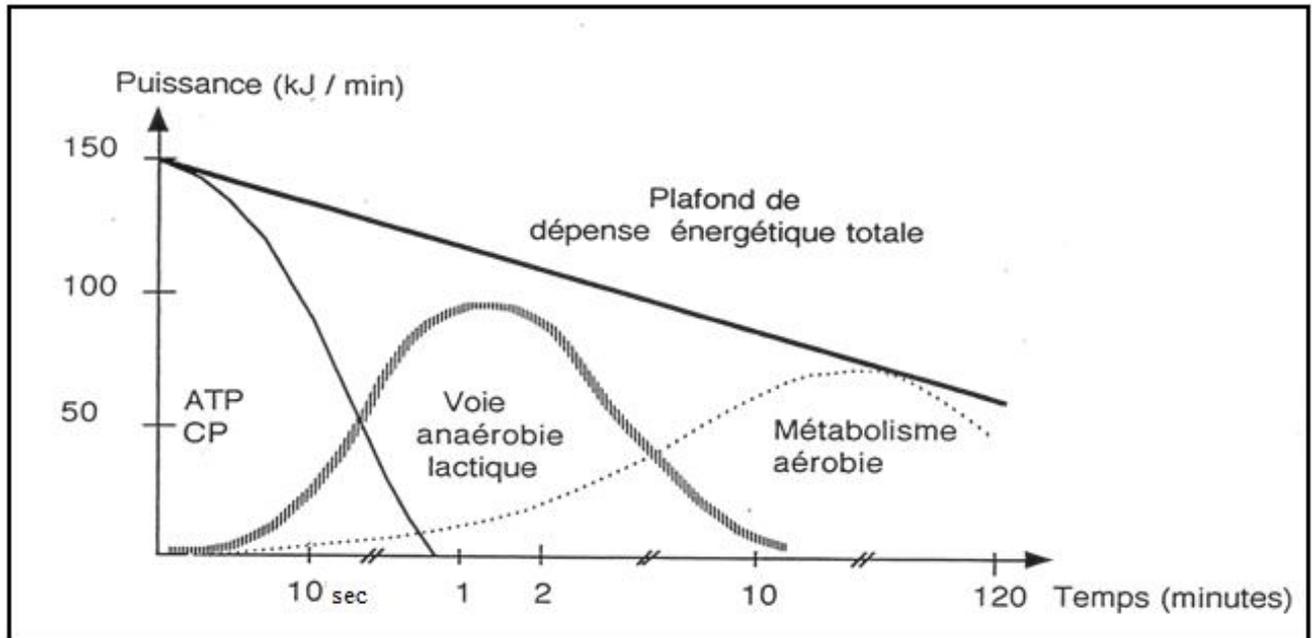
Elle se met en route après 2 à 4 minutes de délai, en raison de la complexité des réactions qu'elle met en jeu. En présence d'oxygène, une molécule de glucose est complètement dégradée en  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ , ce qui produit 38 molécules d'ATP.

- **L'oxydation des lipides :**

Les triglycérides sont hydrolysés et en présence d'oxygène vont permettre la synthèse de quantités importantes d'ATP. Comme pour la glycolyse aérobie, l'énergie produite par cette voie n'est pas disponible dans les premiers instants de la contraction musculaire et dépend de l'apport en oxygène.

### *c- BILAN : Contribution des différentes voies énergétiques en fonction de la durée et de l'intensité de l'effort*

Il est possible de matérialiser le délai d'intervention de ces différentes voies par un schéma (figure 3). Lorsque l'effort débute, la source immédiate d'énergie est l'ATP, mais il est stocké en faibles quantités dans la cellule et de ce fait, doit être synthétisé continuellement. Le substrat suivant disponible est la créatine phosphate, mais cette source est rapidement épuisée. Le relais est ensuite pris par la glycolyse anaérobie dont le délai d'intervention est d'environ 30 secondes, soit le temps nécessaire à la mise en route des différentes réactions biochimiques. Enfin le métabolisme oxydatif est un processus plus lent qui débute après 2 à 4 minutes d'exercice.



**Figure 3 :** Mise en jeu des trois voies du métabolisme énergétique lors d'un effort maximal (Wolter, 1987).

L'importance relative de chaque voie dépend aussi de l'intensité de l'exercice :

- En effet, lors d'exercices de courte durée et d'intensité élevée, les systèmes anaérobies sont davantage sollicités car l'énergie doit être disponible rapidement et la puissance requise est importante. Ce type d'exercice s'accompagne d'une accumulation d'acide lactique et de créatine dans la cellule musculaire.
- Les exercices prolongés et d'intensité modérée ou faible reposent principalement sur le système aérobie qui permet un apport en ATP beaucoup plus important et qui ne produit pas d'acide lactique. Les voies anaérobies n'interviennent qu'en début d'exercice, lorsque l'approvisionnement en oxygène de la cellule n'est pas suffisant. Une fois que la voie aérobie s'est mise en route, la formation aérobie d'ATP augmente et donc la formation anaérobie peut diminuer (figure 3). Il est donc essentiel en vue d'un travail prolongé que la production aérobie soit la plus grande possible, mais cela nécessite que les quantités d'O<sub>2</sub> présentes dans les cellules musculaires soient suffisantes. Ceci dépend de la capacité de l'organisme à absorber l'O<sub>2</sub> et à le transporter jusqu'aux muscles.

## ***B) Adaptation cardiovasculaire et respiratoire à l'effort***

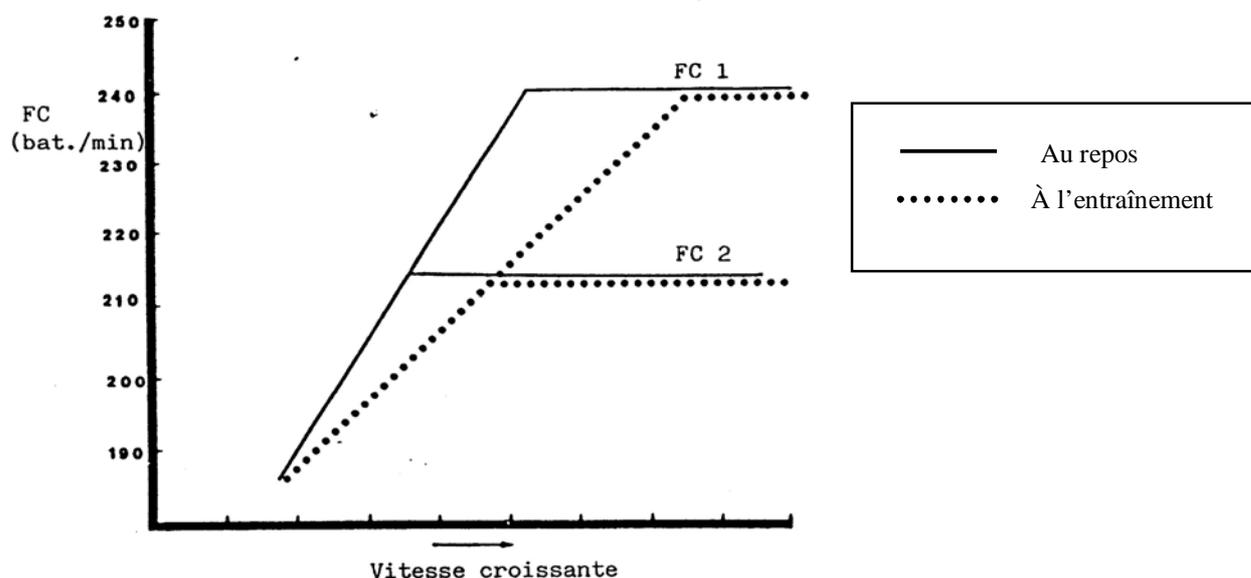
La consommation d'oxygène ( $\dot{V}O_2$ ) est le reflet du métabolisme aérobie de l'organisme. En effet, la  $\dot{V}O_2$  est directement proportionnelle à l'intensité du travail, excepté en début et en fin d'exercice :

- En début d'effort, la voie aérobie n'est pas encore totalement fonctionnelle ; ce sont les voies anaérobies qui fournissent l'ATP.
- Si l'effort est d'intensité telle que l'ensemble des capacités aérobies des muscles sont recrutées, alors la  $\dot{V}O_{2\text{ MAX}}$  est atteinte. Au-delà de ce seuil, l'énergie nécessaire pour augmenter davantage l'intensité de l'exercice ne peut plus être fournie par la voie aérobie. Il y aura alors recrutement des voies anaérobies.
- En fin d'effort, la  $\dot{V}O_2$  reste supérieure à la  $\dot{V}O_2$  de base pour permettre la restauration des réserves énergétiques, le catabolisme des lactates, etc...

Ces variations de consommation d'oxygène au cours de l'effort sont assurées par l'adaptation des systèmes cardiovasculaires et circulatoires en fonction des besoins métaboliques de l'organisme.

## 1- Adaptations cardiovasculaires

L'élévation de la  $\dot{V}O_2$  est assurée par les augmentations respectives de l'extraction de l'oxygène et du débit cardiaque. L'augmentation de la fréquence cardiaque, et plus accessoirement celle du volume d'éjection systolique, contribuent à l'augmentation du débit cardiaque. La fréquence cardiaque augmente de façon linéaire avec l'intensité de l'exercice et cela jusqu'à un certain niveau à partir duquel elle se stabilise. L'animal a alors atteint sa fréquence cardiaque maximale (*Art et al., 2000*).



**Figure 4** : Evolution de la fréquence cardiaque en fonction de la vitesse de travail chez deux chevaux (FC1 et FC2) à différentes périodes d'entraînement (*Rose et Evans, 1987*).

De plus, d'autres facteurs interviennent dans l'augmentation de la  $\dot{V}O_2$  ; la mobilisation du plasma et des hématies stockées dans la rate grâce à la contraction splénique double les capacités de transport de l'oxygène et joue un rôle capital chez les équidés. Il y a redistribution du débit sanguin des territoires inactifs (sièges d'une vasoconstriction) vers les territoires actifs (sièges d'une vasodilatation) et une accélération du retour veineux, afin d'adapter le métabolisme à l'effort.

Après l'effort, la fréquence cardiaque redescend rapidement au cours de la première minute d'arrêt, puis graduellement par la suite. Il est donc impossible d'extrapoler la fréquence au cours de l'effort à partir de la fréquence enregistrée lors de la récupération, même si la mesure est effectuée dès l'arrêt (*Art et al., 2000*).

## 2- Adaptations respiratoires

Lors d'un effort intense, le volume d'air ventilé par minute est multiplié par 30. Cette augmentation est principalement liée à une élévation de la fréquence respiratoire qui est multipliée par 10. Chez les galopeurs, cette adaptation est liée au couplage entre la fréquence respiratoire et la fréquence des foulées. Chez le trotteur, il n'existerait pas de couplage obligatoire entre ces deux paramètres. Néanmoins, il a été prouvé que, comme chez le galopeur, la ventilation augmente surtout par une élévation de la fréquence respiratoire (*Art et Lekeux, 1995*).

En ce qui concerne les gaz sanguins, il a été démontré que des chevaux sains réalisant des efforts de forte intensité présentaient systématiquement une hypoxémie importante (baisse de la pression partielle en oxygène dans le sang) associée à une hypercapnie (*Art et Lekeux., 1995*). Cela traduit une certaine inaptitude du système respiratoire à répondre de façon adéquate à une forte demande métabolique en oxygène de l'organisme.

Le fait que les chevaux sains approchent la limite de leur capacité ventilatoire lors d'exercices intenses pourrait représenter un handicap réel à la réalisation de performances maximales dans cette espèce. Cela est d'autant plus remarquable que contrairement à toutes les autres fonctions impliquées dans l'exercice (cardiaque, musculaire), la fonction respiratoire n'est pas influencée par l'entraînement (*Art et Lekeux, 1995*).

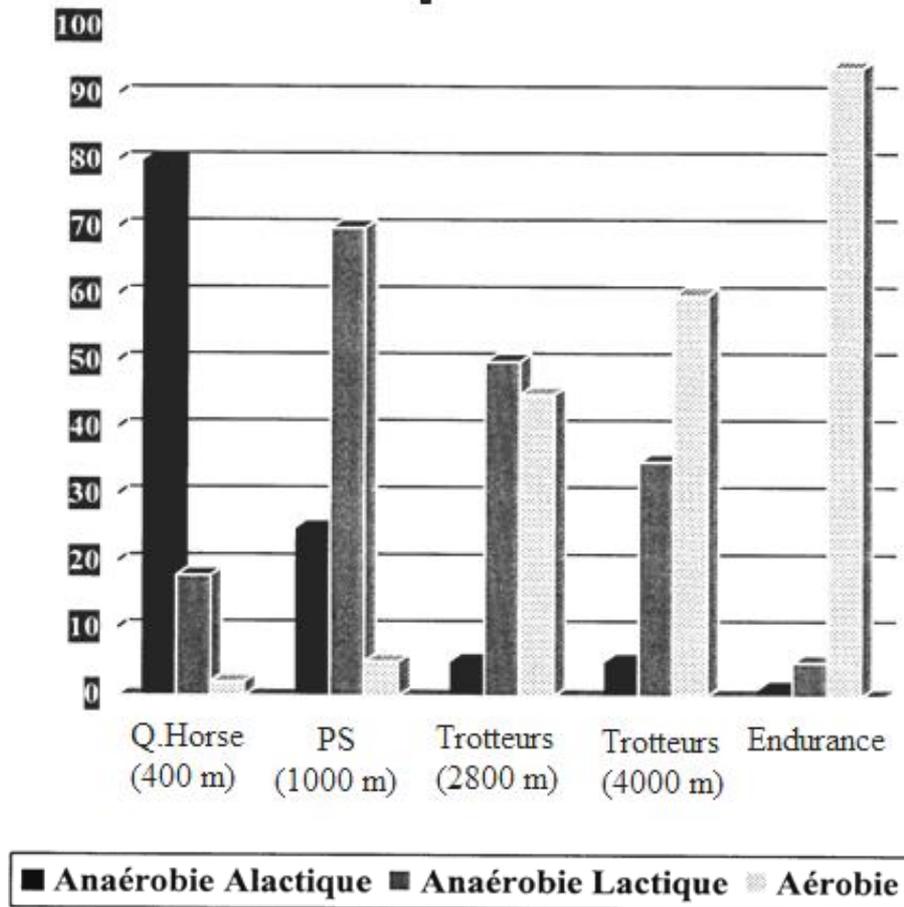
### ***C) Caractéristiques de l'effort en courses de trot***

L'effort du trotteur consiste en des courses dont la distance est comprise entre 1.600 et 4.000 m, ce qui implique une durée d'effort variant de 2 à 5 minutes (*Couroucé, 1993*). Le métabolisme mis en jeu est donc de type mixte : lorsque les courses se déroulent sur des distances supérieures à 1.600 m, le métabolisme aérobie devient prépondérant (*Bayly, 1985*) et d'après *Mc Miken (1983)*, dans les courses de plus de 2.400 m (courues en 2 minutes et 25 secondes), la performance est limitée par le taux de production d'énergie aérobie. En effet, le potentiel métabolique aérobie a une importance croissante au fur et à mesure que la distance de course augmente. Par contre, plus l'intensité de l'exercice augmente, c'est-à-dire plus la vitesse augmente, plus le système anaérobie, plus puissant, est sollicité pour assurer la demande énergétique des muscles (*Barrey et Demonceau, 1990b*). Ainsi, *Barrey (1990a)* indique que pour une course de 2.500 m, à une vitesse moyenne de 12 m/s, le métabolisme est pour 55 % aérobie et 45 % anaérobie lactique.

Cela permet d'ailleurs d'établir des analogies entre l'effort physique du trotteur et celui de l'athlète humain de demi-fond (course de 1500 m) (*Auvinet et al., 1991a*).

De plus, il faut savoir que généralement, la course peut être divisée en deux phases : une première qui se déroule à une vitesse modérément élevée, sollicitant majoritairement les capacités aérobies du cheval, et une seconde phase qui consiste en une accélération progressive jusqu'à l'obtention de la vitesse maximale. Cette dernière phase correspond à un « sprint » final et sollicite particulièrement les capacités anaérobies lactiques (*Dahl, 2005*).

La figure 5, qui compare les particularités énergétiques de différentes disciplines comme l'endurance, le sprint (Quarter Horse) et le trot, souligne bien le caractère mixte de l'effort fourni par le trotteur.



**Figure 5:** Participation relative des différentes voies métaboliques selon la discipline du cheval (Couroucé-Malblanc, 2007).

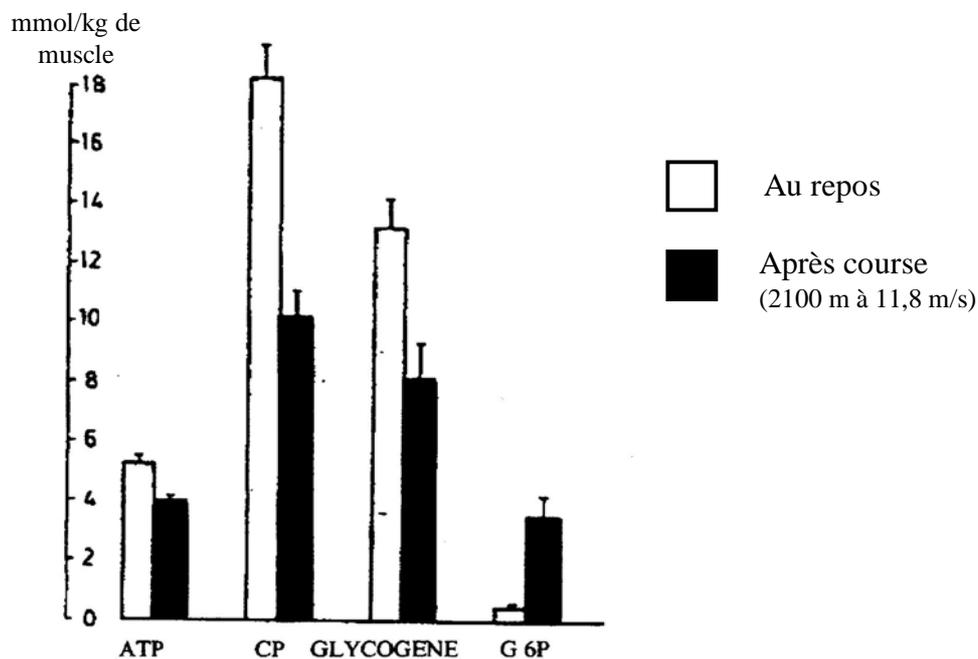
## ***D) Modifications physiologiques liées à l'effort de demi-fond***

L'intensité de l'effort fourni par le trotteur lors d'une course est très coûteuse en énergie et s'accompagne d'une déplétion des stocks énergétiques musculaires. De plus, sollicitant fortement la voie anaérobie, cet effort s'accompagne également d'une importante accumulation d'acide lactique (Dahl, 2005).

### **1- Voies énergétiques sollicitées et modification des stocks énergétiques**

Comme nous l'avons décrit précédemment, l'énergie fournie lors des premiers instants de la contraction musculaire provient du système des phosphagènes. Il en résulte donc qu'après un effort, les stocks d'ATP et de créatine phosphate sont diminués (figure 6), alors que la concentration en créatine a augmenté. Il en est de même pour le glycogène musculaire, principal substrat de la glycolyse (aérobie et anaérobie), dont la concentration diminue au

cours d'un exercice de plus de 20 secondes, corrélativement à l'augmentation de la concentration en glucose-6-phosphate qui est l'intermédiaire réactionnel de la glycolyse (figure 6).



**Figure 6 :** Valeurs des concentrations musculaires (en mmol/kg de muscle) en ATP, créatine phosphate (CP), glycogène et glucose-6-phosphate (G6P) mesurées sur 5 Trotteurs au repos (colonnes blanches) et après une course (colonnes noires), à partir de biopsies de muscle glutéal médial effectuées 2-3 minutes après la course (*Lindholm et Saltin, 1974*).

Lorsque les besoins en énergie surpassent les capacités aérobies et anaérobies de la cellule musculaire, l'ATP est synthétisé via la réaction catalysée par la myokinase, ce qui augmente les taux d'AMP ensuite transformé en IMP et en ammonium. L'accumulation d'ammonium inhibe la transformation aérobie du pyruvate, ce qui augmente la production d'acide lactique.

Au bilan, l'effort de demi-fond fourni par le trotteur lors d'une course s'accompagne d'une déplétion des stocks d'ATP, de créatine phosphate et de glycogène musculaire, parallèlement à une importante accumulation de lactates et d'ammonium dans le muscle (*Schuback et Essen-Gustavsson, 1998*). Toutes ces modifications physiologiques contribuent de façon plus ou moins directe à l'installation d'un état de fatigue musculaire (*Dahl, 2005*).

## 2- Accumulation d'acide lactique et phénomène de fatigue

Contrairement à l'effort d'endurance qui mobilise la voie aérobie, l'effort de course sollicite fortement le métabolisme anaérobie lactique et de ce fait s'accompagne d'une forte augmentation de la lactatémie (25-30 mmol/L post-effort contre 0,4 mmol/L au repos). Or les concentrations importantes obtenues à ces vitesses de course deviennent incompatibles avec la physiologie de la contraction musculaire ; en effet, des études effectuées chez le trotteur ont montré que l'accumulation d'acide lactique et la diminution du pH cellulaire étaient associées au développement d'un état de fatigue (Lovell *et al.*, 1987).

Cependant, le processus de fatigue aiguë qui limite la vitesse des chevaux en fin de course est dû à plusieurs phénomènes : accumulation d'acide lactique, inhibition de la glycolyse, mais aussi épuisement des stocks en glycogène (ce qui est discutable chez le cheval car les quantités stockées dans le muscle sont très importantes), en créatine phosphate et en ATP (McMicken, 1983). D'après Bayly (1989), la déplétion des réserves en glucides joue un rôle central dans le développement de la fatigue pendant les courses de longue distance. C'est pourquoi l'utilisation de la voie des lipides pour fournir de l'ATP permet d'économiser le glycogène et augmente la résistance du cheval à la fatigue.

Il semble donc que plus les trotteurs sont aptes à utiliser les lipides et à métaboliser le glycogène de façon efficace (c'est-à-dire par la voie aérobie), plus le glycogène est économisé, avec un milieu intracellulaire proche de l'état de repos, et plus le muscle va être capable de produire de grandes quantités d'ATP en fin de course, afin de réaliser un sprint final (Bayly, 1989).

## 3- Effets de l'entraînement sur les voies métaboliques

L'entraînement a surtout des effets rapides et marqués sur le métabolisme aérobie et les facteurs qui lui sont associés (enzymes du cycle de Krebs, vascularisation musculaire, hémoglobine, nombre de mitochondries...). Par conséquent il améliore la  $\dot{V}O_{2max}$  ; elle est d'environ 100-135 mL/kg/min chez un cheval non entraîné et peut atteindre des valeurs de 160 à 180 mL/kg/min chez le cheval bien entraîné (Art *et al.*, 2000).

Le métabolisme anaérobie est également amélioré par l'entraînement, avec augmentation des réserves en ATP et créatine phosphate, augmentation des enzymes de la glycolyse anaérobie. Une amélioration du pouvoir tampon du cytoplasme a aussi été mise en évidence. Cela signifie que chez l'animal entraîné, davantage d'acide lactique peut être produit avant que le mécanisme de feed-back négatif, lié à la diminution du pH, ne ralentisse la glycolyse (Art *et al.*, 2000).

Afin d'apprécier la façon dont l'organisme du cheval répond à un effort physique donné, il est intéressant de mesurer des paramètres tels que la fréquence cardiaque, respiratoire, ou la lactatémie, et c'est ce qui est fait au cours d'un test d'effort.



## **II – L'ÉPREUVE D'EFFORT STANDARDISÉE DE TERRAIN ET LES PARAMÈTRES D'APTITUDE SPORTIVE**

### ***A) Le test d'effort standardisé***

Un test d'effort peut être décrit comme un moyen d'évaluer la capacité au travail physique d'un organisme. Les tests de terrain, « à la piste », ne permettent de réaliser qu'un éventail limité de mesures, mais ont l'avantage de simuler plus précisément les conditions de compétition (surface de course, nature de la piste, driver et/ou cavalier...) par rapport à un test sur tapis roulant (*Thornton, 1985*).

Le principe général de ces épreuves dites « triangulaires » est de soumettre le cheval à une série d'efforts d'intensité progressivement croissante. L'épreuve d'effort standardisée de terrain pour trotteur consiste en un échauffement libre d'une dizaine de minutes, suivi de trois paliers d'une durée de trois minutes chacun à vitesse stabilisée, entrecoupés d'une minute trente de repos, pendant lequel est effectué un prélèvement de sang veineux jugulaire afin de doser les lactates sanguins (*Demonceau et Auvinet, 1992*). La vitesse est incrémentée d'un palier au suivant. La vitesse des différents paliers est déterminée en fonction de l'âge et du niveau d'entraînement du cheval testé (Tableau 1). Au cours du test, la fréquence cardiaque et la vitesse sont enregistrées.

<b>Age</b>	<b>Durée d'entraînement</b> (mois)	<b>Palier 1</b>	<b>Palier 2</b>	<b>Palier 3</b>
2 ans	0-4	440	480	520
2 ans	4-8	470	530	590
3 ans	8-24	490	560	630
> 4ans	>24	500	580	660

**Tableau 1 :** Vitesses (en m/min) imposées lors de l'épreuve d'effort standardisé (*Demonceau et Auvinet, 1992*).

### ***B) La fréquence cardiaque***

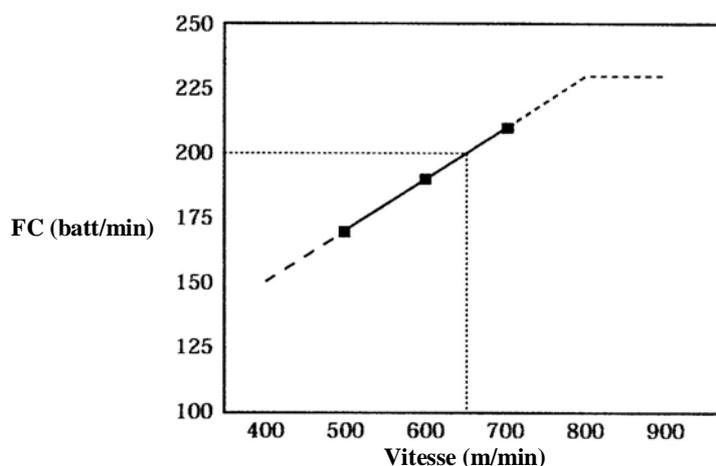
L'enregistrement de la fréquence cardiaque constitue un moyen simple et fiable pour évaluer l'adaptation physiologique du cheval au cours d'un exercice. En effet, il s'agit d'un

paramètre aisément mesurable, qui est actuellement reconnu comme étant un critère fiable d'appréciation de la condition physique (Art et Lekeux, 1991). Plus précisément, elle constitue un très bon indicateur de la puissance aérobie mise en jeu (Barrey et Demonceau, 1990b).

## 1- Evolution de la fréquence cardiaque avec la vitesse

De façon générale, lors d'un exercice physique, la fréquence cardiaque augmente très rapidement au début du travail, puis elle reste stable jusqu'aux  $\frac{3}{4}$  de l'effort. Après l'exercice, la diminution de la fréquence cardiaque est très marquée pendant les premiers instants; elle baisse de 25 battements/min pendant les premières 5 minutes (Marsland, 1968).

En 1983, Wilson et al. ont étudié expérimentalement l'évolution de la fréquence cardiaque en fonction de la vitesse lors d'un travail constitué de quatre paliers de vitesse croissante. Ils ont montré, et de nombreux auteurs l'ont confirmé (Kubo et al., 1984, Thornton, 1985, Art et al., 2000, Demonceau et Auvinet., 1992, Couroucé, 1999a, Lindholm et Saltin, 1974, Persson et Ullberg, 1974) que la réponse cardiaque à un exercice d'intensité croissante est linéaire entre 120 et 210 battements par minute (Figure 7). Au-delà de cette fenêtre d'intensité d'exercice, la fonction n'est plus linéaire et cela correspond à une approximation de la  $FC_{max}$  de l'animal (Thornton, 1985). Celle-ci peut atteindre 200 à 240 battements/min, voire plus, selon les individus (Auvinet et al., 1993, Art et al., 2000). Certains auteurs expliquent cette déflexion de la droite  $FC = f(V)$  par le fait que le muscle cardiaque, à l'approche de  $\dot{V}O_{2max}$  n'aurait plus besoin d'augmenter sa fréquence de contraction, le surplus d'énergie provenant de l'ATP produit par le métabolisme glycolytique anaérobie (Valette et Wolter, 1988).



**Figure 7 :** Valeurs de fréquences cardiaques moyennes chez des Trotteurs français obtenues lors de tests d'efforts de terrain (Couroucé, 1999a).

La relation entre la FC et la vitesse peut donc être représentée par une droite dont l'équation est de type (*Demonceau et Auvinet, 1992*) :

$$FC = m \times V + n$$

Avec FC = fréquence cardiaque (en battements/ minute),

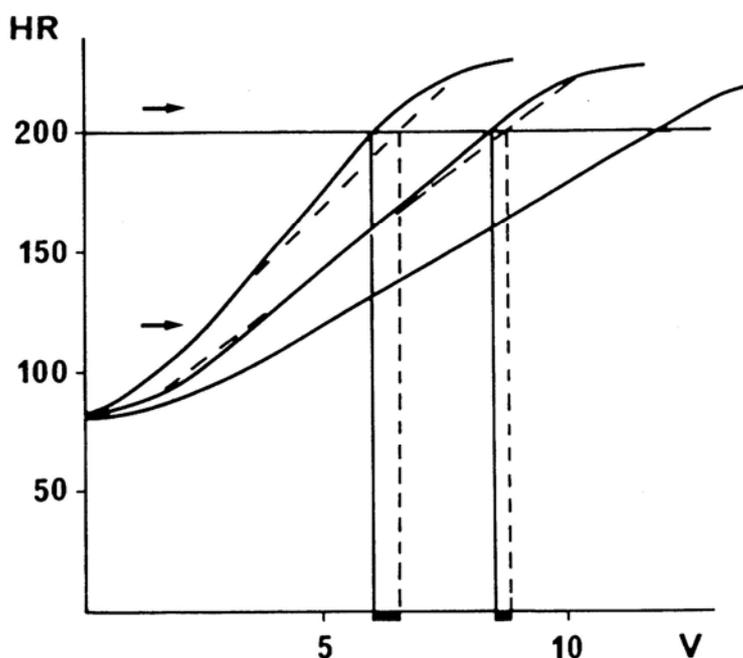
V = vitesse (en m/min),

m et n = constantes.

Même si un certain nombre de facteurs peuvent influencer cette droite, celle-ci reste très précise et reproductible lorsqu'elle est mesurée au cours d'un exercice standardisé (*Evans et Rose, 1988*).

## 2- Effet de l'entraînement sur la fréquence cardiaque

De nombreuses études ont montré que l'entraînement diminue la réponse cardiaque à un exercice standardisé (*Couroucé et al., 2002, Thornton, 1985, Marsland, 1968, Evans et Rose, 1988*) ; la vitesse à laquelle la fréquence cardiaque maximale est atteinte augmente avec l'entraînement. Cela peut être visualisé sur le graphique suivant ; l'entraînement a pour effet de décaler vers la droite les courbes de  $FC = f(V)$ .



**Figure 8 :** Relation entre la vitesse de course (V en m/s) et la fréquence cardiaque (HR) chez des chevaux non-entraînés (courbe de gauche), faiblement entraînés (courbe centrale) et ayant subi un entraînement d'endurance (courbe de droite). Les flèches indiquent les limites approximatives de la linéarité de la réponse cardiaque. Les pointillés traduisent la surestimation de la vitesse correspondant à une fréquence cardiaque de 200 liée à la non-linéarité de la réponse cardiaque (*Thornton, 1985*).

L'entraînement a pour effet général de diminuer la fréquence cardiaque de repos, la fréquence cardiaque de récupération ainsi que la fréquence cardiaque pendant un exercice submaximal (*Marsland, 1968*). En effet, la FC pour une charge de travail donnée indique dans quelle mesure le système cardiovasculaire est adapté à une intensité donnée d'exercice submaximal. Cependant, l'entraînement n'engendre aucune amélioration en ce qui concerne la FC maximale (*Evans et Rose, 1988*).

Une corrélation importante existe entre la fréquence cardiaque pendant un test d'effort et le meilleur temps en course; les chevaux avec les fréquences cardiaques les plus faibles pendant ces exercices submaximaux ont de meilleurs temps record en course (*Marsland, 1968*).

En pratique, la FC représente donc un très bon indicateur de la puissance aérobie mise en jeu. Cependant, lorsque la puissance musculaire déployée devient maximale pendant une durée inférieure à 5 minutes, comme c'est le cas en course de trot, la FC plafonne à des valeurs comprises entre 200 et 240 battements/min et ne permet plus de connaître avec exactitude la puissance énergétique demandée au cheval. L'une des méthodes proposées est de mesurer la concentration en acide lactique circulant dans le sang pour connaître la part d'énergie qui est fournie par la voie anaérobie. Ainsi la FC et la lactatémie constituent deux indices complémentaires et faciles à mesurer soit pour déterminer l'aptitude d'un athlète soit pour doser son travail à l'entraînement (*Barrey et Demonceau, 1990b*).

### ***C) La lactatémie***

Il s'agit de la concentration en acide lactique dans le sang, ce dernier provenant du muscle. La lactatémie est, à chaque instant, le reflet de l'équilibre entre la production et l'élimination de lactates par l'organisme. Elle témoigne donc de ce qui se passe au sein du muscle et plus généralement de la participation des différentes voies métaboliques qui ont permis l'accomplissement de l'effort. En reflétant l'intensité relative de la dégradation anaérobie du glycogène et du glucose, par rapport à leur dégradation aérobie, elle constitue un témoin privilégié du métabolisme énergétique sollicité lors de cet effort.

Toutefois, l'acide lactique est une molécule possédant une demi-vie courte (25 minutes environ après un exercice maximal) et sa concentration sanguine varie rapidement après l'arrêt de l'effort, ce qui nécessite que les prélèvements soient effectués dans des conditions bien précises.

Cependant, de nombreuses études indirectes du métabolisme musculaire au cours de l'effort ont été réalisées par le biais de la mesure de métabolites musculaires, et le plus usité est sans conteste le lactate (*Art et Lekeux, 1991*). En effet, moyennant le respect d'une stricte

standardisation, la mesure du lactate est actuellement universellement considérée comme un test fiable pour l'estimation de la condition physique et pour le suivi de son évolution avec l'entraînement (*Art et Lekeux., 1991, Fortier et al., 2000, Roneus et al., 1994*).

## 1- Diffusion du lactate hors de la cellule musculaire et répartition dans les différents secteurs

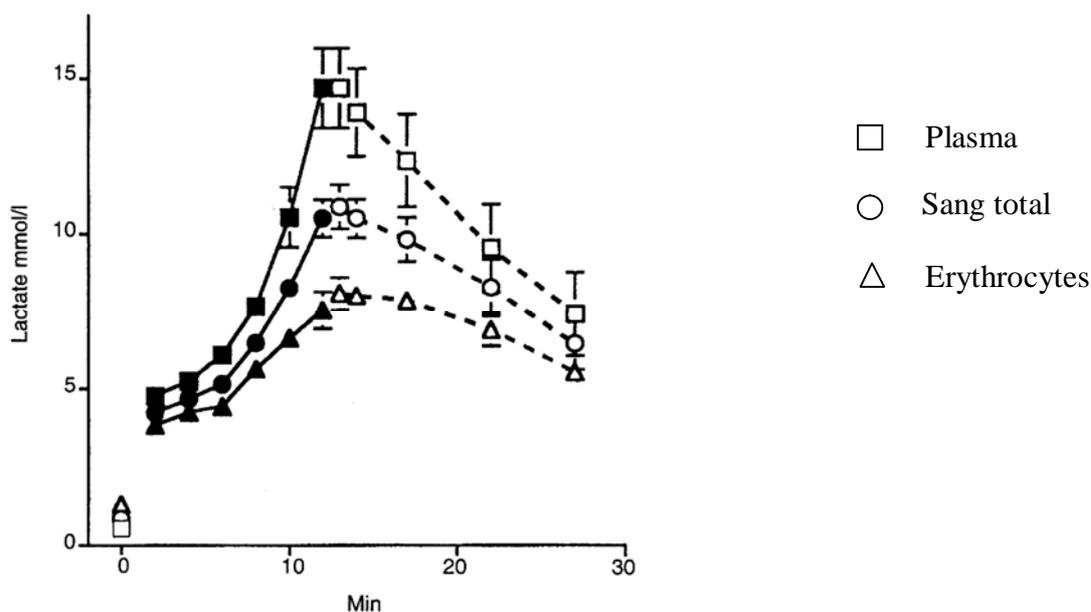
On peut noter qu'il existe une différence importante entre la concentration de lactate mesurée dans le muscle et celle du lactate sanguin. En effet, au cours de l'effort, le lactate qui est produit au sein de la cellule musculaire subit différentes évolutions : lors d'effort de faible intensité, il peut s'accumuler sur place et pour une part subir un processus d'oxydation en étant incorporé dans le cycle de Krebs. Mais il peut aussi, lorsque l'intensité de l'effort augmente, diffuser dans l'espace extracellulaire où il est capté et utilisé par d'autres fibres musculaires voisines ayant un métabolisme oxydatif plus marqué. Enfin lorsque les capacités d'absorption de l'ensemble des fibres musculaires sont saturées, l'acide lactique accumulé dans le compartiment musculaire diffuse alors vers le compartiment sanguin veineux efférent du territoire musculaire considéré (*Couroucé, 1993, Art et al., 2000*). Même si tous les auteurs ne s'accordent pas sur ce sujet et que les mécanismes régissant la sortie du lactate hors de la fibre musculaire ne sont pas bien connus, il semblerait qu'à partir d'un certain niveau de concentration intracellulaire il y ait un phénomène de saturation ; la quantité de lactate déversée dans le sang par unité de temps à partir des muscles en contraction reste constante, même lorsque la concentration en lactate dans le muscle continue à augmenter.

La concentration en lactate dans le sang ne dépend pas seulement de la libération de l'acide lactique par le muscle, mais aussi de son taux d'élimination à partir du sang, qui est influencé par de nombreux facteurs.

La lactatémie est donc la résultante d'un certain nombre de phénomènes métaboliques complexes, que nous ne faisons qu'évoquer, et qui sont sous l'influence de différents paramètres interférant avec les échanges de lactates (pH, température, ...). En dépit de ces considérations, on estime toutefois que l'augmentation des lactates sanguins est corrélée à la quantité de lactates présente dans le muscle et peut donc constituer un indice représentatif de la production d'acide lactique dans l'organisme lors d'un exercice (*Katz et Sahlin, 1988*).

Par ailleurs, il est possible de s'interroger sur la répartition de l'acide lactique entre les différents compartiments sanguins. En effet, il existe une distribution hétérogène des lactates entre le plasma et les érythrocytes. Plusieurs études ont montré une plus grande accumulation de lactate dans le plasma par rapport au sang total pendant l'exercice (*Ferrante, 1995, Pösö et al., 1995, Persson et al., 1995, Marlin et al., 1991*). La concentration en lactate dans les

globules rouges étant plus faible que dans le plasma, la concentration sanguine est inférieure à la concentration plasmatique, ce qui indique qu'au cours de l'exercice, la diffusion du lactate dans les érythrocytes est lente. Ce phénomène est illustré par le graphique suivant (Figure 9). Les courbes, indiquant les concentrations en lactates dans ces différents compartiments, divergent pendant l'exercice puis déclinent en convergeant après l'exercice, suggérant une équilibration graduelle entre le plasma et les globules rouges.



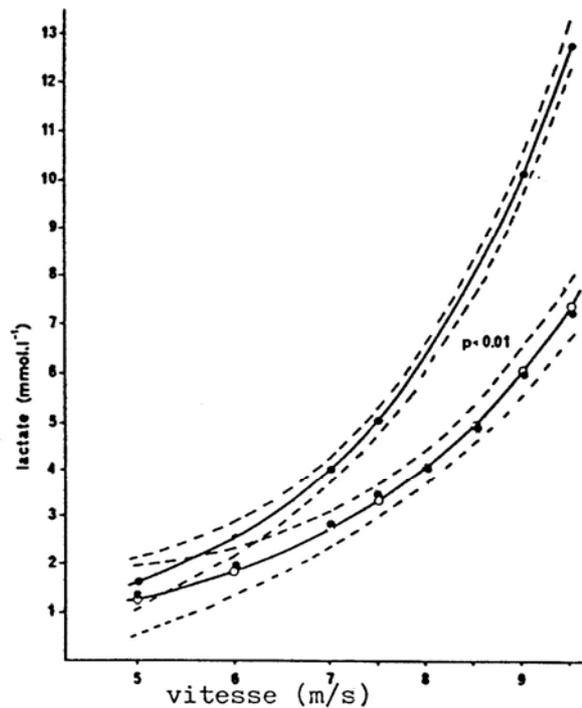
**Figure 9 :** Valeurs moyennes de concentrations en acide lactique (mmol/L) dans le plasma, sang total et érythrocytes, avant (symboles vides), pendant (symboles et traits pleins) et après (symboles vides et pointillés) un exercice prolongé sur tapis roulant (*Persson et al., 1995*).

Cependant, cette diffusion du lactate dans les globules rouges varie beaucoup selon les individus et l'état d'entraînement. De plus, il faut tenir compte du fait que le pourcentage de globules rouges dans le sang peut augmenter de 30 % au repos à 65 % lors d'un exercice intense. Il faut donc réaliser les prélèvements après un échauffement afin de permettre à l'hématocrite d'augmenter et ainsi d'éviter une mauvaise estimation du sang total.

D'après *Väihkönen et al. (1999)*, la mesure de la lactatémie sur sang total donne une meilleure image de l'accumulation des lactates dans le sang à partir du muscle qui travaille, par rapport au plasma et permet aussi d'éviter les problèmes liés à la distribution des lactates entre les différents compartiments. De plus, comme le montre *Räsänen et al. (1995)*, étant donné que le transport des lactates dans les érythrocytes présente des variations interindividuelles et qu'il est difficile d'établir une corrélation entre les concentrations plasmatiques et les indices de performances (alors que les concentrations sanguines y sont corrélées), il faut préférer la mesure de la lactatémie sur sang total lorsqu'on veut estimer l'accumulation de lactate suite à un exercice donné.

## 2- Cinétique de l'acide lactique sanguin pendant l'effort

En 1983, *Thornton et al.* et *Wilson et al.* montrent que la lactatémie suit une évolution de type exponentiel en fonction de la vitesse (Figure 10).



**Figure 10 :** Evolution de la lactatémie en fonction de la vitesse chez des chevaux entraînés (o) et des chevaux au repos (●) (*Thornton et al.*, 1983).

Ainsi ils établissent l'équation suivante pour caractériser cette évolution de la lactatémie avec la vitesse :

$$\mathbf{La = a \times e^{bV}}$$

Avec : - La = concentration en acide lactique en mmol/L

- V = vitesse en m/min

- a et b = constantes

Comme nous le verrons par la suite, il existe une différence entre les groupes de chevaux en fonction de leur niveau d'entraînement, les chevaux entraînés ayant une pente (b) d'accumulation des lactates plus faibles que les chevaux non-entraînés.

Ce modèle a été confirmé par d'autres études, notamment celle de *Demonceau et al.* (1991 et 1992), qui exprime la lactatémie en fonction de la vitesse par le modèle suivant :

$$\mathbf{La = e^{(AV+B)} + C}$$

Avec : - La = concentration en acide lactique en mmol/L

- V = vitesse en m/min

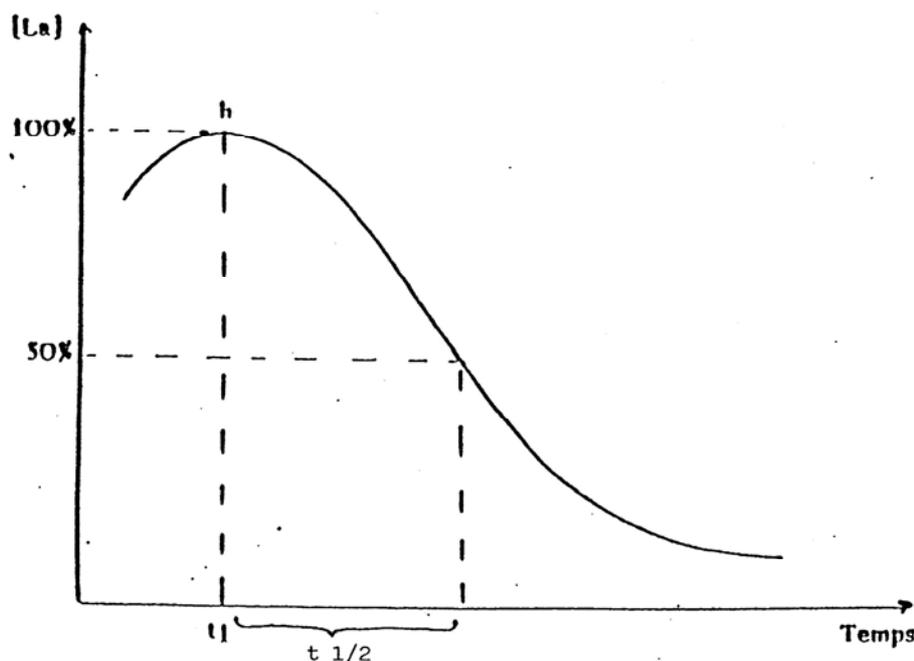
- A = coefficient de curvilinearité spécifique de l'entraînement suivi

- B et C = constantes

A l'issue d'une course de vitesse, la lactatémie peut atteindre des valeurs de 25 à 30 mmol/L suivant les disciplines. Au terme d'un effort d'intensité moyenne, ces valeurs présentent un pic en fin d'effort. Lorsque l'effort est très intense, le seuil d'accumulation sanguine d'acide lactique (SASAL) est franchi et dans ce cas la lactatémie continue d'augmenter après l'arrêt de l'effort. Ce phénomène s'explique par la saturation de la vitesse de diffusion à travers la membrane des cellules musculaires, comme nous l'avons évoqué précédemment, avec pour conséquence une diffusion qui continue au-delà de la fin de l'effort (Marlin *et al.*, 1991). Ainsi, Harris et Snow (1988) montrent que chez des galopeurs soumis à des exercices d'intensité élevée sur tapis roulant, les concentrations maximales en lactates ne sont atteintes que pendant la phase de récupération.

### 3- Clairance de l'acide lactique sanguin après l'effort

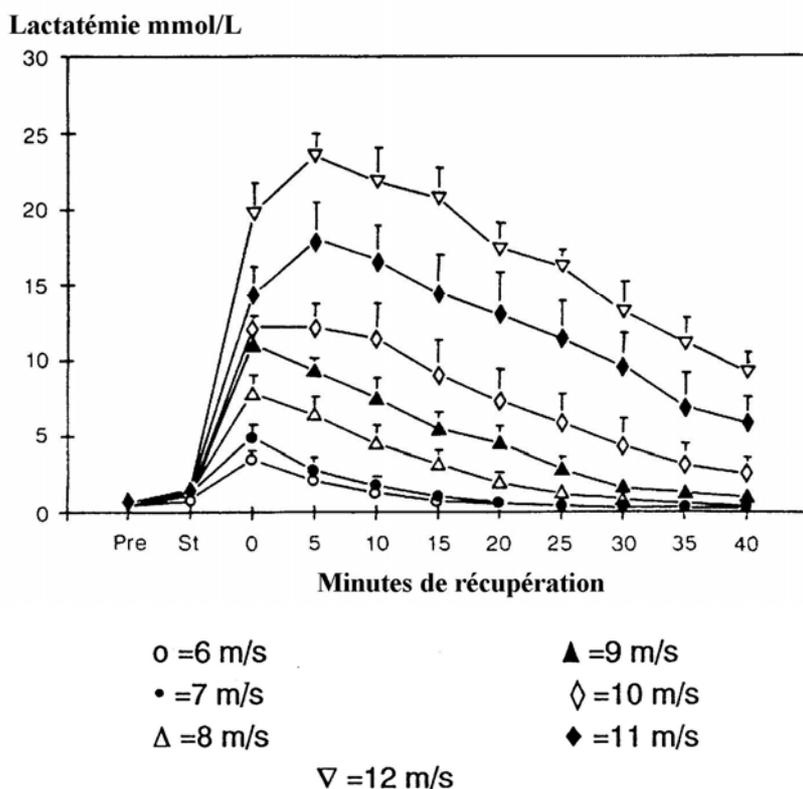
Des études réalisées chez l'homme ont permis d'établir un modèle de cinétique des lactates sanguins après un effort maximal ou supramaximal (Figure 11) (Auvinet *et al.*, 1991b).



**Figure 11 :** Cinétique des lactates sanguins après un effort maximal ou supramaximal chez l'homme (Auvinet *et al.*, 1991b).

La première partie de la courbe est ascendante jusqu'à une valeur maximale appelée pic de l'acide lactique sanguin, caractérisé par sa hauteur  $h$  et son temps d'apparition  $t_1$ . La seconde partie de la courbe, descendante, correspond à l'élimination des lactates et elle est de type exponentiel. Elle se caractérise par la durée de demi-vie du lactate  $t_2$  (temps nécessaire à la diminution des concentrations plasmatiques en lactates sanguins de 50%). Pour certains auteurs, ce modèle est transposable au cheval.

Cependant, *Marlin et al. (1991)* étudiant la cinétique de la concentration d'acide lactique sanguin chez des Pur-sang devant réaliser sept intensités d'effort sur tapis roulant, n'aboutissent pas aux mêmes conclusions ; d'après leurs résultats, la clairance des lactates post-exercice est décrite par une cinétique d'ordre zéro et non pas exponentielle (Figure 12).



**Figure 12 :** Cinétique des lactates sanguins chez des chevaux soumis à différentes vitesses post-exercice sur tapis roulant incliné à 5° pendant 40 minutes (*Marlin et al., 1991*).

De plus, avec des valeurs entre 25 et 63 mmol/L/h, cette étude montre aussi que l'élimination de l'acide lactique, dans le sang comme dans le plasma, est indépendante de l'intensité de l'exercice réalisé. Cela est en désaccord avec l'étude d'*Auvinet et al. (1991b)* qui mesure l'évolution de la lactatémie après un cross sur des chevaux de CCE et qui montre que la cinétique des lactates sanguins après l'effort dépend très largement de cet effort ; plus il est long et intense, plus le pic des lactates est élevé et retardé dans son temps d'apparition.

De façon générale, on peut retenir que l'allure de la courbe de cinétique de l'acide lactique sanguin post-exercice est influencée par de nombreux facteurs, notamment par le type

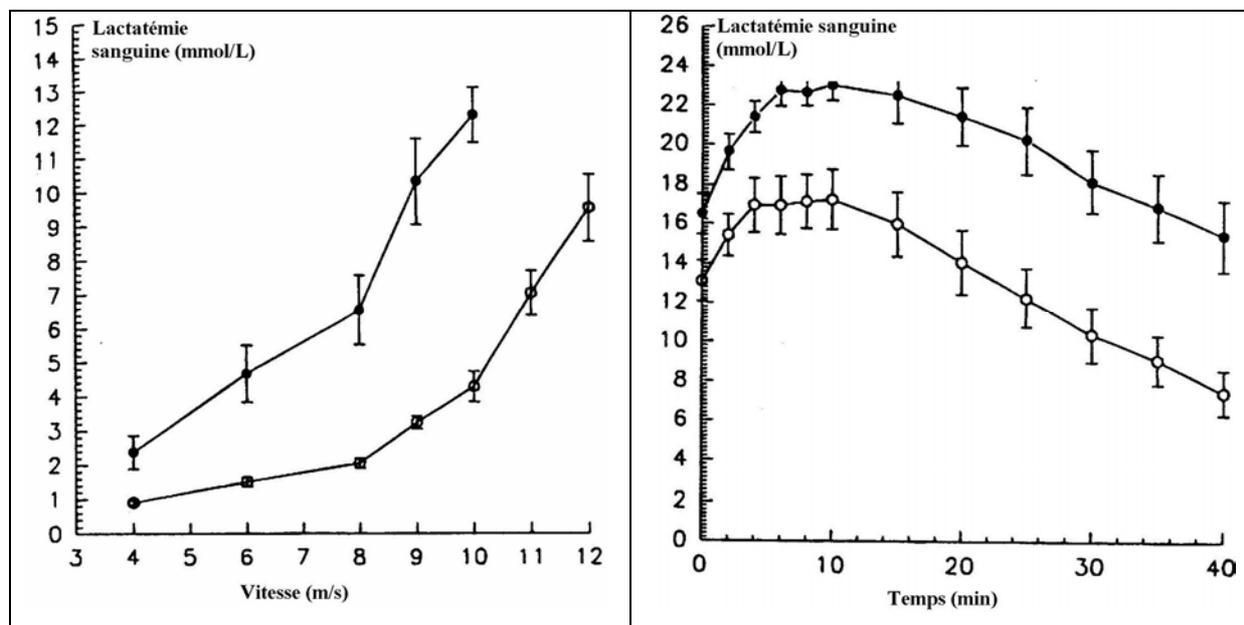
et la durée de l'exercice réalisé, mais surtout par l'existence ou non d'une récupération active. A ce sujet les auteurs sont plus unanimes et il est communément admis que la clairance de l'acide lactique sanguin est accélérée par la réalisation d'un exercice modéré après le travail. Ainsi, *Marlin et al. (1987)* et *Lovell et Rose (1995)*, ont démontré que la diminution de la concentration en lactates plasmatiques pendant la période de récupération est dépendante de l'intensité de l'exercice post-exercice.

Enfin, d'autres paramètres ont un effet sur la clairance de l'acide lactique ; c'est le cas des facteurs génétiques, mais aussi de l'état d'entraînement du sujet, comme nous allons le voir ici.

#### 4- Effet de l'entraînement sur la lactatémie et lien avec les indices de performances en course

Que ce soit chez l'homme (*Francaux et al., 1993*), les Pur-sang (*Weber et al., 1987, Rainger et al., 1994*) ou les trotteurs (*Couroucé et al., 2002*), de nombreuses études ont montré que l'entraînement a pour effet de diminuer la concentration sanguine en lactates pendant l'exercice, en augmentant la clairance métabolique de l'acide lactique. Elles indiquent que cette augmentation de clairance serait le reflet d'une adaptation à l'effort, liée à l'entraînement. Cette diminution de la lactatémie peut aussi être interprétée, d'après certains auteurs (*Couroucé et al., 2002*), comme l'expression d'une meilleure maîtrise de la production aérobie d'énergie, grâce à un transport plus efficace de l'oxygène aux muscles pendant l'exercice ou une augmentation de la consommation d'oxygène. D'autres études, comme celles d'*Evans et al. (1995)* ou de *Rainger et al. (1994)*, ne sont pas en accord avec ces résultats ; elles obtiennent des clairances de lactates sanguins qui ne diffèrent pas significativement entre les chevaux entraînés et non-entraînés. Cependant, ces études utilisent des méthodologies différentes (comparaisons chevaux « désentraînés »/non-entraînés, comparaisons de deux vitesses d'entraînement) qui pourraient expliquer les divergences de résultats observées.

Les graphiques suivants (*Rainger et al., 1994*) illustrent la diminution de la lactatémie avec l'entraînement, aussi bien pendant la phase d'effort (ici un test d'effort sur tapis roulant) que lors de la phase de récupération post-exercice.



**Figure 13 :** Concentrations sanguines en lactates chez des chevaux entraînés (o) et désentraînés (●), lors d'un test d'effort sur tapis roulant (graphique gauche) et lors de la phase de récupération (graphique droit) (Rainger et al., 1994).

En outre, l'entraînement améliore aussi les capacités anaérobies et le pouvoir tampon du milieu cellulaire. En effet, lors d'efforts supramaximaux, c'est-à-dire quand le cheval est au maximum de ses capacités (comme en course), un cheval entraîné aura une lactatémie plus élevée que le cheval non entraîné qui travaille dans les mêmes conditions (Art et al., 2000).

Ces constatations sont confirmées par les résultats en course ; en effet, Persson et Ullberg (1974) montrent que chez les trotteurs, les concentrations sanguines en lactates après un exercice submaximal sont positivement corrélées aux indices de performances en course. Il en est de même chez les galopeurs (Evans et al., 1993).

L'étude de Räsänen et al. (1995), révèle que l'accumulation post-exercice de lactates dans le sang est plus importante chez les chevaux dont les niveaux de performance sont supérieurs et qu'elle s'avère être un indicateur utile des capacités anaérobies.

L'entraînement améliore donc les capacités aérobie musculaires et augmente la capacité de l'organisme à gérer sa production d'acide lactique. Cela retarde d'autant le moment où le SASAL sera franchi. Par conséquent la vitesse à laquelle le cheval doit courir pour franchir ledit seuil est d'autant plus rapide que son niveau d'entraînement est élevé. Afin de comparer différents chevaux entre eux ou un même cheval dans des conditions différentes, il est donc nécessaire de définir des paramètres permettant de caractériser le franchissement de ces « seuils ».

## ***D) Notion de seuils et description de paramètres d'aptitude physique***

### **1- Seuils aérobie et anaérobies**

Comme nous l'avons vu précédemment, en fonction des allures et de la vitesse du cheval, le métabolisme recruté est de type aérobie, anaérobie ou mixte. La succession de ces différentes voies énergétiques au cours de l'effort permet de définir des seuils, grâce aux mesures de lactatémie réalisées au cours des tests d'effort standardisés.

Le seuil aérobie, obtenu à partir de la courbe de lactatémie en fonction de la vitesse, est défini comme la vitesse correspondant à une concentration sanguine de lactate de 2 mmol/L. Concrètement, il représente la limite supérieure d'un travail aérobie strict. Ce paramètre ne revêt qu'une importance mineure dans l'évaluation du Trotteur dans la mesure où celui-ci évolue à des vitesses bien supérieures.

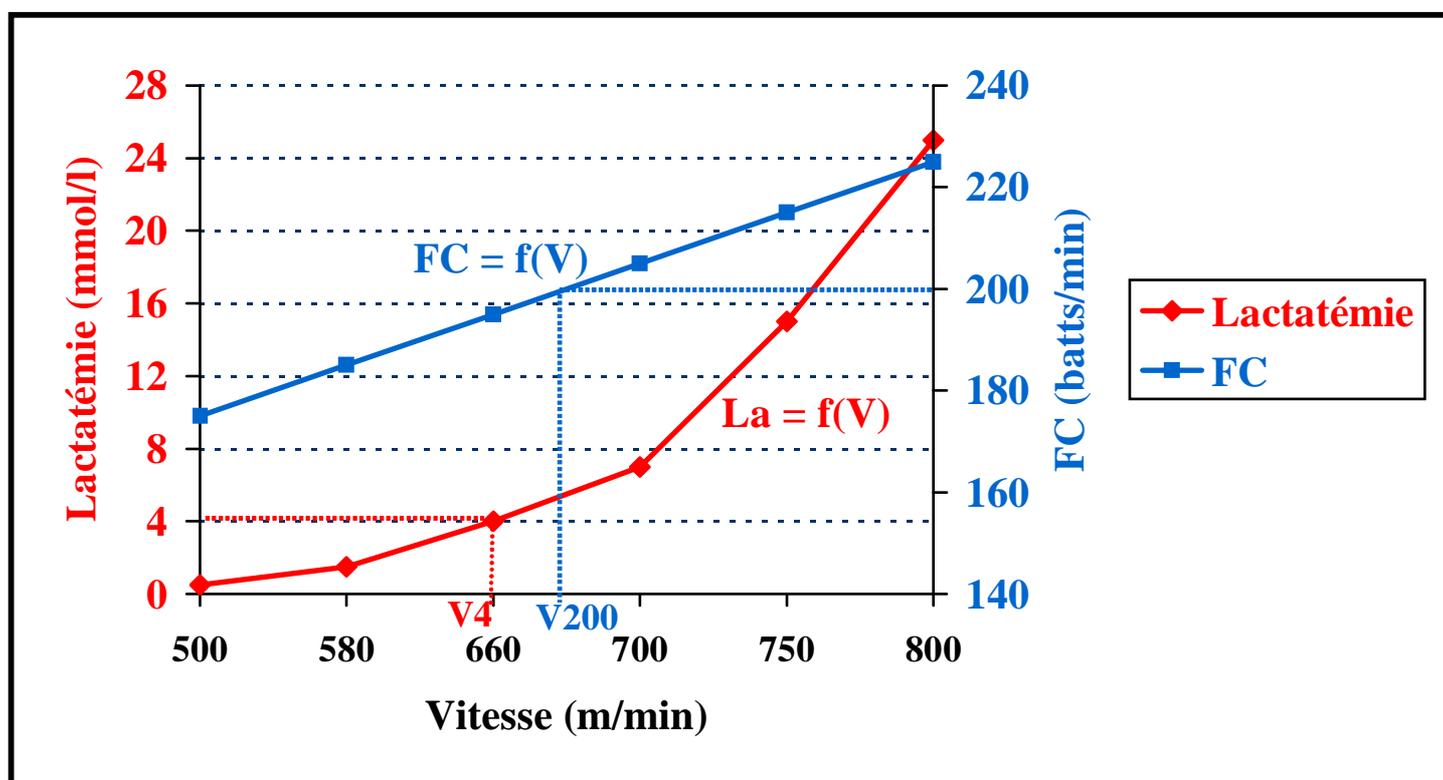
Le concept de seuil anaérobie correspond au fait qu'à un certain niveau d'augmentation de la charge de travail, une disproportion se produit entre la production de lactate et son utilisation, ce qui se manifeste par une augmentation non-linéaire de la lactatémie (*Fric et al., 1988*). Ainsi, la zone de la courbe  $La = f(V)$  où l'on observe une rupture de pente est définie comme étant le seuil anaérobie lactique (*Barrey et Demonceau, 1990b*). Il représente le niveau de travail juste en dessous celui auquel l'acidose métabolique s'installe (*Wilson et al., 1983*) et comme on le verra par la suite, il correspond généralement à une lactatémie de 4 mmol/L. Concrètement, le seuil anaérobie correspond à une intensité maximale de travail musculaire qui est soutenable pendant une longue durée sans apparition rapide du phénomène de fatigue (*Barrey et Demonceau, 1990b*).

Cependant comme le souligne *Bayly (1989)*, ces notions de seuils sont à nuancer ; en effet, le métabolisme aérobie ne s'arrête pas brutalement et le métabolisme anaérobie ne « s'allume » pas non plus d'un seul coup. De plus la production de lactate n'est pas forcément synonyme d'état anaérobie dans la mesure où un certain degré de glycolyse anaérobie et de phosphorylation oxydative se produisent en même temps à tous les niveaux d'exercice, la contribution relative de chaque voie dans la synthèse globale d'ATP variant en fonction de l'intensité de l'exercice. C'est pourquoi *Bayly (1989)* considère le terme « seuil anaérobie » comme inapproprié et préfère l'emploi de OBLA (Onset of Blood Lactate Accumulation) qui équivaut au SASAL que nous avons mentionné précédemment (Seuil d'Accumulation Sanguine d'Acide Lactique) (*Couroucé, 2000*) et qui reflète plus justement les processus métaboliques se déroulant à ce moment là.

## 2- Description de paramètres d'aptitude physique

Les épreuves d'effort standardisées de terrain permettent d'évaluer les fonctions cardio-respiratoires et métaboliques au cours de l'exercice grâce au calcul de paramètres physiologiques. En effet, à partir des variables mesurées (vitesse, fréquence cardiaque et lactatémie), des paramètres dérivés peuvent être calculés afin de comparer plusieurs chevaux entre eux ou encore un même cheval dans des conditions différentes, comme par exemple lorsqu'il est attelé ou monté.

Pour cela, le tracé des droites  $FC = f(V)$  et  $La = f(V)$  permettent de déterminer deux paramètres d'aptitude physique :  $V_4$  et  $V_{200}$ .



**Figure 14** : Evolution de la lactatémie et de la fréquence cardiaque en fonction de la vitesse et position des points  $V_4$  et  $V_{200}$ .

### a- Rapport vitesse /lactatémie : le paramètre $V_4$

La transition aéro-anaérobie ou le début de l'accumulation sanguine de lactate est définie empiriquement à 4 mmol/l de sang (Wilson et al., 1983). En effet, chez l'homme à l'exercice, le niveau d'intensité de travail induisant une accumulation de lactates sanguins est considéré comme celui qui conduit à une lactatémie de 4 mmol/L (Thornton et al., 1985). Même s'il n'est pas possible de définir précisément le niveau de lactates auquel l'accumulation débute, la similarité des courbes de production de lactate chez l'homme et le cheval suggère que la

valeur de 4 mmol/l peut être retenue comme une bonne estimation de ce seuil. De plus, il a été démontré chez le cheval que la répétition de paliers d'exercices induisant moins de 4 mmol/L de lactatémie ne provoquait pas d'accumulation lactique, tandis que la répétition de paliers induisant des lactatémies supérieures à 4 mmol/L entraînait une accumulation (*Thornton et al., 1985*).

C'est pourquoi, afin de comparer la réponse lactique de plusieurs chevaux ou d'un même cheval dans des conditions différentes, on utilise le paramètre  $V_4$ . Il s'agit de la vitesse à laquelle la concentration de lactates dans le sang est de 4 mmol/L (Figure 14). Chez le trotteur, la  $V_4$  est la valeur de référence pour évaluer l'aptitude physique dans la mesure où elle représente un très bon indicateur de la capacité aérobie du cheval (*Couroucé, 1999a*). La  $V_4$  est en fait la vitesse correspondant au seuil anaérobie décrit précédemment, c'est-à-dire à la zone de transition entre métabolisme aérobie et anaérobie. Ce paramètre a un intérêt considérable dans la détermination du niveau de travail qui peut être retenu dans un programme d'entraînement (*Thornton et al., 1985*). En effet, à cette vitesse, qui correspond en général à 80-85 % de la vitesse max, le cheval doit travailler à la fois son métabolisme aérobie et anaérobie tout en évitant l'accumulation de lactates et le développement de fatigue.

La connaissance du paramètre  $V_4$ , « seuil de fatigue » du cheval, permet ainsi d'évaluer sa « tenue » au cours d'un effort. Ce paramètre est d'autant plus pertinent qu'il est directement corrélé au niveau de performance en course. Ainsi, plus la  $V_4$  est élevée, plus l'accumulation d'acide lactique est retardée dans le temps et donc meilleure est la « tenue » du cheval.

#### *b- Rapport vitesse / fréquence cardiaque : le paramètre $V_{200}$*

Comme nous l'avons décrit précédemment, la fréquence cardiaque suit une relation linéaire en fonction de la vitesse, ce qui permet le calcul d'un paramètre de référence pour évaluer la réponse cardiaque à l'effort : la  $V_{200}$ . Il s'agit de la vitesse à laquelle la fréquence cardiaque est de 200 btts/minute. Elle correspond à une charge de travail proche de celle nécessitant une consommation maximale d'oxygène. D'après *Thornton (1985)*,  $V_{200}$  est le paramètre de choix pour estimer la tolérance à l'exercice et la condition physique du cheval, et permet la comparaison de capacités cardiovasculaires. Ainsi, plus la  $V_{200}$  est élevée, meilleure est l'aptitude cardiaque à l'effort.

Par ailleurs, de nombreux auteurs (*Wilson et al., 1983, Persson, 1983, Demonceau et Auvinet, 1992, Couroucé, 1999a, Couroucé et al., 2002, Leleu, 2004a*,) ont montré que chez

des chevaux adultes, la fréquence cardiaque correspondant à  $V_4$  est très proche de 200 bts/min en moyenne, qui semble donc représenter la fréquence cardiaque au seuil lactique.

c- Valeurs de  $V_4$  et  $V_{200}$  en fonction de l'âge et de l'état d'entraînement

Age (années)	Etat d'entraînement	$V_4$ (m/min)	$V_{200}$ (m/min)
1	Début	512 ± 7	498 ± 14
2	Début	525 ± 7	514 ± 12
	Entraînement endurance	548 ± 4	539 ± 6
3	Entraînement sprint	569 ± 5	552 ± 8
	Entraînement endurance	574 ± 7	572 ± 6
	Entraînement sprint	586 ± 13	585 ± 10
4	Course	606 ± 4	599 ± 6
	Entraînement endurance	595 ± 6	601 ± 10
	Entraînement sprint	609 ± 8	615 ± 11
5	Course	619 ± 5	619 ± 6
	Entraînement endurance	599 ± 11	613 ± 12
	Entraînement sprint	615 ± 8	620 ± 8
≥6	Course	627 ± 4	631 ± 6
	Entraînement endurance	605 ± 8	622 ± 11
	Entraînement sprint	609 ± 12	635 ± 17
	Course	634 ± 7	645 ± 8

**Tableau 2** : Valeurs moyennes et intervalles de confiance ( $\pm 95\%$ ) de  $V_4$  et  $V_{200}$  en m/min à différents âges et états d'entraînement, calculées chez 194 Trotteurs Français réalisant 1105 tests d'efforts standardisés sur une piste d'une longueur de 720 m (Couroucé et al., 2002).

d- Relation entre paramètres d'aptitude physique et indices de performances

Nombreuses sont les études qui ont étudié les corrélations entre  $V_4$ ,  $V_{200}$  et les indices de performances en course. En effet, même si ces paramètres sont mesurés lors d'un exercice submaximal, ils sont étroitement liés aux résultats obtenus en courses (Persson, 1995,

*Couroucé et al., 1997, Couroucé, 1999a, Davie et al., 2002, Leleu et al., 2005*). Ainsi, une corrélation entre  $V_4$  et les gains en course a pu être mise en évidence. De même en classant les chevaux en différentes catégories selon leurs performances en course, plusieurs auteurs ont montré que les paramètres  $V_4$  et  $V_{200}$  sont significativement meilleurs pour les chevaux d'élite par rapport aux performers moyens, qui ont eux-mêmes de meilleurs paramètres que les mauvais performers.

Le suivi de la fréquence cardiaque et de la lactatémie constituent donc deux indices complémentaires et faciles à mesurer pour déterminer l'aptitude d'un cheval-athlète (*Barrey et Demonceau, 1990b*). Cependant, la seule investigation du métabolisme énergétique se révèle insuffisante pour complètement appréhender la réponse d'un cheval à l'effort. En effet, le trot repose sur une gestuelle très particulière et la bonne mécanisation de l'allure conditionne aussi la performance.

### **III- LE SCHEMA LOCOMOTEUR DU TROT**

Afin d'analyser la locomotion du cheval, différentes méthodes de mesure ont été développées. Les méthodes cinématiques, initialement utilisées en médecine humaine, permettent, en visualisant le mouvement image par image, d'effectuer des mesures de trajectoires et de déplacements angulaires des différentes parties du corps. C'est ainsi que les travaux de *Drevemo et al. (1980 a, b, c)*, se basant sur des études cinématiques à haute vitesse, ont permis de caractériser la locomotion du trotteur grâce à la détermination de caractéristiques temporelles et linéaires des foulées.

Plus récemment, des techniques accélérométriques se sont développées ; elles reposent sur l'utilisation de capteurs d'accélération, sensibles aux variations de la vitesse. Il est possible de les placer sur le cheval afin d'enregistrer les mouvements de son corps ou de ses membres, dont la vitesse change sans cesse au cours du déplacement. Cette méthode, développée par *Barrey et al. (1993a, 1994, 1995b)*, utilise une ceinture accélérométrique qui mesure les variations de vitesse au niveau du sternum du cheval et donne des informations sur les variables temporelles des foulées et sur la cinétique du centre de gravité. Ce dispositif présente l'avantage de permettre l'étude de la locomotion dans les conditions de terrain, mais ne fournit aucune information sur la cinématique des articulations ou des segments des membres (*Leleu, 2002*).

Enfin, d'autres auteurs, comme *Preedy et Colborne (2001)*, se sont attachés à décrire la locomotion du point de vue de son coût mécanique ; en modélisant le corps du cheval comme un système de segments reliés entre eux, ils ont étudié les échanges énergétiques au sein de chaque segment et entre les segments.

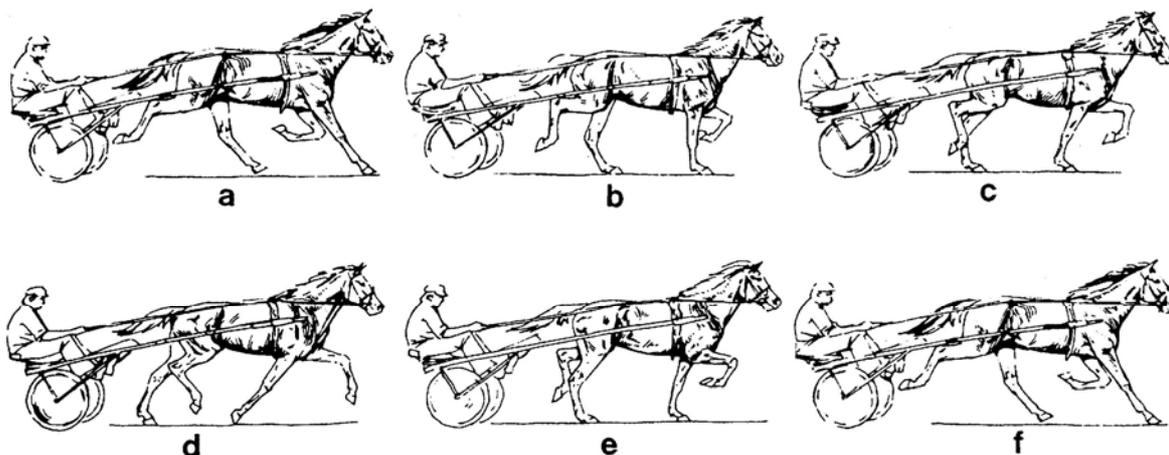
#### ***A) Description de l'allure***

Le trot est une allure naturelle, à deux temps, dans laquelle les membres sont associés par bipèdes diagonaux. En effet, les membres antérieurs et postérieurs opposés se déplacent simultanément (ex : antérieur droit et postérieur gauche).

Par ailleurs, il s'agit d'une allure symétrique dans la mesure où le geste des membres est identique de part et d'autre du plan sagittal de l'animal : les membres diagonaux se déplacent de façon synchrone. Les deux bipèdes diagonaux se posent donc au sol alternativement après

une phase de suspension. Le trot est par conséquent qualifié d'allure « sautée » : au cours d'une foulée le cheval est en suspension à deux reprises (*Drevemo et al., 1980b*).

Le trot est une allure stable et particulièrement économique pour le cheval du point de vue de l'énergie qu'il dépense pour se déplacer.



**Figure 15** : Le schéma locomoteur du trot attelé : visualisation d'une foulée complète (*Drevemo et al., 1980a*).

## ***B) Les différentes phases du trot***

Lorsqu'on considère le cycle complet réalisé par un membre, celui-ci est composé de deux phases (*Drevemo et al., 1980a*) :

- La phase d'appui, pendant laquelle le pied est en contact avec le sol (du poser du pied à son lever : **a** à **e** sur la figure 16).
- La phase de suspension ou de soutien, lorsque le pied est soulevé et porté vers l'avant pour être posé au sol à nouveau (du lever du pied à son poser : **f** à **h** sur la figure 16).

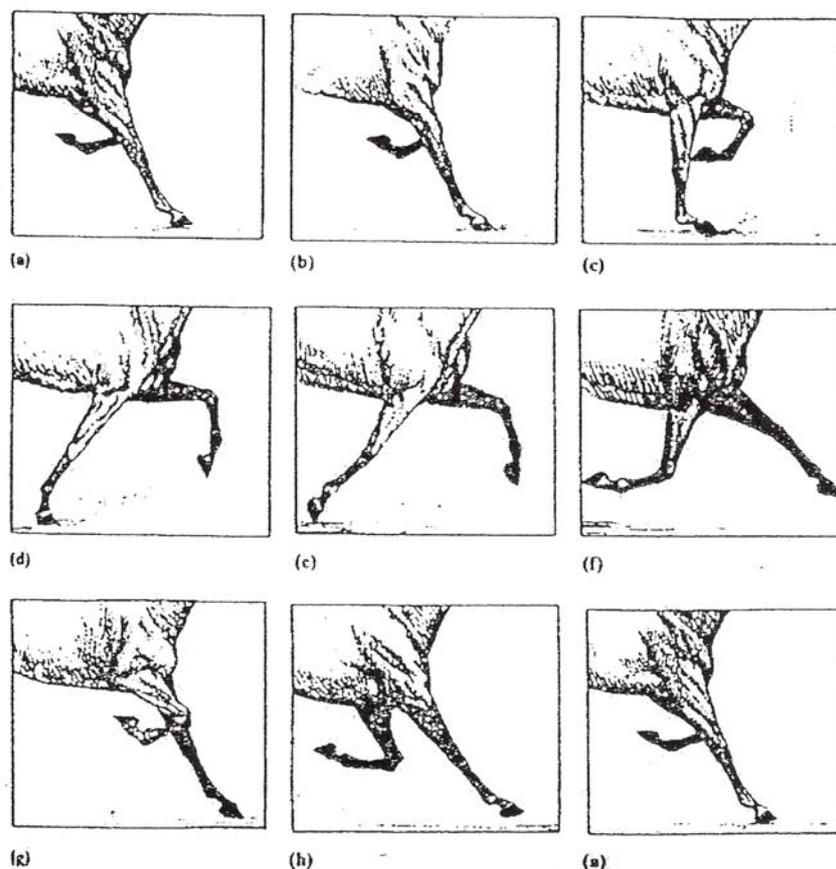
### **1- La phase d'appui**

Elle est elle-même constituée de trois périodes :

- Le freinage ou amortissement : entre le poser des talons et le milieu de l'appui (**a** et **b**).
- L'appui maximal ou soutènement : le canon est vertical pour les antérieurs et le sabot postérieur est sur la même verticale que la hanche (**c**).
- La propulsion : entre la verticalité du canon et le lever du pied (**d** et **e**) ; le membre passe la verticale et s'étend, dans une position de complète rétraction, puis le sabot se soulève.

## 2- La phase de suspension

- Le ramener : le sabot est levé et le membre tiré vers l'avant, en même temps qu'il se fléchit et se raccourcit (**f**).
- Le milieu de soutien : le sabot se trouve alors sous le coude (**g**).
- L'embranchée : le membre est étendu et porté fortement en avant dans un mouvement de protraction (**h**).



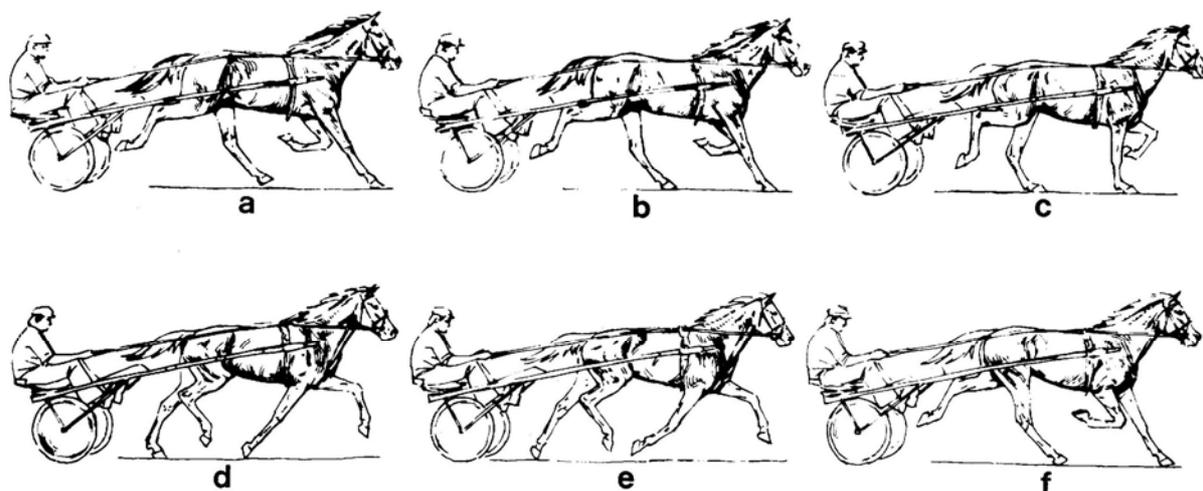
**Figure 16** : Les différentes phases d'une foulée de trot (Leleu, 2004a).

## ***C) Modifications du schéma locomoteur avec la vitesse***

### 1- Dissociation diagonale et « flying-trot »

Le trot est une allure symétrique dans laquelle les membres diagonaux se déplacent de façon synchrone. Cependant, avec l'augmentation de la vitesse, la synchronisation des déplacements diagonaux peut être partiellement ou complètement perdue ; à très grande

vitesse ou « flying-trot », le trotteur dissocie ses diagonaux de façon à ce que le pied antérieur atterrisse légèrement avant le pied postérieur du même diagonal (*Drevemo et al., 1980b, Clayton, 1994*). Cela donne au postérieur un champ de mouvement plus étendu et est plus favorable à une augmentation de la vitesse. Comme on peut le visualiser sur la figure 17, cette dissociation diagonale entraîne de courtes périodes où le cheval est en appui sur un seul membre, entre les périodes d'appui bipodal et de suspension.



**Figure 17** : Schématisation de la dissociation du diagonal droit à grande vitesse : les schémas **a** et **b** illustrent la dissociation au poser du membre et les schémas **d** et **e** au lever (*Drevemo et al., 1980b*).

En outre, lors de ce trot de course, le cheval marche en abduction constante bilatérale, c'est-à-dire que les postérieurs suivent deux pistes extérieures par rapport à celles des antérieurs, le trot devenant alors à quatre pistes. On parle d'allure « sortante » (*Serraud, 2004*).

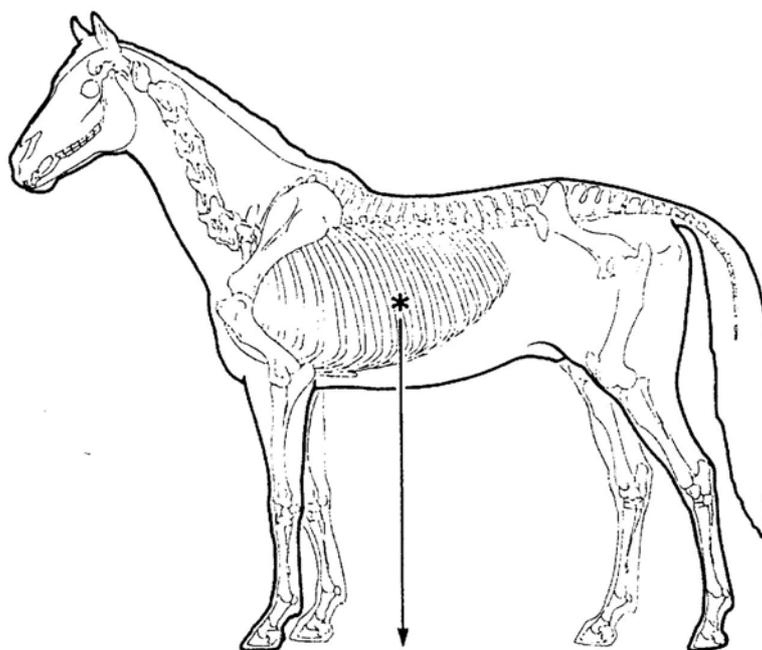
## 2- Modification des caractéristiques spatio-temporelles des foulées

Quand le cheval accélère il augmente la taille de ses foulées (*Drevemo et al., 1980a*). De plus, lorsque la vitesse augmente, la fréquence des foulées augmente de façon linéaire et la durée de la phase d'appui diminue (*Wickler et al., 2002, Robert et al., 2002*). Cependant, le pourcentage d'augmentation de la longueur des foulées est plus grand que le pourcentage de baisse de leur durée. L'augmentation de la vitesse serait donc principalement due à l'augmentation de la taille des foulées plutôt qu'à celle de leur vitesse d'exécution. Ainsi, comme l'ont montré *Roneus et al. (1995)*, les trotteurs les plus performants sont ceux qui ont les foulées les plus longues à vitesses égales.

De plus, lorsque la vitesse de trot augmente, on observe une plus grande reproductibilité du schéma locomoteur, que l'on pourrait expliquer par la nécessité croissante d'obtenir la foulée la plus efficace possible, ou par une plus grande concentration du cheval à sa tâche.

#### ***D) Localisation et mouvements du centre de gravité***

Le centre de gravité est un facteur clé dans l'analyse de la locomotion équine, dans la mesure où sa position et ses mouvements déterminent la distribution et l'intensité des charges sur les membres. D'après plusieurs études (*Sprigings et Leach, 1986, Clayton, 1989, Buchner et al., 2000*), l'emplacement du centre de gravité du cheval se trouverait à l'intersection de la verticale passant en arrière du processus xiphoïde et de l'horizontale limitant le tiers inférieur et le tiers moyen de la hauteur thoracique (figure 18). Cependant, cette position est extrêmement variable selon la posture du cheval.



**Figure 18** : Localisation du centre de gravité chez le cheval à l'arrêt (*Clayton, 1989*).

Pendant le mouvement du trot, le centre de gravité du corps se déplace selon trois axes : il subit un mouvement sinusoïdal dans le plan sagittal ainsi qu'un mouvement transversal linéaire accompagné d'oscillations dorso-ventrales.

Cependant, au trot, les mouvements latéraux restent très faibles par rapport aux mouvements dorso-ventraux. Ces mouvements latéraux de faible amplitude sont compatibles avec le maintien de l'équilibre et l'augmentation de la vitesse, puisque ainsi l'essentiel de l'énergie peut être déployé dans le mouvement en avant.

## ***E) Reproductibilité et efficacité énergétique du trot***

A court terme et individuellement, les trotteurs présentent une très bonne reproductibilité du schéma locomoteur de base à grande vitesse. En effet, les caractéristiques des foulées sont répétées avec une stabilité très marquée (*Drevemo et al., 1980a*). Par contre, à long terme, la longueur de foulée augmente de même que la durée de la foulée et de la phase de suspension, ce qui pourrait probablement être lié à l'entraînement (*Drevemo et al., 1980b*).

Il a été démontré que les asymétries dans le schéma locomoteur sont souvent associées à de faibles performances (*Clayton, 1994*). Il est à noter que malgré cette reproductibilité globale du trot, 66 % des chevaux présentent des différences significatives entre les périodes de suspension de leurs diagonaux droits et gauches : les trotteurs ont souvent un diagonal plus fort que l'autre, à la manière de la latéralisation qui existe chez l'homme. Il faut donc souligner que des chevaux cliniquement sains, à des vitesses de course, montrent fréquemment des schémas locomoteurs asymétriques (*Drevemo et al., 1980 a, b*).

Plusieurs études ont permis de montrer que quand les chevaux peuvent choisir, ils parviennent, en sélectionnant différents changements de phase entre leurs quatre membres, à adopter naturellement l'allure qui conduit à la dépense énergétique la plus faible (*Drevemo et al., 1980b, Hoyt et Taylor, 1981, Wickler et al., 2002*). Quand un animal se déplace, toute la force nécessaire pour supporter le poids de son corps est générée pendant la phase où le pied est en contact avec le sol, c'est-à-dire pendant la phase d'appui (*Hoyt et al., 2000*). Ainsi, le coût énergétique de la locomotion est déterminé par la durée de cette phase (*Kram et Taylor, 1990, Wickler et al., 2002*). Or, avec l'augmentation de la vitesse demandée aux trotteurs de course, ce temps de contact diminue. La transition précoce de la phase d'appui à la phase de suspension à grande vitesse a pour conséquence une activation plus précoce des muscles, qui doivent produire les mêmes voire plus de mouvements dans un temps plus court, ce qui conduit à des coûts énergétiques de locomotion plus élevés (*Robert et al., 2002*).

En plus de cette nécessité de parvenir à de très grandes vitesses de courses, tout en conservant un schéma locomoteur stable, les trotteurs subissent aussi l'effet d'une charge supplémentaire à tirer (lorsqu'il s'agit d'un sulky et d'un driver), ou à porter (quand ils sont montés par un cavalier). Cette contrainte supplémentaire modifie indéniablement la locomotion adoptée par le trotteur et se répercute également sur son fonctionnement métabolique, comme nous allons le voir dans la partie suivante.

## **IV- INFLUENCE DE L'AJOUT D'UNE CHARGE ET ETUDE DE L'INTERACTION CHEVAL - CAVALIER**

### ***A) Effet de l'ajout d'une charge***

Comme on l'a vu précédemment, *Hoyt et Taylor (1981)* ont montré que la vitesse choisie par le cheval est celle qui correspond à un coût de transport minimum. Plusieurs études, étudiant l'effet de l'ajout d'une charge sur le métabolisme et la locomotion du cheval, ont révélé que lorsque un poids est ajouté (selle plombée, poids mort attaché,...) la vitesse choisie diminue, traduisant une augmentation du coût métabolique de la locomotion. En effet, de façon logique, le fait d'ajouter une charge à l'animal augmente les forces qui doivent être générées par les muscles et accroît donc la dépense métabolique (*Hoyt et al., 2000, Wickler et al., 2001*).

Cela se voit notamment à travers les modifications induites sur le schéma locomoteur : *Hoyt et al., (2000)* ont prouvé qu'un cheval qui transporte un poids (équivalent à 19 % de son poids corporel) augmente le temps de contact de sa foulée de 7,7 %. Ces résultats sont en accord avec ceux de *Thornton et al. (1987)* révélant que l'ajout d'une charge augmente la durée de la phase d'appui, ce qui confirme la croyance généralisée selon laquelle les chevaux montés diminuent leur phase de suspension. Cependant, tous les auteurs ne s'accordent pas sur ce sujet et *Johnston et al. (1999)* obtiennent des résultats contraires. De la même façon, la répercussion du transport d'un poids sur la fréquence et la longueur des foulées n'est pas clairement établie; les différentes études portant sur ce sujet ont des conclusions contradictoires, ce qui s'explique probablement par des conditions différentes de réalisation des protocoles.

Par ailleurs, l'accroissement de la dépense énergétique en réponse à l'ajout d'une charge a pu être clairement démontré par l'augmentation de la fréquence cardiaque, de la ventilation et des concentrations sanguines en lactates chez les chevaux testés (*Thornton et al., 1987, Sloet van Oldruitenborgh et al., 1995*). Cela est également objectivé par la diminution de la  $V_4$  et de la  $V_{200}$  obtenues lorsqu'une charge est ajoutée, que celle-ci soit portée par le cheval (*Thornton et al., 1987*) ou tirée à la manière d'un sulky (*Gottlieb et al., 1988*). Enfin, l'étude de *Gottlieb et al. (1989)* montre que le recrutement des fibres musculaires traduit des besoins énergétiques significativement augmentés lorsque le cheval tire une charge.

## ***B) Effet du cavalier sur la locomotion du cheval***

On peut se demander si un cavalier, capable de s'adapter aux mouvements du cheval, entraîne des répercussions différentes sur la locomotion par rapport à un poids mort. Certaines études cinématiques de la locomotion du cheval sur tapis roulant ont montré qu'il n'y avait aucune différence significative entre un cavalier et une selle plombée de même poids (*Sloet van Oldruitenborgh et al., 1995*). Mais pour *Clayon et al. (1999)* ou *De Cocq et al. (2004)*, on ne peut assurer que l'ensemble cheval et cavalier se comporte proportionnellement comme un cheval plus lourd. En effet, les chevaux montés ne font pas que porter le poids de la selle et du cavalier; ils doivent aussi endurer la charge de travail additionnelle qui provient des différentes influences dynamiques (*Peham et Schobesberger, 2004b*). Ainsi l'effet dynamique du cavalier est concentré dans la dernière partie de la phase d'appui, à un moment où le centre de gravité du cheval a déjà commencé à s'élever.

D'autres auteurs vont même jusqu'à prouver l'effet bénéfique du cavalier sur la variabilité du schéma locomoteur, l'hypothèse étant qu'un cavalier expérimenté exercerait un certain effet stabilisant sur la foulée du cheval. *Peham et al. (2004a)* trouvent que les forces verticales sont diminuées de 16 % quand le cheval est monté, mais que les forces transversales sont augmentées, traduisant une action stabilisatrice exercée par le cavalier dans l'axe vertical, mais déstabilisatrice dans le plan transversal. Par ailleurs, ils concluent que de façon générale, le schéma locomoteur d'un cheval bien monté varie moins que celui d'un cheval non monté. De la même façon, *Lagarde et al. (2005)* montrent que la synchronisation étroite entre le cavalier expérimenté et le cheval se traduit par une augmentation dans la régularité temporelle des oscillations du tronc du cheval. Cela est en accord avec le fait que pour certains auteurs, le centre de gravité du cheval n'est pas modifié qu'il soit monté ou pas, dans la mesure où la localisation du centre de gravité du cavalier dans le plan horizontal correspondrait exactement à celui du cheval. Cependant, lors du mouvement, et notamment au trot à grande vitesse, il paraît peu probable que cette concordance des centres de gravité soit conservée.

Le cheval trotteur présente une physiologie qui fait de lui un athlète de demi-fond. De plus, grâce à une bonne mécanisation et à un geste adapté, son déplacement est rendu particulièrement économique.

C'est en réalisant des tests d'effort standardisés, permettant de quantifier des paramètres physiologiques, et en analysant la locomotion que nous allons tenter de voir en quoi le fait de monter le trotteur plutôt que de l'atteler modifie son fonctionnement métabolique et son geste.



# **ETUDE EXPERIMENTALE**



Comme nous l'avons mentionné en introduction, les temps record en course des chevaux attelés sont plus rapides d'environ 2 s/km par rapport à ceux des chevaux montés, sur des distances de course identiques. Notre hypothèse de travail, qui naît de cette constatation, est que le fait de monter un cheval entraîne une sollicitation énergétique accrue et modifie ses paramètres locomoteurs, ce qui a pour effet de le ralentir. En effet, nous supposons que lorsqu'il est monté le cheval « fatigue » plus vite et que son geste est modifié entraînant une biomécanique moins performante. Malgré cette différence de temps record, qui existe depuis plus de vingt ans, il n'y a à l'heure actuelle aucune donnée scientifique publiée qui pourrait décrire cette différence de sollicitation et en expliquer les causes. En particulier, l'interaction du jockey ou de l'ensemble sulky/driver avec le trotteur de course n'a jamais été étudiée mais semble être un axe de recherche prometteur afin de mieux comprendre ces différences dans les temps record.

L'objectif de notre étude est de déterminer l'origine de cette différence entre la vitesse du trot chez les chevaux attelés et les chevaux montés. Cela s'appuie sur l'identification et la quantification des différences physiologiques et biomécaniques entre chevaux attelés et montés permettant d'expliquer la plus grande vitesse des chevaux attelés. Ainsi, nous avons tenté de quantifier la répercussion de la discipline (attelé versus monté) sur différents paramètres physiologiques et locomoteurs.

Ce protocole a été mené sous le contrôle de Claire Leleu et de Céline Cotrel, Docteurs vétérinaires, travaillant au sein de l'unité de recherche en médecine humaine et équine comparée, Pégase-Mayenne, à Laval (53). Les tests se sont déroulés aux mois de mars et d'avril 2005 aux AFASEC (Association de Formation et d'Action Sociale des Ecuries de Courses) de Grosbois et de Graignes.

Ce travail est à l'origine d'une publication dans *Equine Veterinary Journal (Supplement 36, Equine Exercise Physiology 7, 2006, 468-472)* : « *Harnessed vs. mounted Standardbreds on the track : changes in gait and physiological variables* » (V. Mottini, C. Leleu and C. Cotrel).



# **I – MATERIEL ET METHODE**

Nous allons ici décrire la façon dont les tests de notre protocole se sont déroulés ainsi que le matériel employé.

## ***A) Les chevaux***

Les chevaux testés dans cette étude sont des trotteurs de course à l'entraînement, se trouvant dans les écoles des courses hippiques de Grosbois et de Graignes.

L'effectif initial était de 14 chevaux. Cependant, seuls 10 de ces trotteurs ont été retenus pour notre étude, les autres n'ayant pas respecté l'allure ou les vitesses imposées par le protocole.

Ces 10 chevaux (6 femelles et 4 hongres) sont âgés de 3 à 10 ans, avec un âge moyen de  $5,9 \pm 2,4$  ans. Tous les chevaux testés ont été préalablement habitués à travailler aussi bien attelés que montés. Il s'agit de trotteurs en bonne condition physique et qui se trouvent au même stade d'entraînement. Ils sont testés à 4 ou 7 jours d'intervalle, une fois montés et une fois attelés. Chaque cheval sera ainsi comparé à lui-même; il sera son propre témoin.

## ***B) Les jockeys et drivers***

Les jockeys et les drivers ont été pesés puis lestés afin d'atteindre le poids standardisé de 65 kg, qui représente environ 14 % du poids du cheval. Au cours des tests, les drivers ont utilisé le même sulky de course équilibré et les jockeys la même selle de course.

## ***C) Déroulement des tests d'effort standardisés***

On procède par lots de 2 chevaux, le cheval monté suivant le cheval attelé. Ce dernier impose donc la vitesse au cheval monté, grâce à un compteur de vitesse placé sur le sulky.

Les tests d'effort se sont déroulés selon la méthode mise au point par *Demonceau et Auvinet (1992)* et décrite précédemment.

Chaque lot de 2 chevaux réalise un échauffement de 5 à 10 minutes au petit trot, soit 300 à 400 m/min, suivi de trois paliers de 3 minutes à vitesse croissante. Si la vitesse est croissante d'un palier à l'autre, chaque palier se déroule à vitesse constante.

Après ces trois paliers une accélération est réalisée ; ce « 4<sup>ème</sup> palier » est en fait un tour de piste à la même vitesse que celle demandée au 3<sup>ème</sup> palier, puis au bout de ce tour, le driver

demande au cheval d'accélérer dans un virage pour qu'il se trouve à vitesse maximale sur une des lignes droites de l'hippodrome (soit environ sur 250 m).

De plus, entre chaque palier, des prélèvements sont réalisés pour permettre le suivi de l'évolution des concentrations sanguines d'acide lactique.

* <b>300-400</b> m/min pendant 5 à 10 min = <b>ECHAUFFEMENT</b>
* <b>500</b> m/min pendant 3 min = <b>PALIER 1</b> → <i>Prise de sang</i>
* <b>570</b> m/min pendant 3 min = <b>PALIER 2</b> → <i>Prise de sang</i>
* <b>640</b> m/min pendant 3 min = <b>PALIER 3</b> → <i>Prise de sang</i>
* Accélération <b>maximale</b>

**Tableau 3** : Résumé du déroulement du test d'effort et vitesses fixées pour chaque palier.

## ***D) Le terrain***

Les tests ont eu lieu sur deux pistes quasiment identiques :

- la première série de tests s'est déroulée à l'hippodrome de Graignes, sur une piste en sable de 1.000m (5 chevaux testés).
- la suite des tests a eu lieu à Grosbois, sur piste en mâchefer de 1.000m (5 autres chevaux).

## ***E) Méthodes de mesure des paramètres physiologiques***

### **1- Mesure de la vitesse**

Elle n'est pas à proprement parler un paramètre d'aptitude physique, mais sa mesure est nécessaire pour permettre la réalisation du test d'effort. Deux dispositifs différents sont utilisés :

#### ***a- Cheval attelé***

Pour mesurer la vitesse du sulky, un tachymètre, de type « compteur de roue de vélo » est utilisé : un aimant fixé sur un rayon de la roue du sulky envoie des impulsions électromagnétiques à un détecteur fixé sur la fourche. La vitesse s'affiche alors sur le

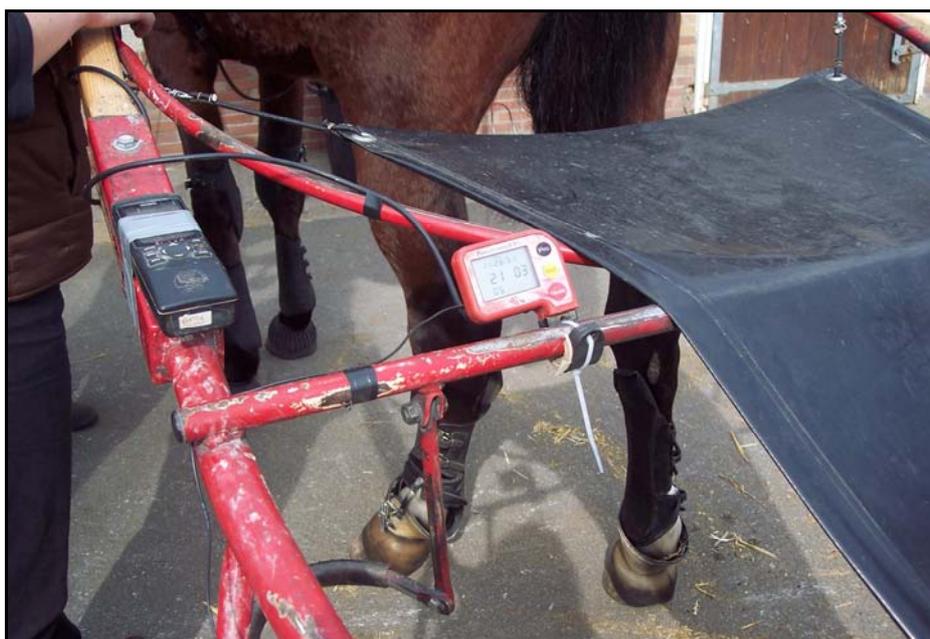
tachymètre « Power Control V SRM ». Le driver se sert de la vitesse indiquée par le tachymètre pour maintenir une allure la plus constante possible pendant toute la durée des différents paliers. De plus, avant chaque test, on entre dans le boîtier du tachymètre la circonférence de la roue mesurée avec le driver dans le sulky, afin de tenir compte de « l'écrasement » de la roue lié au poids du driver.



**Figure 19** : Aimant du tachymètre fixé à la roue du sulky (photo gauche) et écran du tachymètre fixé sur le sulky de façon à être visible par le driver (photo droite).

En plus du tachymètre, un GPS est fixé sur le brancard gauche du sulky. Il permet d'une part la mesure de la vitesse (toutes les 2,5 secondes) mais aussi de connaître à chaque instant la position du cheval sur la piste, ce qui facilite le traitement ultérieur des données.

Ces deux outils (PowerControl V et GPS) présentent l'avantage de pouvoir à la fois afficher et enregistrer la vitesse.



**Figure 20** : Power Control V (rouge) et GPS (noir) fixés au brancard du sulky.

## *b- Cheval attelé*

- Comme il suit le cheval attelé pendant toute la durée du test, excepté lors de l'accélération finale, il trotte à la même vitesse que celle indiquée par le tachymètre du sulky.
- Cependant, on utilise en plus un GPS qui est fixé au bras du cavalier, afin d'avoir un enregistrement de la vitesse propre au cheval monté, dans le cas où il n'évoluerait pas exactement comme le cheval attelé.



**Figure 21** : Dispositif GPS fixé au bras du cavalier.

A la fin du test, les données enregistrées par les deux GPS et le tachymètre sont transférées sur ordinateur.

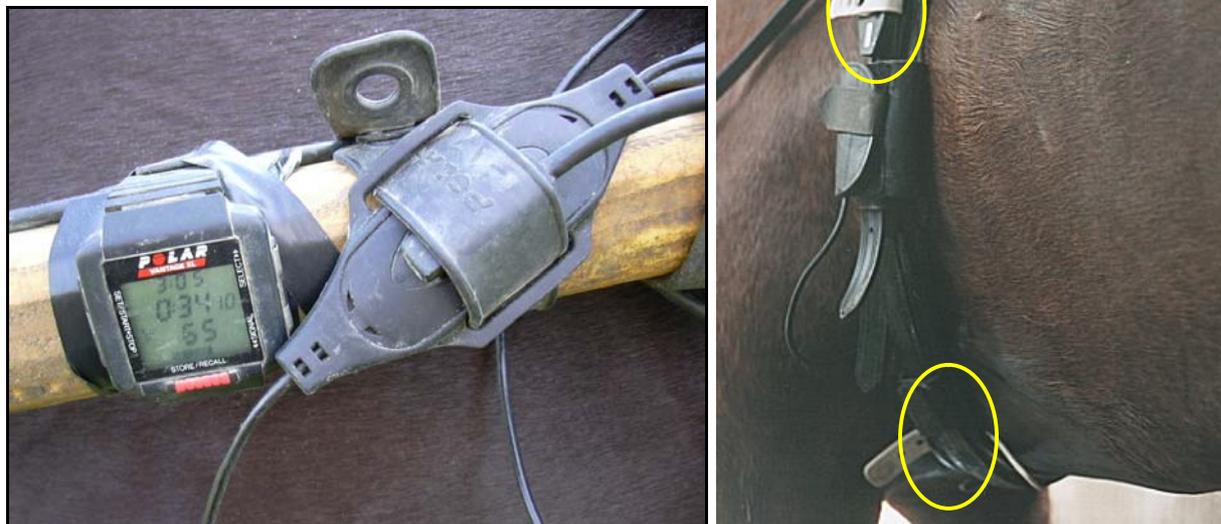
## 2- Mesure de la fréquence cardiaque

Afin d'apprécier la réaction des chevaux à l'effort, et dans le but de déterminer des paramètres physiologiques, la fréquence cardiaque est mesurée. Tout au long du test, elle est enregistrée au moyen de deux appareils :

- Une montre cardio-fréquence-mètre « POLAR » est placée soit dans la pochette du tapis de selle (cheval monté), soit sur le brancard gauche du sulky (cheval attelé).
- De plus, le tachymètre PowerControl V décrit précédemment sert aussi de cardio-fréquence-mètre : deux électrodes sont placées sur les chevaux, sous le tapis de selle ou sous le harnais, une au niveau du garrot et l'autre ventralement, près du passage de sangle. Ce système comporte également un émetteur sur lequel se trouve une attache, permettant de fixer le tout à la sangle (cheval monté) ou au harnais (cheval attelé).

Pour un fonctionnement optimal, les poils du cheval sont humidifiés au niveau des zones de contact avec les électrodes. Cependant, le contact est souvent de qualité très satisfaisante en raison de la sudation des chevaux pendant l'effort.

Un câble relie les électrodes au PowerControl V qui est, comme décrit précédemment, fixé au brancard du sulky ou placé dans la pochette du tapis de selle.



**Figure 22 :** Montre Polar et émetteur des électrodes fixés au brancard du sulky (photo gauche) et positionnement des électrodes sur le harnais du cheval (photo droite).

Comme pour la vitesse, les enregistrements des montres et des PowerControl V sont ensuite transférés sur ordinateur.

### 3- Mesure de la lactatémie

Après chaque palier, immédiatement après l'arrêt de l'effort, une prise de sang est réalisée à la veine jugulaire dans des tubes fluorures-oxalates afin de déterminer la concentration en lactates dans le sang total.

Dans l'heure qui suit, 200  $\mu$ L de ce sang en nature sont introduits, grâce à une micro-pipette automatique type Eppendorf, dans un tube contenant 2 mL d'acide perchlorique. Cela permet de bloquer les enzymes de la glycolyse afin de stabiliser les prélèvements jusqu'au moment du dosage effectif du lactate en laboratoire.

Ce dosage est effectué dans les 48 heures suivant le prélèvement, au laboratoire de biochimie du Centre Hospitalier de Laval, selon la méthode enzymatique de Boehringer.



**Figure 23** : Réalisation d'un prélèvement sanguin à la jugulaire pour doser la lactatémie.

#### 4- Méthode d'analyse de la respiration

En plus de la mesure de paramètres « usuels » pendant le test d'effort (vitesse, lactates et fréquence cardiaque), un enregistrement de la respiration est réalisé afin de noter d'éventuelles différences dans le fonctionnement respiratoire selon que le cheval est attelé ou monté (fréquence respiratoire, bruits respiratoires...).

Pour cela, un microphone-cravate omnidirectionnel, ayant une bande de fréquence s'étalant de 50 à 16 000 Hz, est fixé au bout d'une tige rigide de façon à se trouver à 5 cm de la sortie des naseaux. Ainsi, il se trouve juste au dessus du flux d'air, permettant d'obtenir uniquement le son et non la saturation.

Cette tige, placée le long du chanfrein et passant entre les deux yeux du cheval, est solidement fixée sur un licol, que l'on place par dessus le filet habituel du cheval.

De cette façon, le cheval n'est pas gêné, ni au niveau de sa respiration ni au niveau de sa vision, et il conserve son harnachement habituel. Cela permet de limiter les comportements qui pourraient être liés à la gêne du cheval et susceptibles de fausser certains paramètres.

Le microphone est relié à un dictaphone analogique qui permet l'enregistrement. Celui-ci est fixé au brancard du sulky ou placé dans la pochette du tapis de selle. Les données sont ensuite transférées sur ordinateur.



**Figure 24** : Cheval équipé du microphone, relié au boîtier enregistreur sur le brancard du sulky.

## ***F) Méthode de mesure des paramètres locomoteurs***

### **1- Le système de mesure des variables locomotrices**

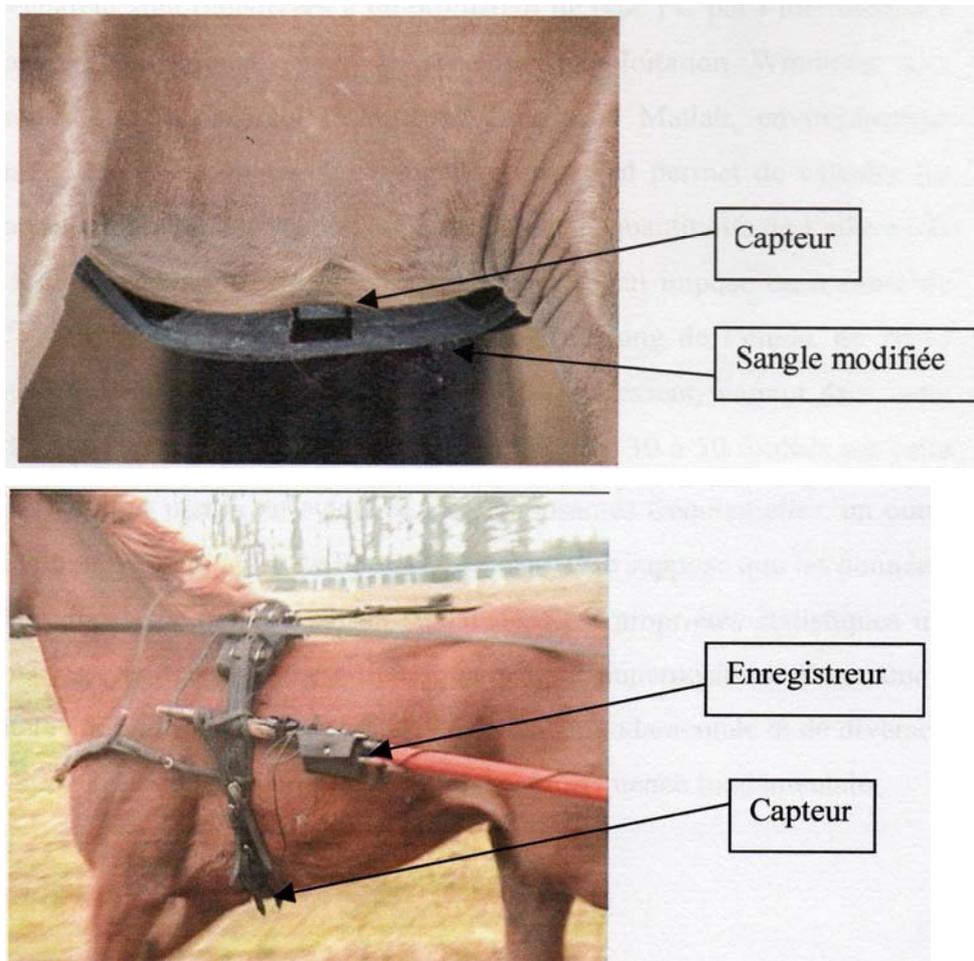
L'appareil utilisé est le système EQUIMETRIX, développé par l'INRA. Il s'agit d'un outil de quantification du geste, utilisable sur le terrain.

Le capteur est constitué de trois accéléromètres mono axiaux disposés orthogonalement, permettant la mesure de l'accélération dans les trois dimensions. Ce capteur de petite taille est placé contre le sternum, dans le plan sagittal du cheval, au moyen d'une sangle. Il est relié par un câble à un boîtier enregistreur logé dans une petite pochette de cuir fixée au brancard gauche du sulky, ou placé dans la poche du tapis de selle (Figure 25).

Le capteur étant placé sur le thorax, il mesure les accélérations et décélérations qui résultent des efforts déployés par les quatre membres; lorsqu'un membre se pose au sol, le corps du cheval est d'abord décéléré (accélération négative car il y a freinage), puis il est accéléré (accélération positive car il y a propulsion). L'accélération mesurée est dorso-ventrale, longitudinale (axe crânio-caudal du cheval) et latérale (axe médio-latéral).

Ce dispositif ne gêne pas le cheval et assure des mesures précises des mouvements, à proximité du centre de gravité du cheval.

Une fois l'exercice réalisé, on arrête l'enregistreur. Les informations sont ensuite transférées, au moyen d'une interface adaptée, à un ordinateur.



**Figure 25 :** Position du capteur accélérométrique et de l'enregistreur (d'après *Leleu, 2004a*).

## 2- Définition des variables locomotrices

Une foulée est définie comme un cycle complet de déplacement d'un membre et, à vitesse constante, le trot peut être considéré comme une somme de mouvements périodiques stationnaires. Le dispositif Equimetrix permet à partir des caractéristiques de l'accélération mesurée, le calcul des paramètres biomécaniques suivants (*Leleu, 2004a*):

- La fréquence des foulées : **FF** (nombre foulées/s) : Elle correspond au nombre de foulées par unité de temps. Elle est calculée d'après la fréquence fondamentale du signal dorso-ventral (déterminée grâce à une transformation de Fourier).  $FF = \frac{1}{2}$  fréquence fondamentale du signal dorso-ventral.
- La longueur des foulées : **LF** (m) : La longueur de la foulée est la distance qui sépare les deux traces au sol d'un même pied. Elle peut être calculée selon la formule :  $LF = V / FF$ .
- La symétrie des mouvements droits/gauches : **Sym** (%) : Elle mesure la ressemblance des mouvements entre les diagonaux droits et gauches en comparant les demi-foulées. Elle est

calculée grâce à une fonction d'autocorrélation : corrélation normalisée du signal dorso-ventral avec lui-même, translaté d'une demi-foulée. Elle quantifie donc la capacité de cheval à produire le même pattern d'accélération dorso-ventrales avec le diagonal droit et le diagonal gauche.

- La régularité des foulées : **Reg** (/200) : Elle correspond à une mesure de la ressemblance des mouvements dorsoventraux entre les foulées successives. Elle est calculée grâce à une fonction d'autocorrélation : moyenne des corrélations normalisées du signal dorso-ventral avec lui-même translaté, d'une à n foulées.

- Le déplacement dorso-ventral : **DVD** (cm) : Il représente une estimation du déplacement entre le point le plus haut et le point le plus bas de la trajectoire du capteur. Cette amplitude de déplacement du thorax est calculée par la double intégration de l'accélération dorso-ventrale (moyennée sur 20 secondes).

- L'activité dorso-ventrale : **DVA** ( $g^2/Hz$ ) : Cette variable quantifie à la fois l'amplitude et la rapidité des mouvements dans l'axe dorso-ventral. Ce paramètre est défini par l'énergie totale du spectre de l'accélération dorsoventrale (calcul d'intégrale). C'est une énergie de signal égale à la valeur moyenne du carré de l'amplitude. Cette énergie du signal correspond à une puissance mécanique produite dans l'axe vertical du segment sur lequel est placé le capteur.

- L'activité longitudinale : **A.Long** ( $g^2/Hz$ ) : Comme l'activité dorso-ventrale, cette variable quantifie à la fois l'amplitude et la rapidité des mouvements dans l'axe longitudinal. Ce paramètre est défini par l'énergie totale du spectre de l'accélération longitudinale (calcul d'intégrale).

- L'activité latérale : **A.Lat** ( $g^2/Hz$ ) : Cette variable quantifie à la fois l'amplitude et la rapidité des mouvements dans l'axe latéral. Ce paramètre est défini par l'énergie totale du spectre de l'accélération latérale (calcul d'intégrale).

## ***G) Méthodes d'analyse et de traitement des données***

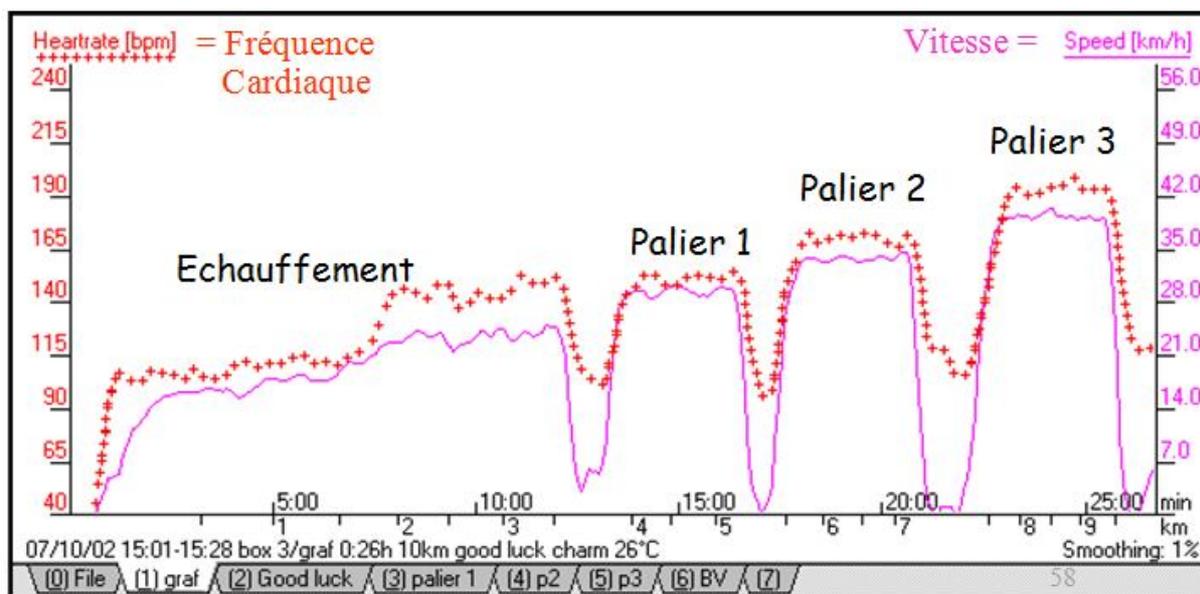
### **1- Analyse et traitement des paramètres physiologiques et locomoteurs**

Les données obtenues grâce aux différents systèmes de mesure sont transférées sur ordinateur. A partir de là, un logiciel informatique conçu sur mesure permet de synchroniser les données accélérométriques, l'enregistrement de la respiration et le signal GPS. Cela nous

permet de définir des échantillons à analyser de 20,48 secondes pour chaque palier, obtenus dans une ligne droite et à vitesse constante.

### a- Analyse des enregistrements de vitesse et de fréquence cardiaque

Le logiciel de traitement des données obtenues grâce aux PowerControl V permet de réaliser pour chaque cheval testé, une courbe de vitesse et de fréquence cardiaque obtenues au cours des différents paliers.



**Figure 26 :** Exemple d'enregistrement de vitesse et de fréquence cardiaque transféré sur ordinateur.

### b- Analyse des enregistrements de la respiration

L'analyse de la respiration est faite en comptabilisant le nombre de sons expiratoires dans les échantillons définis précédemment, afin de déterminer la fréquence respiratoire (**FR**). Puis le couplage locomoteur et respiratoire est calculé grâce au rapport de la fréquence de foulées sur la fréquence respiratoire (**FF/FR**).



**Figure 27** : Exemple d'enregistrement de la respiration transféré sur ordinateur.

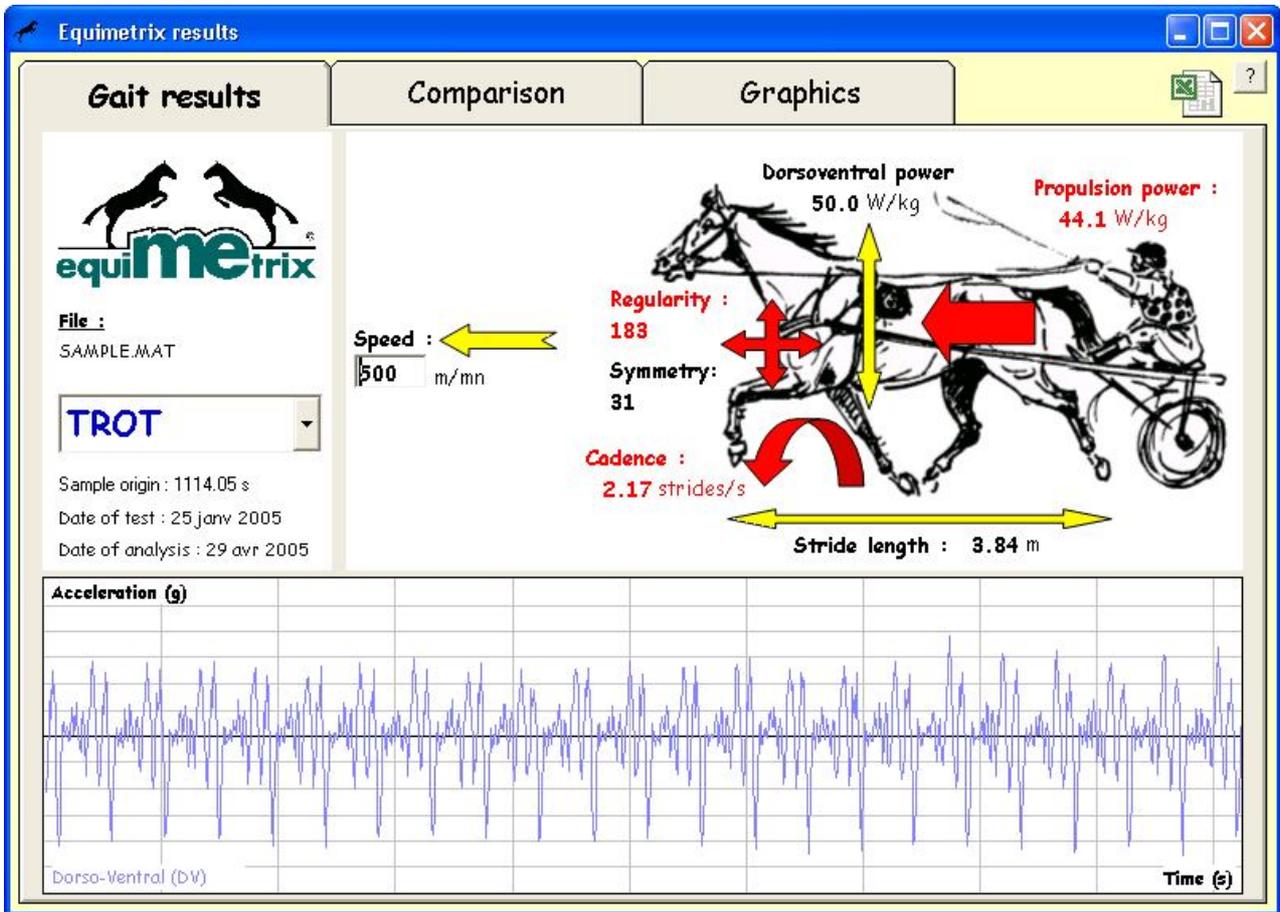
### c- Analyse des paramètres locomoteurs

L'analyse des données accélérométriques se fait par procédé d'analyse de signal, grâce au logiciel scientifique « Equimetrix » (développé sous Matlab 5), afin d'obtenir à la fois des variables spatiales et temporelles de foulée. Pour cela deux contraintes doivent être respectées, expliquant le choix des échantillons à analyser :

- D'une part, l'analyse de la locomotion doit s'effectuer sur des séquences de trot en ligne droite et non en virage. Cela est respecté grâce à l'utilisation de GPS fournissant lors de chaque test une représentation graphique du parcours effectué par le cheval pendant toute la durée du test. Ainsi, il est possible de repérer les séquences en ligne droite et de synchroniser, grâce au logiciel décrit précédemment, le signal enregistré par le GPS avec le signal accélérométrique enregistré par le capteur, pour définir l'échantillon à analyser.

- De plus, pour que l'analyse soit fiable, il est nécessaire que la vitesse soit stable sur toute la durée de l'échantillon à analyser. Pour cela, seules les dernières lignes droites de chaque palier sont retenues pour l'analyse. En effet, le cheval est censé être « lancé » à vitesse stabilisée lorsqu'il se trouve à la fin du palier, ce qui n'est pas le cas au début du palier puisqu'il est en phase d'accélération.

Le logiciel présente ensuite les valeurs des différentes variables calculées :



**Figure 28** : Exemple d'analyse de variables locomotrices grâce au logiciel Equimetrix.

## 2- Analyse statistique des données

Les résultats du test locomoteur, tout comme les paramètres physiologiques (FC, La, FR,  $V_4$ ,  $V_{200}$ ) sont analysés à l'aide d'un logiciel de statistiques : NCSS.

Une analyse de variance à deux facteurs (effet palier (vitesse) et effet discipline) est réalisée pour tester l'hypothèse d'une différence de paramètres entre les deux groupes (attelé / monté). Elle s'écrit selon le modèle suivant :

$$\Pi_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha_i\beta_j + \varepsilon_{ijk}$$

Avec  $\Pi_{ijk}$  = la variable exprimée  $\Pi$  (FC, La, FR,...) pour le palier i, la discipline j et le cheval k.

$\mu$  = la moyenne de la variable exprimée  $\Pi$ .

$\alpha_i$  = l'effet du palier i (i = 1, 2, 3,4).

$\beta_j$  = l'effet de la discipline j (j = Attelé, Monté).

$\alpha_i\beta_j$  = l'interaction du palier i et de la discipline j.

$\varepsilon_{ijk}$  = le facteur d'erreur ou fluctuation aléatoire lié(e) au palier i, pour la discipline j, pour le cheval k.

Il faut noter que dans notre étude, les interactions entre paliers et discipline ( $\alpha_i\beta_j$ ) ne sont pas significatives.

De plus, 4 analyses de variance (ANOVA) sont calculées sur chacun des paliers (3 paliers + accélération) pour compléter les analyses. On peut les décrire de la façon suivante :

Exemple pour le palier 1 ( $i = 1$ ) :

$$\Pi_{1jk} = \mu + \beta_j + \varepsilon_{1jk}$$

Avec  $\Pi_{1jk}$  = la variable exprimée  $\Pi$  (FC, La, FR,...) pour le palier 1, la discipline j et le cheval k.

$\mu$  = la moyenne de la variable exprimée  $\Pi$ .

$\beta_j$  = l'effet de la discipline j (j = Attelé, Monté).

$\varepsilon_{1jk}$  = le facteur d'erreur ou fluctuation aléatoire lié(e) au palier 1, pour la discipline j, pour le cheval k.

Un seuil de significativité à  $p < 0,05$  est retenu.

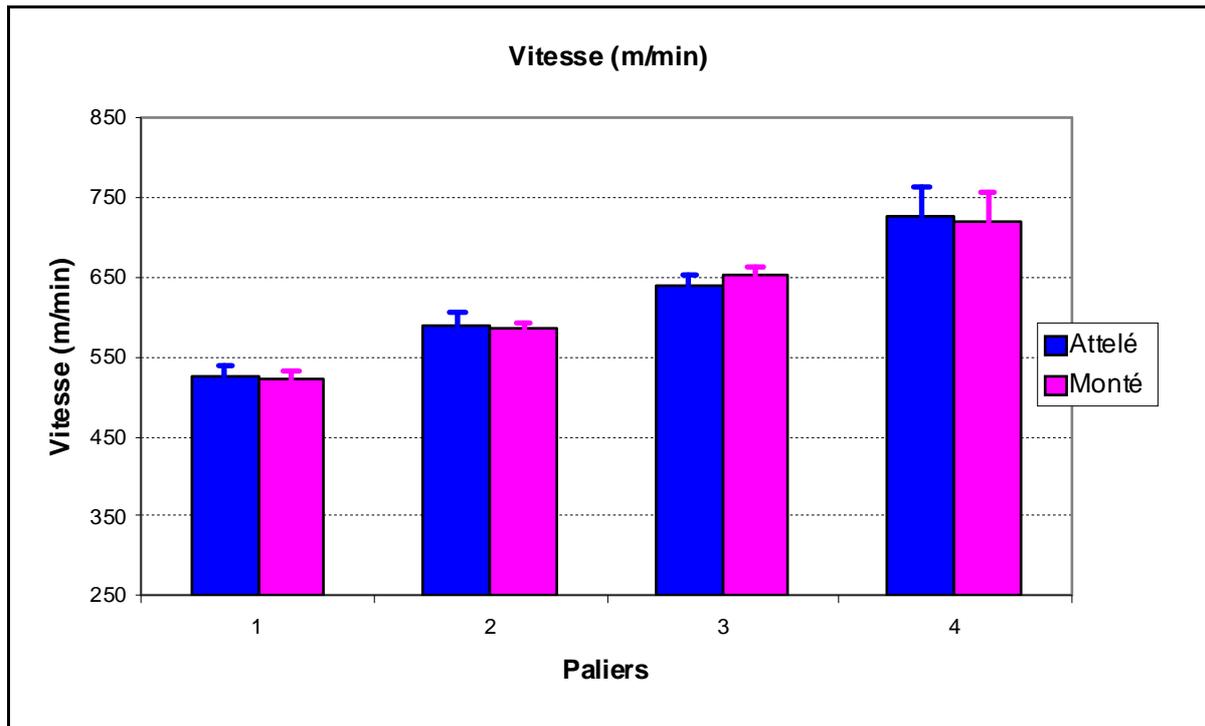
Enfin pour ce qui est des paramètres calculés  $V_4$  et  $V_{200}$ , comme ils sont propres à chaque cheval dans une discipline donnée (attelé ou monté), et qu'ils ne dépendent pas du palier considéré, un test « t » par séries appariées est effectué.



## II- RESULTATS

### *A) La vitesse*

L'analyse par palier révèle que les vitesses dans chaque groupe sont parfaitement respectées et qu'elles sont identiques dans les deux disciplines quel que soit le palier de vitesse.



**Figure 29 :** Vitesses comparées dans les deux disciplines (attelé vs monté) pour chaque palier, 10 chevaux.

L'absence de différences significatives entre les vitesses enregistrées pour les chevaux attelés et montés permet la comparaison des différents paramètres physiologiques et locomoteurs.

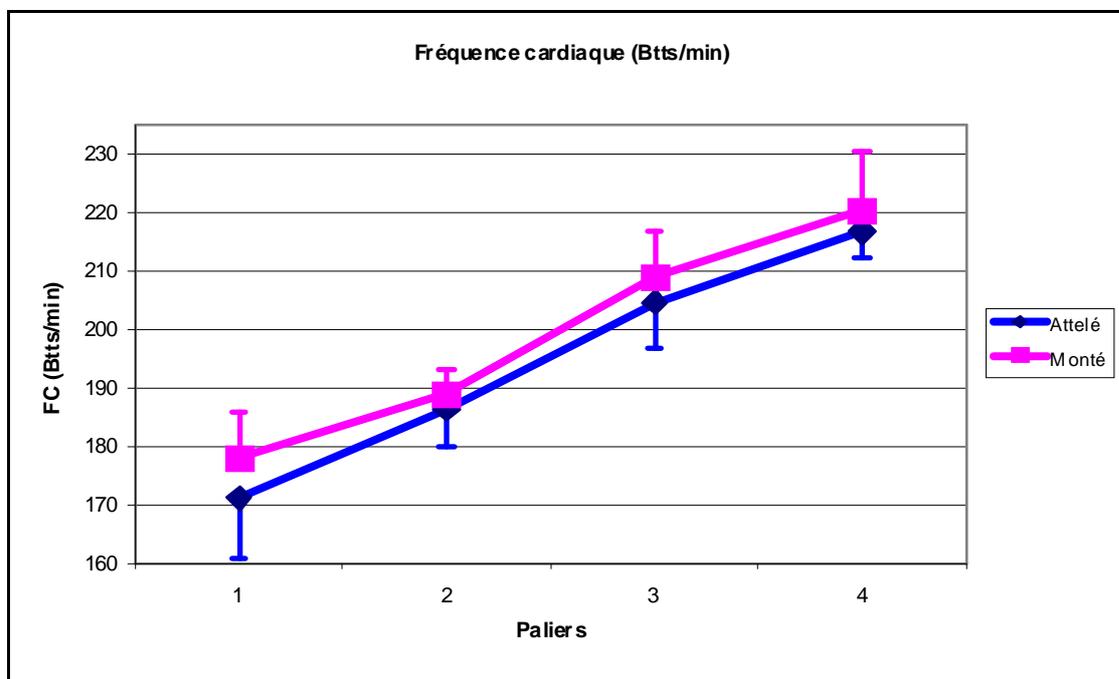
### *B) Comparaison des paramètres physiologiques*

#### 1- La fréquence cardiaque

Les moyennes et écarts-types de la fréquence cardiaque mesurée au cours des différents paliers selon la discipline sont représentés dans le tableau et le graphique suivant.

	<b>ATTELE</b>	<b>MONTE</b>
<b>Palier 1</b>	171 ± 10	178 ± 8
<b>Palier 2</b>	187 ± 6	189 ± 4
<b>Palier 3</b>	205 ± 8	209 ± 8
<b>Palier 4</b>	217 ± 4	220 ± 10

**Tableau 4 :** Moyennes et écarts-types de la Fréquence Cardiaque (battements/min) pour les quatre paliers de vitesse en fonction de la discipline (attelé vs monté), 10 chevaux.



**Figure 30 :** Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de la Fréquence Cardiaque avec la vitesse, 4 paliers, moyennes ± écarts-types.

Comme attendu, l'analyse de variance montre que les chevaux attelés ont une fréquence cardiaque significativement inférieure à celle des chevaux montés ( $p < 0,05$ ).

Discipline	<b>Fréquence Cardiaque</b>
<b>ATTELE</b>	194 ± 19
<b>MONTE</b>	199 ± 18

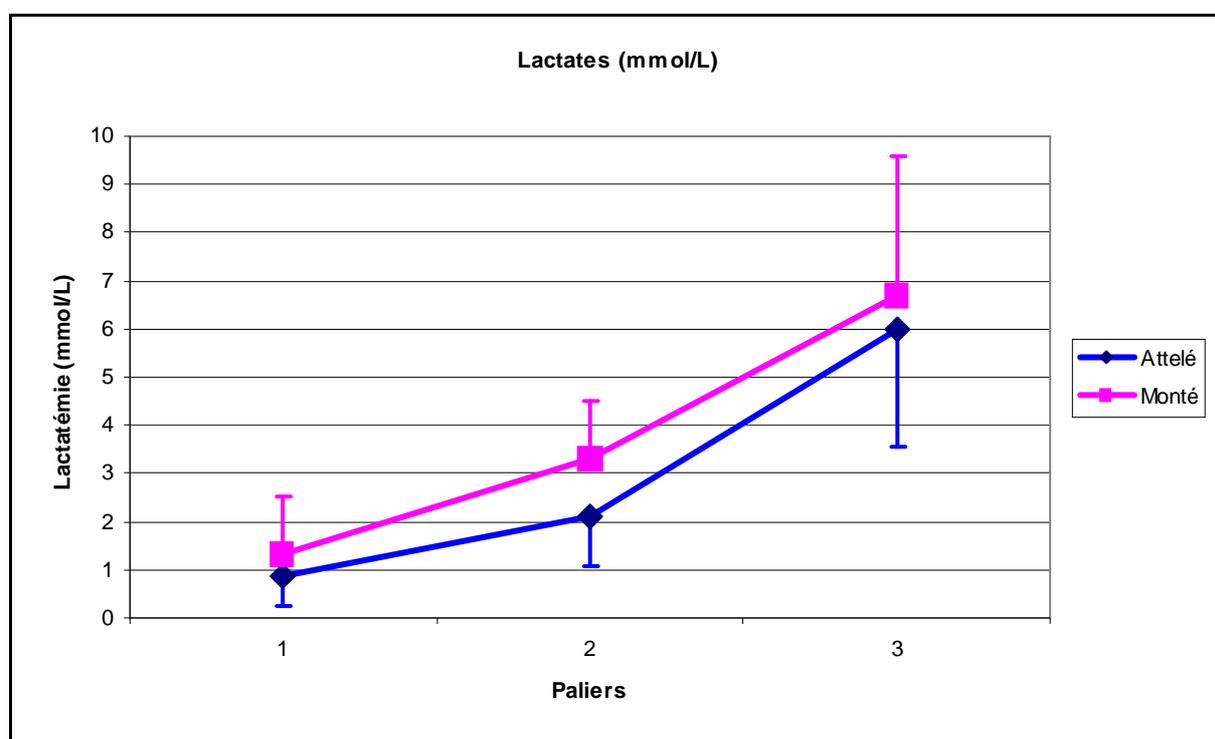
**Tableau 5 :** Moyennes et écarts-types de la Fréquence Cardiaque (battements/min) pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, 10 chevaux.

## 2- La lactatémie

	ATTELE	MONTE
Palier 1	0,86 ± 0,6	1,34 ± 1,2
Palier 2	2,12 ± 1,1	3,3 ± 1,2
Palier 3	6,01 ± 2,4	6,7 ± 2,9

**Tableau 6 :** Moyennes et écarts-types de la lactatémie (mmol/L) pour les trois paliers de vitesse en fonction de la discipline (attelé vs monté), 10 chevaux.

Le tableau montre que pour chaque palier, la moyenne des lactates des chevaux attelés est toujours inférieure à celle des chevaux montés.



**Figure 31 :** Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de la lactatémie avec la vitesse, 3 paliers, moyennes ± écarts-types.

La courbe de lactatémie des chevaux attelés se trouve en-dessous de celle des chevaux montés, lors des deux premiers paliers. Elles finissent par se rapprocher, les lactatémies prenant des valeurs comparables à grande vitesse (palier 3).

Cependant, l'analyse de variance ne permet pas d'affirmer que les lactatémies des chevaux attelés et montés sont significativement différentes.

Discipline	Lactates
<b>ATTELE</b>	4,4 ± 1,4 (min:0,04 ; max:9,72)
<b>MONTE</b>	5,3 ± 1,8 (min:0,81 ; max:11,41)

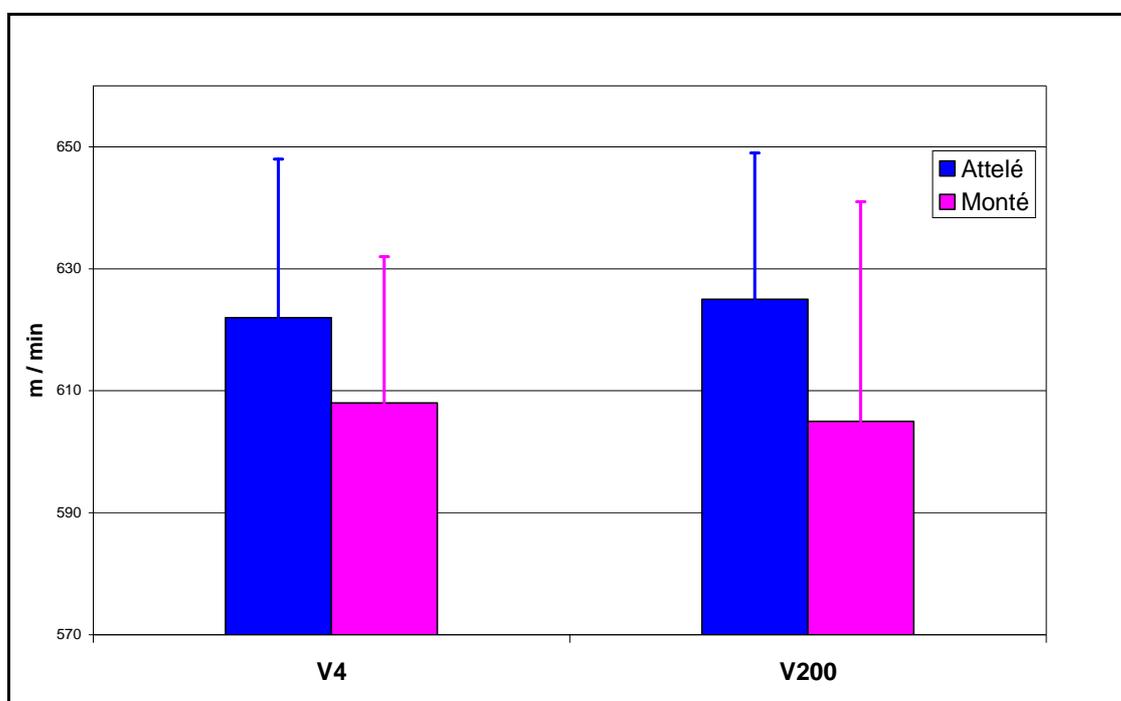
**Tableau 7** : Moyennes et écarts-types de la lactatémie pour chaque discipline (attelé vs monté) toutes vitesses confondues, 10 chevaux.

### 3- $V_4$ et $V_{200}$

Discipline	$V_4$	$V_{200}$
<b>ATTELE</b>	622 ± 26	625 ± 24
<b>MONTE</b>	608 ± 24	605 ± 36

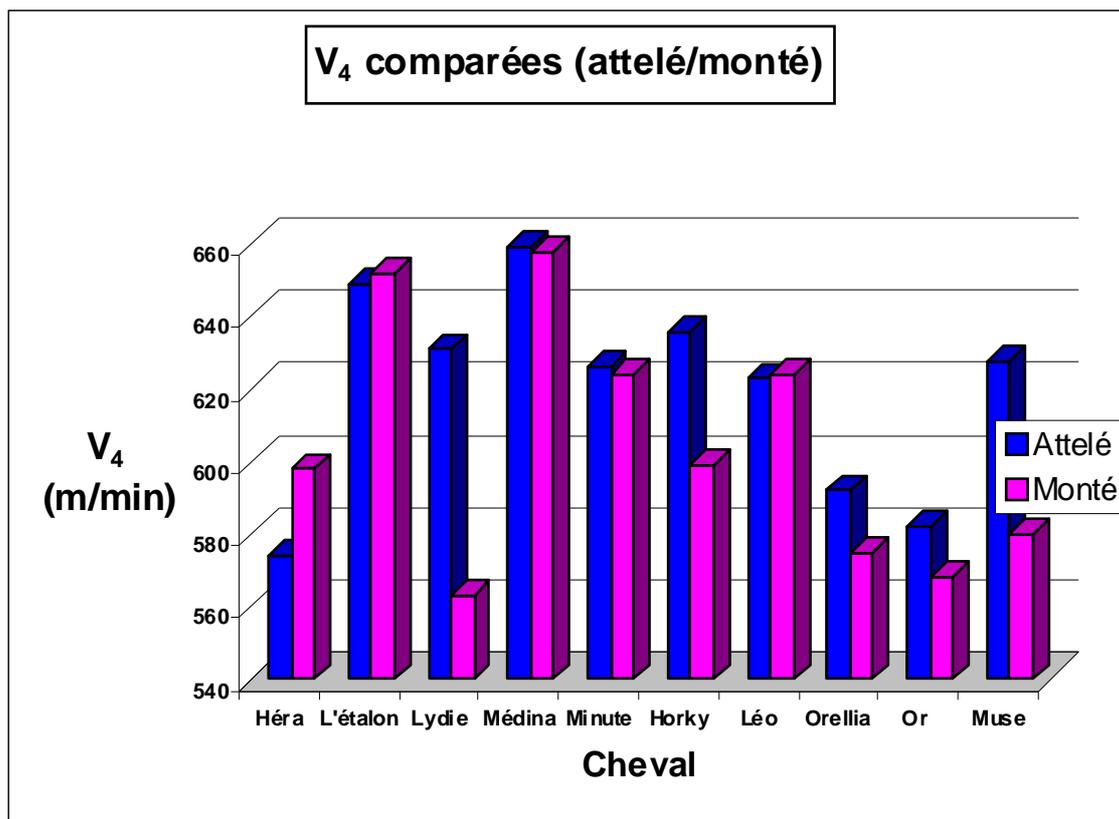
**Tableau 8** : Moyennes et écart-types de  $V_4$  et  $V_{200}$  (m/min) pour chaque discipline (attelé vs monté), 10 chevaux.

Le test de « t » pour des séries appariées indique que les  $V_4$  moyennes des chevaux attelés sont significativement supérieures à celles des chevaux montés ( $p < 0,05$ ). Il en est de même pour le paramètre  $V_{200}$ , comme on peut le voir sur le graphique suivant :

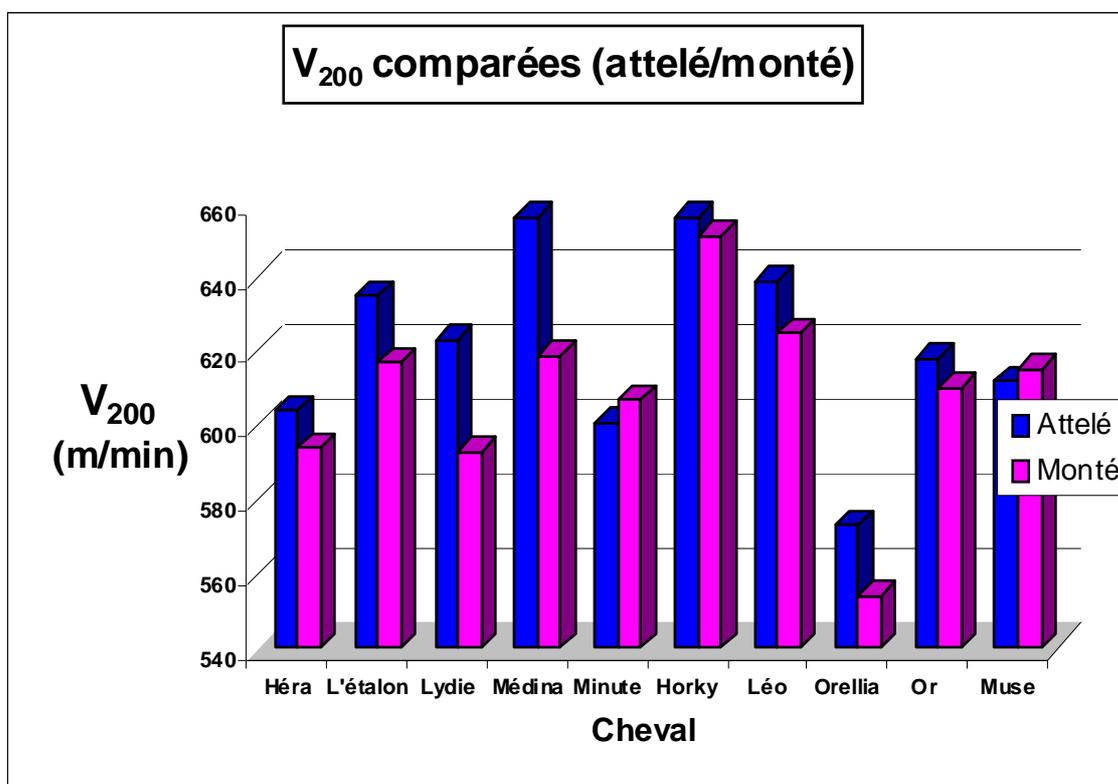


**Figure 32** : Paramètres physiologiques  $V_4$  et  $V_{200}$  (m/min) comparés pour les deux disciplines (attelé vs monté), 10 chevaux, moyennes ± écarts-types.

Les deux graphiques suivant présentent les valeurs des  $V_4$  et des  $V_{200}$  pour chaque cheval selon qu'il est attelé ou monté.



**Figure 33 :**  $V_4$  (m/min) attelé et monté comparées pour chaque cheval.



**Figure 34 :**  $V_{200}$  (m/min) attelé et monté comparées pour chaque cheval.

La majorité des chevaux a des  $V_4$  plus élevées lorsqu'ils sont attelés par rapport au monté; seuls trois chevaux ont des  $V_4$  attelés inférieures aux  $V_4$  montés.

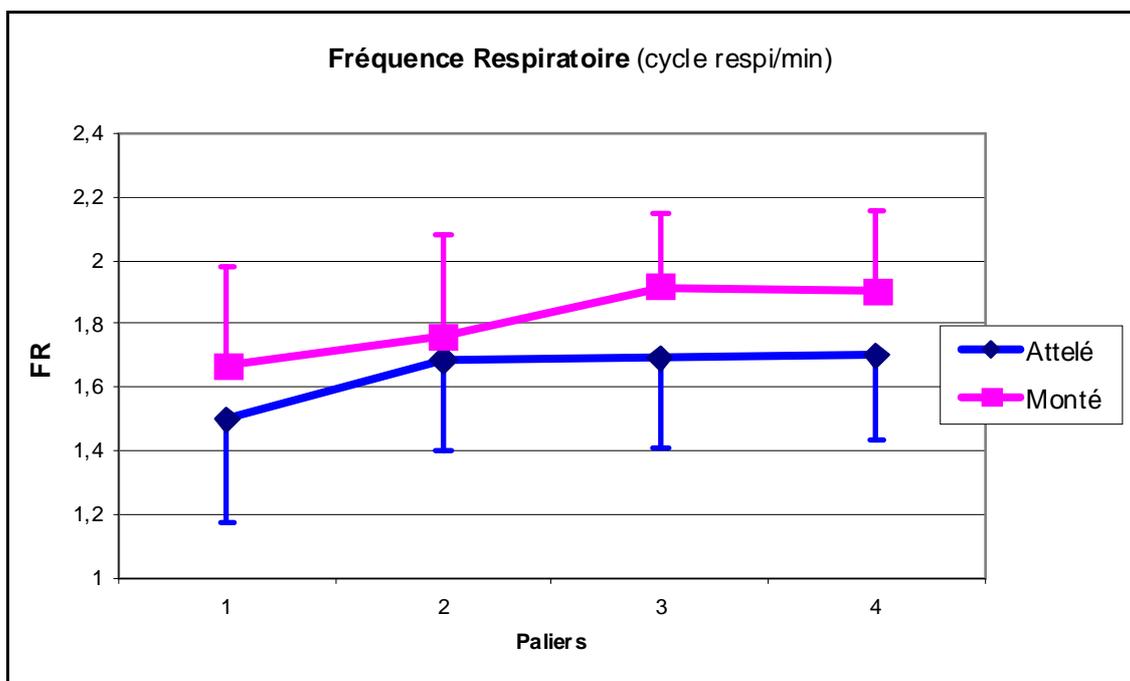
La même tendance s'observe pour la  $V_{200}$  où huit chevaux sur dix ont des valeurs de  $V_{200}$  attelés supérieures aux valeurs de  $V_{200}$  montés (analyse de variance,  $p < 0,05$ ).

#### 4- La fréquence respiratoire

	<b>ATTELE</b>	<b>MONTE</b>
<b>Palier 1</b>	1,50 ± 0,32	1,67 ± 0,1
<b>Palier 2</b>	1,68 ± 0,28	1,76 ± 0,32
<b>Palier 3</b>	1,69 ± 0,28	1,91 ± 0,23
<b>Palier 4</b>	1,7 ± 0,27	1,9 ± 0,25

**Tableau 9 :** Moyennes et écarts-types de la fréquence respiratoire (cycle respiratoire/sec) pour les quatre paliers de vitesse en fonction de la discipline (attelé vs monté), 10 chevaux.

Les valeurs moyennes des fréquences respiratoires présentées dans le tableau 9 sont toujours plus élevées quand les chevaux sont montés. Cela se retrouve sur le graphique de la figure 35 où la courbe des fréquences respiratoires des chevaux montés est nettement au-dessus de celle des chevaux attelés.



**Figure 35 :** Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de la fréquence respiratoire (cycle respiratoire /sec) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes ± écarts-types.

Discipline	FR
<b>ATTELE</b>	1,64 ± 0,29
<b>MONTE</b>	1,8 ± 0,28

**Tableau 10**: Moyennes et écart-types de la fréquence respiratoire (cycle respiratoire/sec) pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, 10 chevaux.

L'analyse de variance montre que les chevaux montés ont une fréquence respiratoire significativement plus élevée que celle des chevaux attelés ( $p < 0,05$ ).

Il ressort de l'analyse des paramètres physiologiques que montés, les chevaux ont des fréquences cardiaques et respiratoires plus élevées. De plus, les paramètres  $V_4$  et  $V_{200}$  sont diminués lorsque les chevaux sont montés avec une baisse de 13 m/min en moyenne pour la  $V_4$  et de 16 m/min pour la  $V_{200}$ .

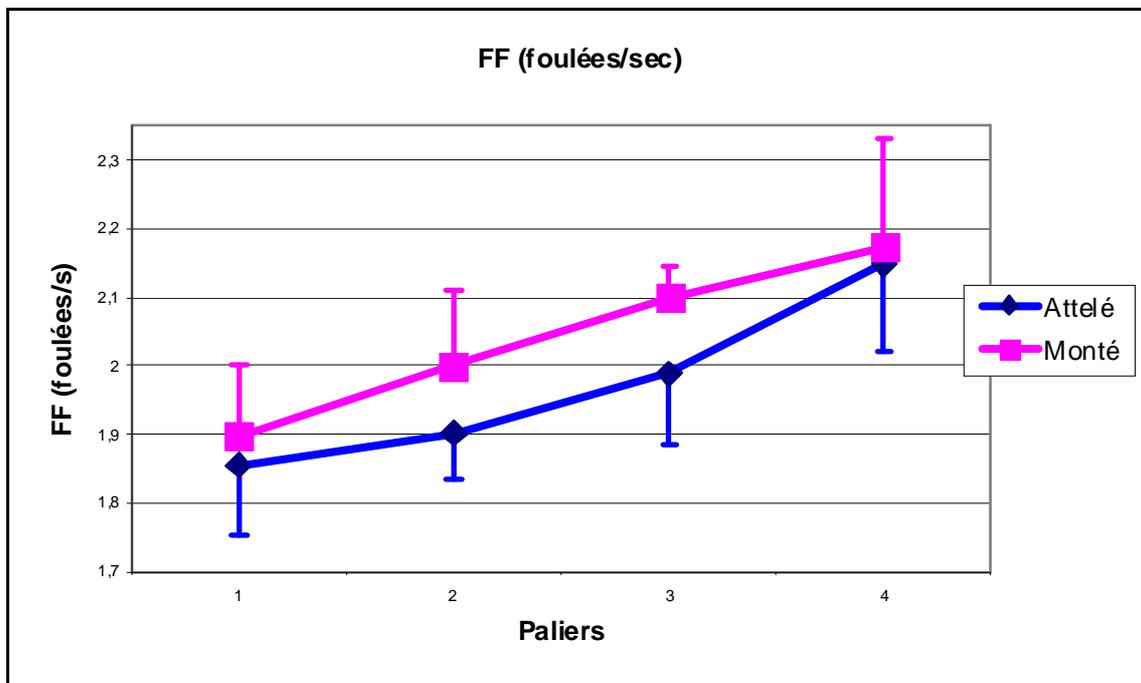
Par contre, notre étude ne permet pas d'affirmer qu'il existe des écarts significatifs entre les deux disciplines en ce qui concerne l'évolution de la lactatémie.

### ***C) Comparaison des paramètres locomoteurs***

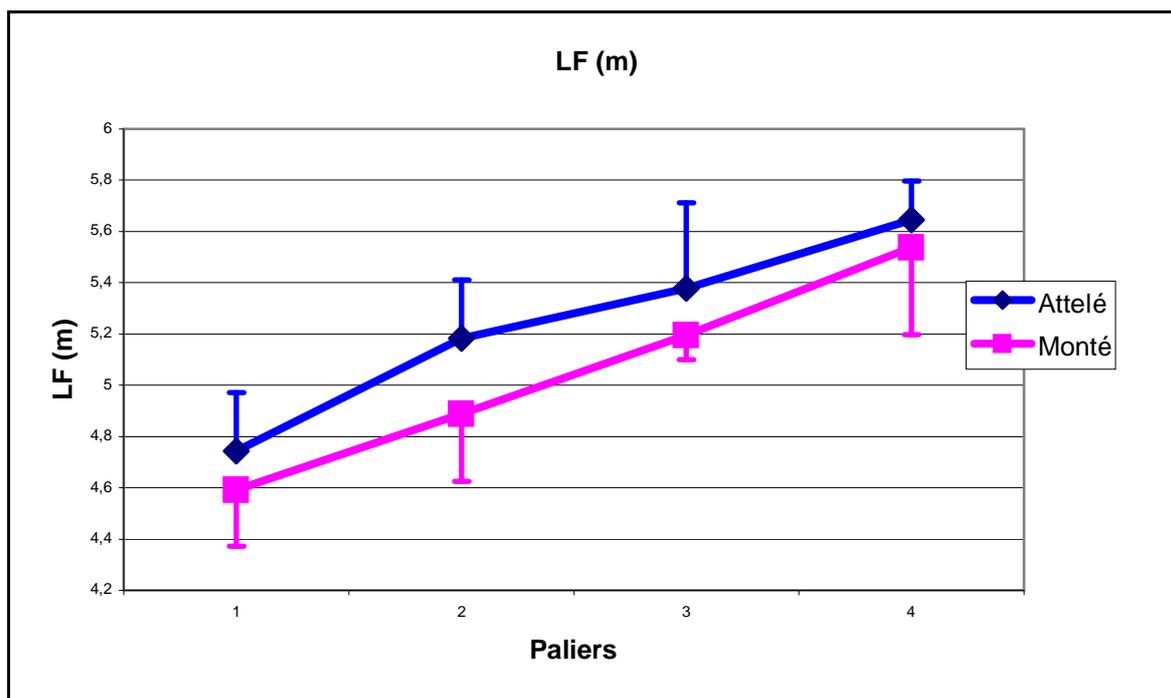
#### **1- Longueur et fréquence des foulées**

Discipline	Fréquence des foulées (FF)		Longueur des foulées (LF)	
	ATTELE	MONTE	ATTELE	MONTE
<b>Palier 1</b>	1,85 ± 0,1	1,90 ± 0,1	4,74 ± 0,2	4,59 ± 0,2
<b>Palier 2</b>	1,90 ± 0,07	2,00 ± 0,1	5,18 ± 0,2	4,89 ± 0,3
<b>Palier 3</b>	1,99 ± 0,1	2,1 ± 0,04	5,38 ± 0,3	5,19 ± 0,09
<b>Palier 4</b>	2,15 ± 0,1	2,17 ± 0,16	5,65 ± 0,1	5,54 ± 0,3

**Tableau 11**: Moyennes et écarts-types des variables fréquence de foulées FF (foulées/sec) et longueur de foulées LF (m) pour chaque palier de vitesse en fonction de la discipline (attelé vs monté), 10 chevaux.



**Figure 36** : Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de la fréquence de foulées FF (foulées/sec) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes  $\pm$  écarts-types.



**Figure 37** : Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de la longueur de foulée LF (m) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes  $\pm$  écarts-types.

On observe très nettement que la fréquence de foulée des chevaux montés est supérieure à celle des chevaux attelés. Par conséquent, la longueur de foulée est plus grande chez les chevaux attelés que montés. L'analyse de variance à deux facteurs (palier + discipline) confirme ces observations : elle montre que la FF monté est significativement supérieure à la FF attelé et que la LF attelé est significativement supérieure à la LF monté.

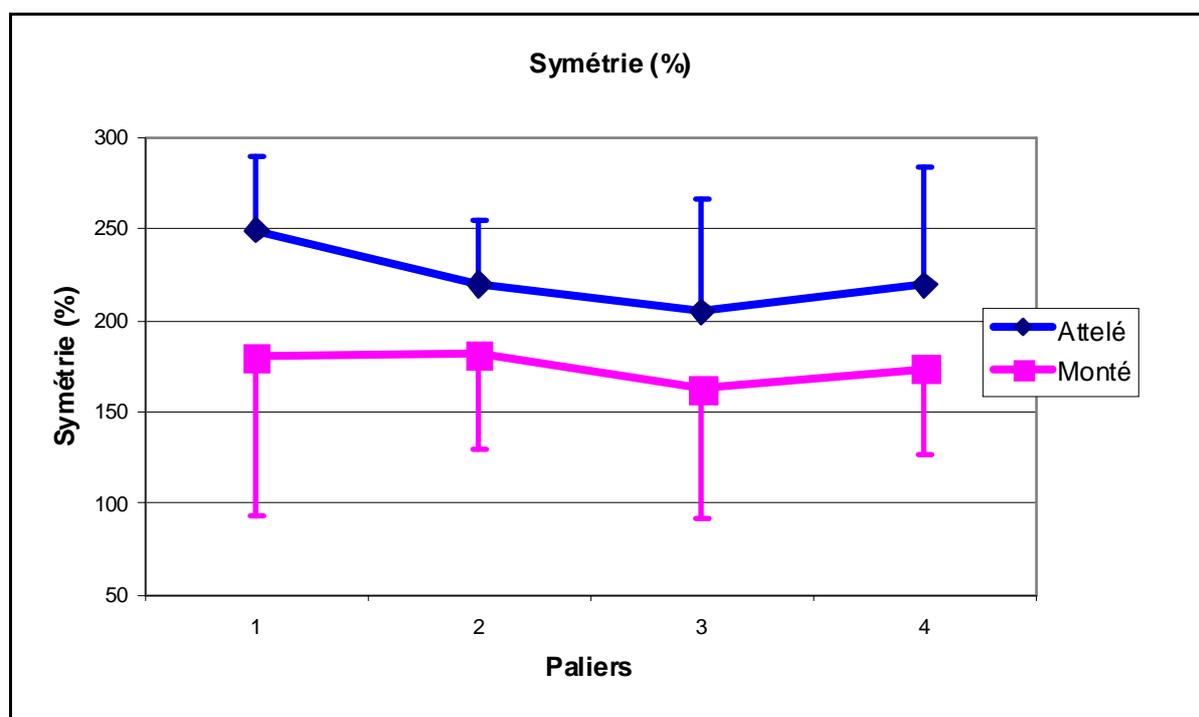
	LF	FF
ATTELE	5,23 ± 0,41	1,97 ± 0,15
MONTE	5,05 ± 0,44	2,04 ± 0,15

**Tableau 12:** Moyennes et écarts-types de la fréquence de foulées FF (foulées/sec) et de la longueur de foulées LF (m) pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, 10 chevaux.

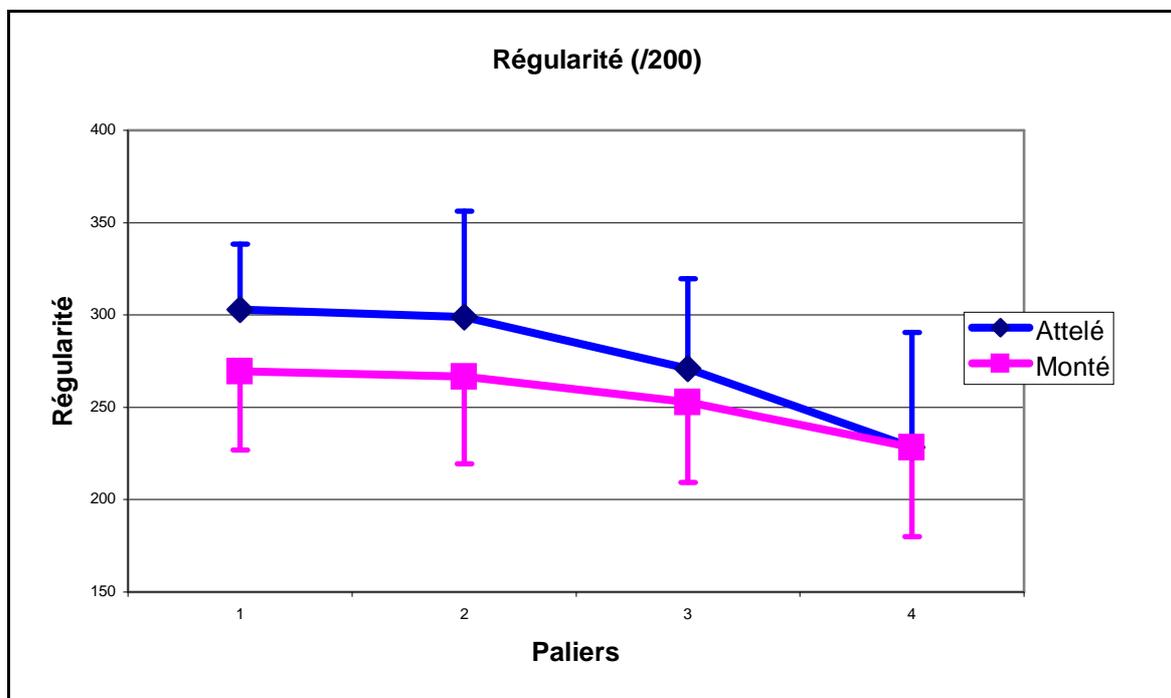
## 2- Symétrie et régularité

	Symétrie (%)		Régularité (/200)	
	ATTELE	MONTE	ATTELE	MONTE
Palier 1	249,1 ± 40	180 ± 86	303 ± 35	269,6 ± 42
Palier 2	219,9 ± 34	181,5 ± 51	298,9 ± 57	266,6 ± 47
Palier 3	205 ± 60	163 ± 71	270,8 ± 49	252,8 ± 44
Palier 4	219,5 ± 65	173,4 ± 47	228,4 ± 62	228,4 ± 48

**Tableau 13:** Moyennes et écarts-types des variables Symétrie (%) et Régularité (/200) pour chaque palier de vitesse en fonction de la discipline (attelé vs monté), 10 chevaux.



**Figure 38:** Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de la Symétrie (%) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes ± écarts-types.



**Figure 39** : Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de la Régularité (/200) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes  $\pm$  écarts-types.

Concernant la régularité, il est aisé de voir qu'elle diminue avec la vitesse et qu'elle est plus grande quand les chevaux sont attelés que quand ils sont montés. Cependant, à grande vitesse, la régularité est la même pour les deux disciplines (228,4). Même si cette tendance se voit clairement à travers le tableau 13 et le graphique 39, l'analyse de variance indique que les valeurs de régularité des deux disciplines ne sont pas significativement différentes.

Pour ce qui est de la symétrie, par contre, elle est significativement plus grande chez les chevaux attelés par rapport aux chevaux montés. Cela se retrouve nettement sur le graphique 38 où les courbes sont complètement séparées et ne se croisent pas, la courbe « attelé » étant au-dessus de la courbe « monté ».

	Régularité	Symétrie
<b>ATTELE</b>	274,6 $\pm$ 58,0	224,1 $\pm$ 51,9
<b>MONTE</b>	253,9 $\pm$ 46,5	175,1 $\pm$ 61,1

**Tableau 14** : Moyennes et écarts-types de la régularité (/200) et de la symétrie (%) pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, 10 chevaux.

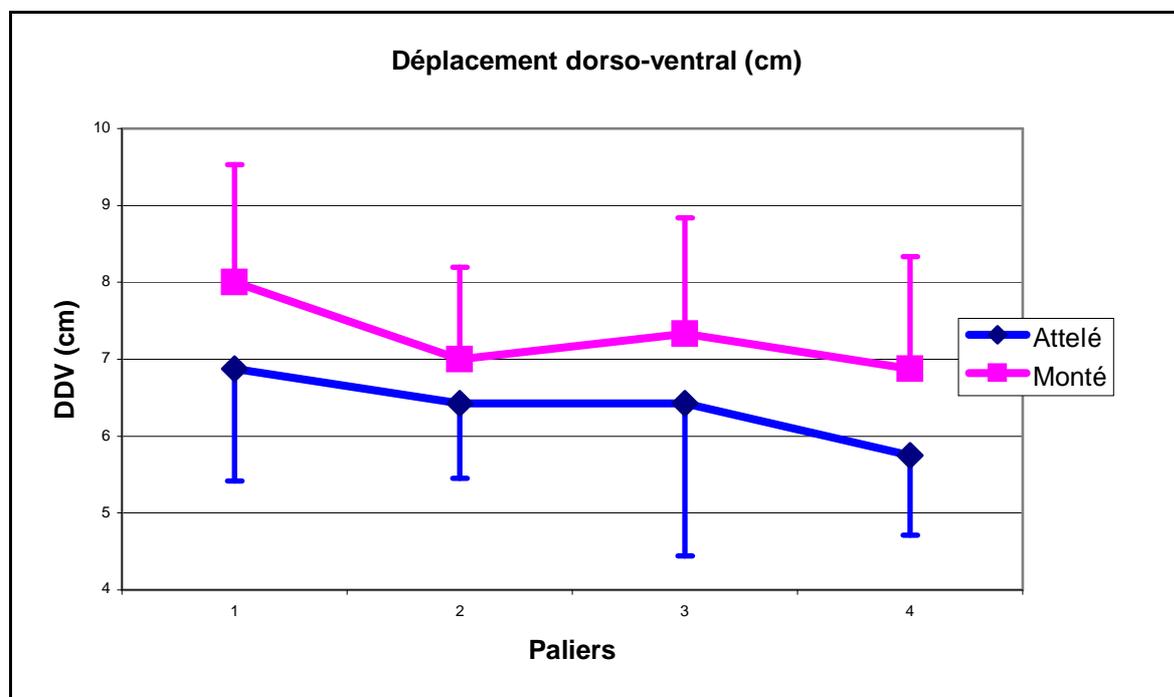
### 3- Déplacements latéraux, verticaux et longitudinaux

	DDV (cm)		DVA (g <sup>2</sup> /Hz)		LAT (g <sup>2</sup> /Hz)		A. Long (g <sup>2</sup> /Hz)	
	ATTELE	MONTE	ATTELE	MONTE	ATTELE	MONTE	ATTELE	MONTE
<b>Palier 1</b>	6,87±1,5	8±1,5	42,05±10,6	48,63±10,5	19,37±8,7	15,29±5,8	25,45±6,1	33,34±6,5
<b>Palier 2</b>	6,43±1,0	7±1,1	46,77±7,9	53,75±10,4	24,86±11,5	17,87±5,9	29,91±14,3	40,9±10,5
<b>Palier 3</b>	6,43±2	7,33±1,5	45,8±12,9	61,68±12,75	35±16,6	29,67±5,9	32,8±8,74	55,6±20,3
<b>Palier 4</b>	5,75±1,0	6,88±1,5	52,41±14	63,76±11,9	57±20,2	38,75±15,1	57,2±18,3	79,1±33,4

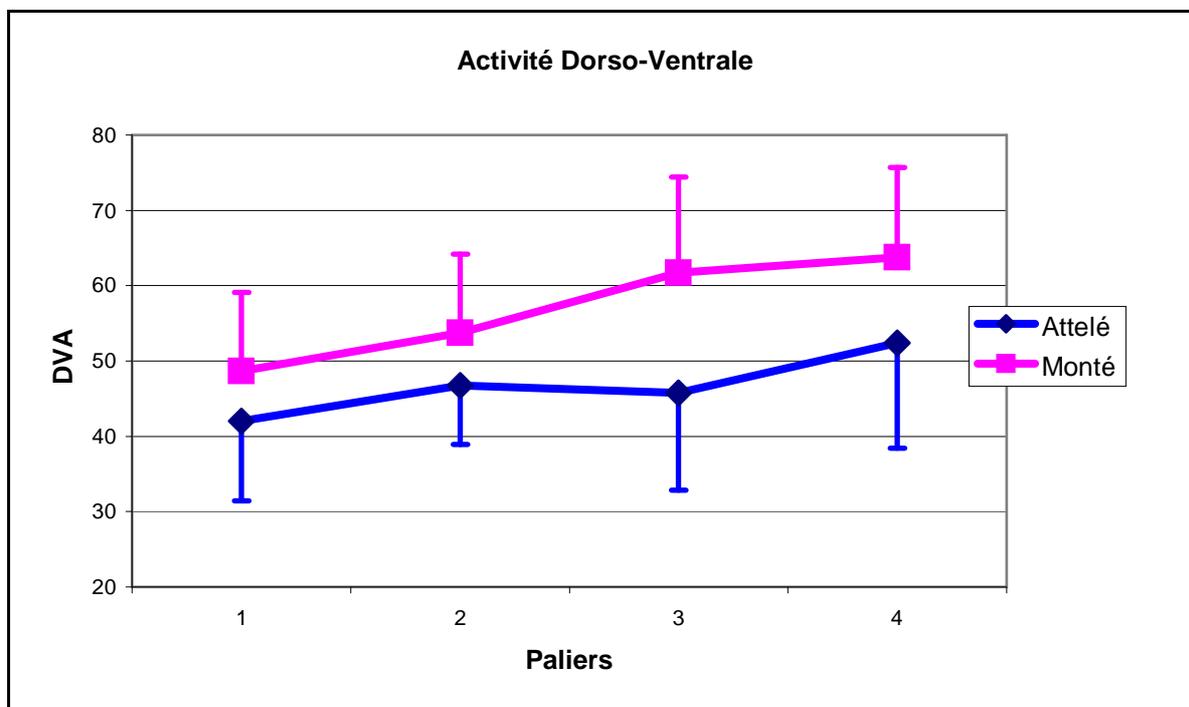
**Tableau 15** : Moyennes et écarts-types du déplacement dorso-ventral (DDV), de l'activité dorso-ventrale (DVA), de l'activité latérale (Lat) et de l'activité longitudinale (A.Long) pour chaque palier de vitesse en fonction de la discipline (attelé vs monté), 10 chevaux.

#### a- *Déplacements verticaux*

Comme le représentent les graphiques suivants, les variables DDV et DVA sont plus élevées monté qu'attelé.



**Figure 40** : Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution du déplacement dorso-ventral avec la vitesse, 4 paliers, moyennes ± écarts-types.



**Figure 41** : Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de l'activité dorso-ventrale ( $g^2/Hz$ ) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes  $\pm$  écarts-types.

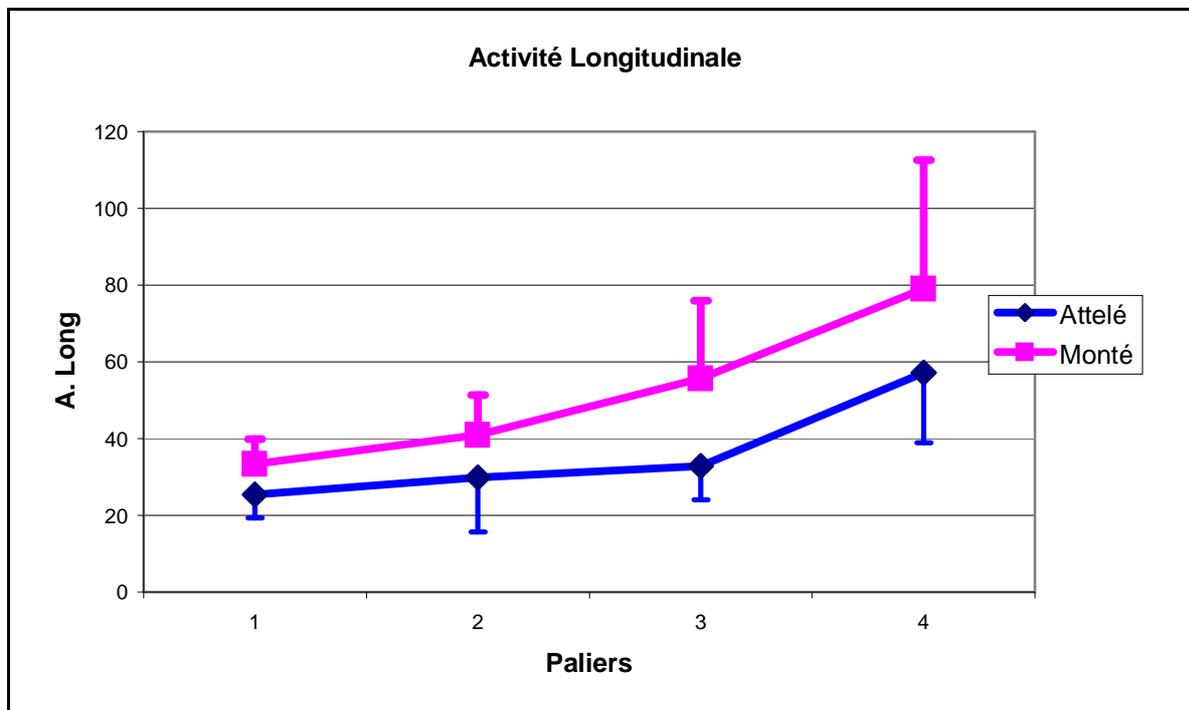
	<b>DDV</b>	<b>DVA</b>
<b>ATTELE</b>	6,37 $\pm$ 1,4	46,79 $\pm$ 11,7
<b>MONTE</b>	7,28 $\pm$ 1,4	56,92 $\pm$ 12,4

**Tableau 16** : Moyennes et écarts-types du déplacement dorso-ventral DDV (cm) et de l'activité dorso-ventrale DVA ( $g^2/Hz$ ) pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, 10 chevaux.

Il apparaît donc que sur l'ensemble des paliers, les chevaux montés ont des déplacements et des activités dorso-ventrales significativement supérieurs à ceux des chevaux attelés. Cela est d'autant plus marqué que la vitesse est élevée ; en effet, l'analyse de variance par palier révèle qu'à la vitesse moyenne de 640 m/min (3<sup>ème</sup> palier), la DVA des chevaux montés est significativement supérieure à celle des chevaux attelés.

### *b- Déplacements longitudinaux*

Tous paliers confondus, l'activité longitudinale est significativement plus élevée chez les chevaux montés que chez les chevaux attelés. Ce résultat est représenté sur le graphique suivant, où la courbe d'activité longitudinale « monté » se trouve au-dessus de celle « attelé », les deux courbes étant entièrement disjointes.



**Figure 42** : Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de l'activité longitudinale ( $g^2/Hz$ ) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes  $\pm$  écarts-types.

	<b>Activité Longitudinale</b>
<b>ATTELE</b>	36,67 $\pm$ 17,7
<b>MONTE</b>	52,65 $\pm$ 26,9

**Tableau 17**: Moyennes et écarts-types de l'activité longitudinale ( $g^2/Hz$ ) pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, 10 chevaux.

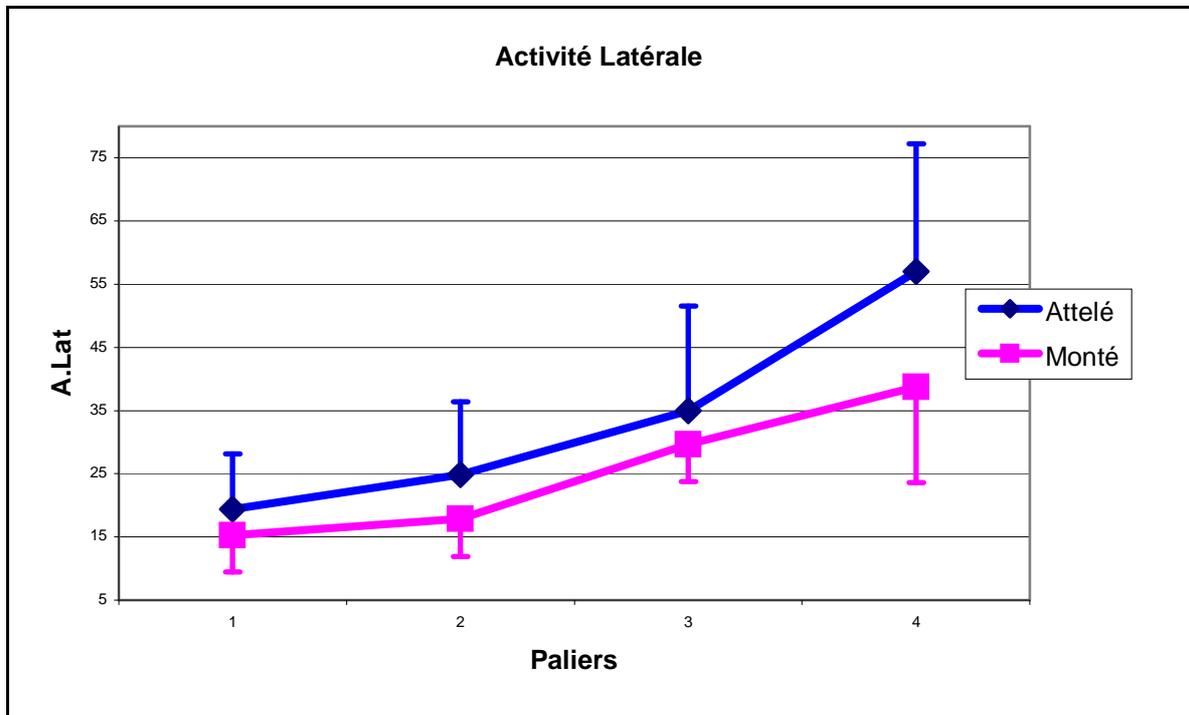
### c- Déplacements latéraux

Les chevaux attelés ont des déplacements latéraux significativement plus importants que les chevaux montés et ce, d'autant plus que la vitesse est grande.

En effet, c'est au palier 4 que l'écart est le plus important ( $p < 0,05$ ).

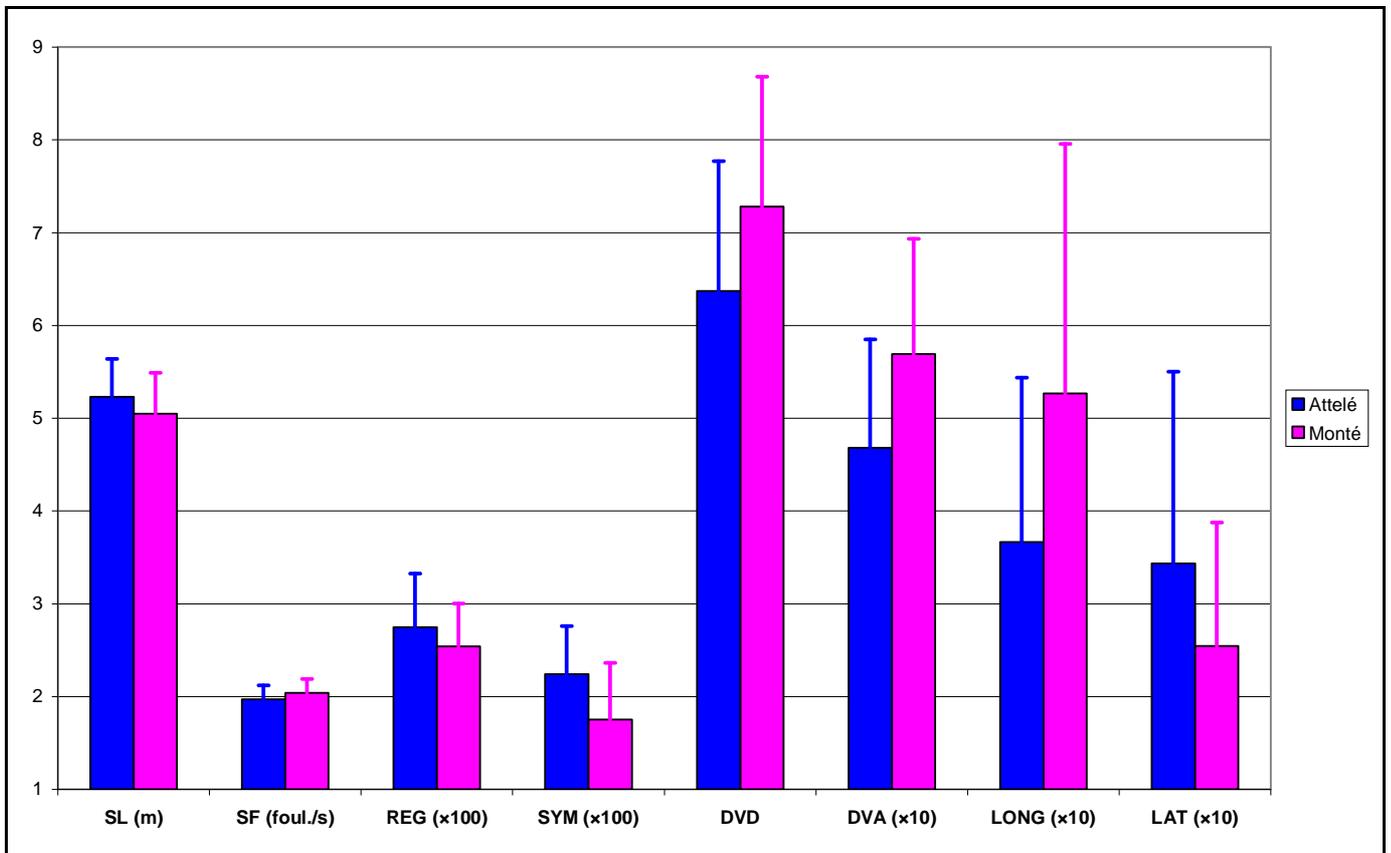
	<b>Activité Latérale</b>
<b>ATTELE</b>	34,33 $\pm$ 20,7
<b>MONTE</b>	25,45 $\pm$ 13,3

**Tableau 18**: Moyennes et écarts-types de l'activité latérale ( $g^2/Hz$ ) pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, 10 chevaux.



**Figure 43** : Effet sur 10 chevaux de la discipline (attelé vs monté) sur l'évolution de l'activité latérale (g2/Hz) avec la vitesse, 4 paliers, moyennes  $\pm$  écarts-types.

#### 4- Comparaison des variables locomotrices selon la discipline



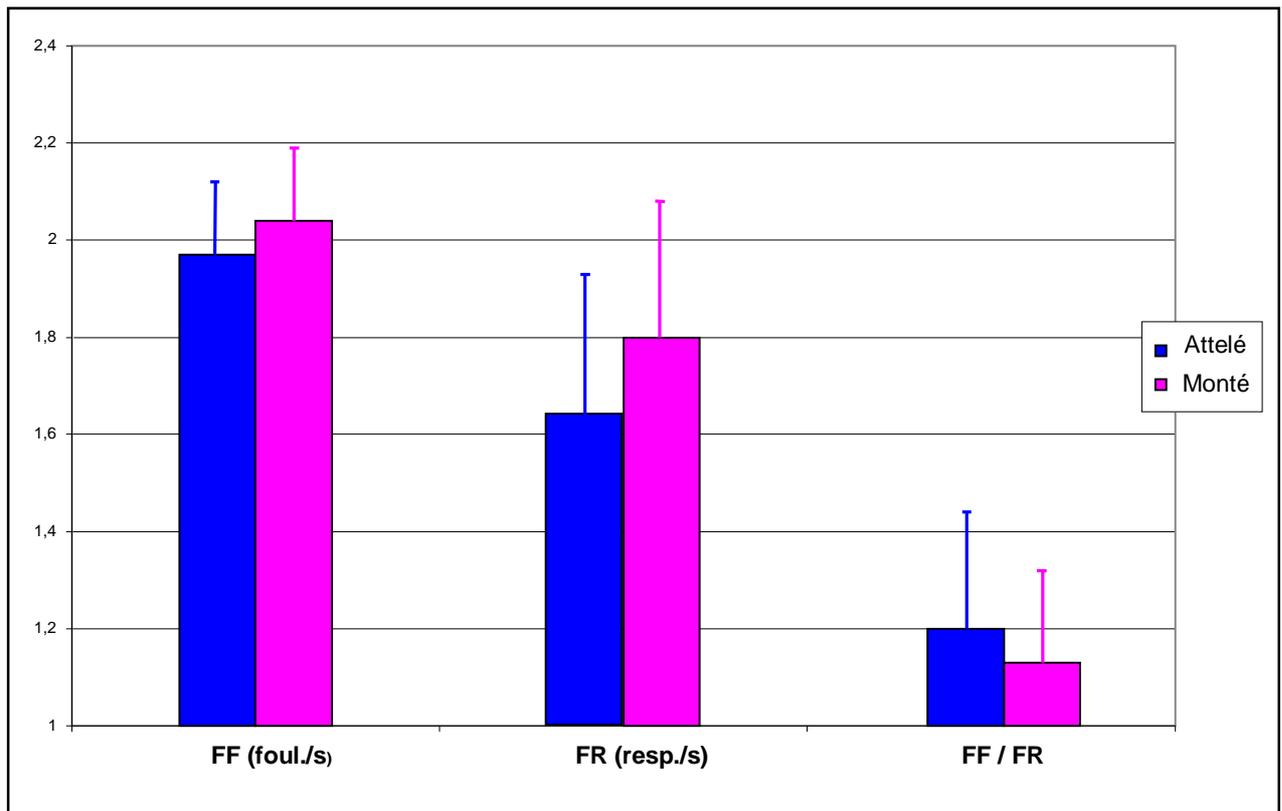
**Figure 44** : Comparaison de tous les paramètres locomoteurs mesurés selon la discipline (attelé vs monté).

## D) Couplage locomotion / respiration

Il est possible de décrire le couplage entre fréquence respiratoire et fréquence des foulées en calculant le rapport FF / FR moyen sur les trois paliers et pour chaque discipline :

	<b>FF</b>	<b>FR</b>	<b>FF / FR</b>
<b>ATTELE</b>	1,97 ± 0,15	1,64 ± 0,29	1,20 ± 0,24
<b>MONTE</b>	2,04 ± 0,15	1,8 ± 0,28	1,13 ± 0,19

**Tableau 19** : Moyennes et écarts-types de la fréquence de foulée FF (nb de foulées/s), de la fréquence respiratoire FR (cycle respiratoire/s) et ratio FF / FR pour chaque discipline (attelé vs monté) toutes vitesses confondues, 10 chevaux.



**Figure 45** : Fréquence de foulée (nb de foulées/s), fréquence respiratoire (cycle respiratoire/s) et ratio FF/FR pour chaque discipline (attelé vs monté), toutes vitesses confondues, 10 chevaux, moyennes ± écarts-types.

Au final, le couplage entre locomotion et respiration est proche du ratio 1 : 1 et il n'est pas modifié par la discipline.

L'analyse des paramètres locomoteurs révèle qu'un certain nombre de variables locomotrices est significativement influencé par le type de discipline. En effet, les chevaux montés présentent une foulée plus courte et qui se répète plus rapidement (fréquence de foulée plus élevée). D'autre part, la locomotion des chevaux attelés apparaît plus symétrique que celle des chevaux montés.

Enfin, les chevaux montés ont des déplacements verticaux et longitudinaux de leur centre de gravité beaucoup plus marqués, tandis que les chevaux attelés présentent des déplacements latéraux plus importants.

## **III- DISCUSSION**

Même si l'effort du cheval monté est reconnu comme étant plus éprouvant que l'exercice attelé et malgré les différences de temps record obtenues en course, il n'existe cependant pas de données concernant les caractéristiques physiologiques qui pourraient expliquer cette différence de sollicitation. Néanmoins, quelques études menées chez l'homme (*Abe et al., 2004*) et chez le cheval (*Hoyt et al., 2000, Wickler et al., 2001*), ont étudié les effets de l'ajout d'une charge sur le fonctionnement énergétique, la cinématique et les performances. Par contre, très peu d'études existent concernant le cheval de course (*Thornton et al., 1987*). Or les chevaux de course sont toujours sous l'effet d'un facteur extérieur lorsqu'ils accomplissent des efforts maximaux, qu'il s'agisse d'un jockey ou bien d'un sulky et de son driver. Il semble donc très intéressant d'étudier comment ce facteur peut influencer le fonctionnement énergétique et la locomotion.

### ***A) Analyse du protocole expérimental***

#### **1- Limites de l'étude**

Au cours de notre étude, un certain nombre de facteurs ont pu modifier les résultats obtenus.

- Tout d'abord, le fait de tester des chevaux de deux écuries différentes (Graignes et Grosbois), présente l'avantage de diversifier les sujets de notre échantillon mais se révèle être un inconvénient. En effet, les chevaux des deux écuries n'ont pas été testés dans des conditions exactement identiques : la piste n'était pas la même (nature et caractère « roulant » différents), les conditions météorologiques telles que le vent ou la température ambiante, n'ont pu être parfaitement identiques lors des tests. D'autre part, les chevaux se trouvant dans deux écuries différentes, ils n'ont pas forcément le même type ni le même niveau d'entraînement. Il faut également noter que pour les deux écuries, la durée qui s'est écoulée entre les deux séries de tests est différente : à Grosbois, les deux séries de tests ont été espacées d'une semaine, tandis qu'à Graignes, seuls quatre jours d'intervalle séparaient les deux tests. Il est donc possible que les chevaux testés à Graignes n'aient pas eu le temps de récupérer totalement de leur premier test au moment où ils ont réalisé le second. En plus de cette différence de récupération, les chevaux n'ont pas forcément fourni le même travail à l'entraînement entre les deux tests.

- Il nous faut également prendre en compte comme biais de mesure le fait qu'au sein d'un même groupe, les conditions ont pu varier entre les deux tests. En effet, pour l'écurie de Graignes, lors du 2<sup>ème</sup> test la piste était plus fouillante qu'au 1<sup>er</sup> test. Cela conduit à des problèmes d'évaluation des chevaux, qu'ils soient attelés ou montés, puisque lors du 2<sup>ème</sup> test, leurs paramètres ont pu être sous-évalués, les conditions étant plus difficiles.

- Ensuite, il faut considérer l'effet de l'interaction « cheval \* discipline » : certains chevaux tolèrent mieux d'être montés que d'autres dans la mesure où ils ont une conformation plus adaptée à cette discipline ou encore parce qu'ils en ont plus l'habitude.

Le facteur « comportement » influence aussi beaucoup l'évaluation du cheval, qu'il soit attelé ou monté, et il s'agit d'un paramètre sur lequel il est difficile d'agir. Certains chevaux vont se montrer fautifs, contractés ou inquiets et cela va avoir des répercussions sur les paramètres mesurés, notamment sur la fréquence cardiaque qui est très modifiée par la tension nerveuse. Lorsqu'un cheval est tendu, ses paramètres physiologiques sont donc sous-estimés. De plus, certains chevaux montés ne supportent pas de se trouver derrière le sulky et développent une très forte tension nerveuse.

Ces différents facteurs de confusion nous ont amené à retirer de notre étude 4 chevaux, car ils se sont montrés fautifs ou trop tendus. Cela explique pourquoi l'effectif initial de 14 chevaux est passé à 10.

- Un autre biais de mesure réside dans l'effet « cavalier » : même si nous nous sommes assurés de l'homogénéité des poids des drivers et jockeys, tous n'ont pas la même façon de monter ni de driver. Cela est d'autant plus vrai que les chevaux sont montés, car la position adoptée par le cavalier ainsi que ses mouvements dans la selle peuvent notablement modifier la façon dont le cheval évolue.

- Dans la théorie, pour le bon déroulement du test il est nécessaire que la vitesse soit maintenue constante pendant toute la durée du palier. Les chevaux ne pouvant être réglés comme les compte-tours de « machines », il est clair que cette contrainte ne peut être respectée complètement, qu'ils soient montés ou attelés.

- Concernant notre méthode d'étude de la locomotion, les mesures obtenues donnent des informations sur les variables spatio-temporelles des foulées, mais elles ne donnent aucun renseignement sur la cinématique des articulations ou des segments des membres, ce qui aurait pu permettre de préciser la différence de geste entre les deux conditions.

- Enfin une des limites majeure de notre étude réside dans le fait que la population que nous étudions est constituée d'un faible effectif. Nous pouvons donc nous interroger sur la puissance de notre essai, dans la mesure où notre échantillon est limité.

## 2- Pertinence de la méthode utilisée

Au cours de cette étude, nous avons mesuré à la fois les paramètres physiologiques et locomoteurs, dans le but d'avoir une approche globale et la plus complète possible du cheval à l'effort. En effet, les mesures cardiaques, métaboliques et locomotrices permettent de bien cerner l'aptitude sportive du trotteur, dans la mesure où elles caractérisent des facettes différentes et complémentaires du fonctionnement organique du cheval (*Barrey et al., 1995a*).

De plus, le but de notre étude n'était pas d'apprécier les qualités intrinsèques des chevaux ni de les comparer entre eux, mais d'évaluer les différences qu'induit, pour chaque cheval, le fait d'être monté ou attelé. Pour cela, la méthodologie que nous avons employée permet de comparer chaque cheval à lui-même, quelque soit son niveau, ce qui nous permet d'ailleurs de nous affranchir d'un certain nombre d'erreurs de mesure citées précédemment.

Afin d'évaluer la réponse métabolique des chevaux de cette étude, nous avons réalisé des tests d'effort standardisés de terrain. La fiabilité et la reproductibilité de ces tests sur le terrain ont été démontrées dans de nombreuses études (*Demonceau et Auvinet, 1992, Dubreucq et al., 1995, Casini et Greppi, 1996, Couroucé, 1999a*).

### a- Paramètres physiologiques

Concernant les paramètres physiologiques, les variables cardiaques et métaboliques sont considérées comme étant représentatives de l'effort (*Persson et al., 1997*). D'après *Art et Lekeux (1991)*, la mesure de la consommation d'oxygène serait le test le plus fiable pour estimer l'aptitude physique lors d'un effort. Cependant ce test nécessite l'utilisation d'un matériel sophistiqué et se déroule généralement sur tapis roulant. La corrélation de la vitesse d'exercice avec les deux paramètres que sont la lactatémie et la fréquence cardiaque pendant l'effort, donne l'estimation la plus fiable de la condition physique que l'on puisse proposer actuellement sur le terrain. Ainsi, la fréquence cardiaque et la lactatémie sont deux critères non-invasifs, pratiques, simples et efficaces pour juger des aptitudes sportives (*Valette et Wolter, 1988*).

- En effet, pour ce qui est de la fréquence cardiaque, elle constitue un très bon indicateur de la puissance aérobie et son enregistrement est un moyen facile et fiable pour évaluer l'adaptation physiologique du cheval lors d'un exercice sportif.

- Par ailleurs, même si la lactatémie n'est qu'une mesure indirecte de la réalité des phénomènes musculaires et que d'un point de vue théorique, certains auteurs réfutent la représentativité du paramètre V4 comme seuil anaérobie, la mesure des lactates reste actuellement universellement considérée comme un test fiable pour estimer l'aptitude

physique à l'effort (*Art et Lekeux., 1991*). De plus, la lactatémie s'avère être une des rares données mesurables sur le terrain chez le cheval.

- Concernant les méthodes de prélèvement et de dosage des lactates, nous avons choisi de faire nos mesures sur sang total. Comme le recommande *Ferrante et Kronfeld (1994)*, nous procédons à une déprotéinisation des échantillons dans l'heure suivant le prélèvement, afin d'éviter la métabolisation du glucose par les érythrocytes, ce qui augmenterait artificiellement la teneur en lactates et constituerait ainsi un biais. Même si certaines études réalisent leurs dosages sur plasma, le sang total est considéré comme le prélèvement de choix dans les conditions de terrain. En effet, il est plus facile et plus rapide de déprotéiniser du sang total plutôt que de séparer le plasma des érythrocytes par centrifugation (*Ferrante, 1995*). De plus, le sang total donnerait une meilleure image de l'accumulation des lactates dans le sang à partir des muscles qui travaillent, par rapport au plasma (*Persson et al., 1995, Räsänen et al., 1995, Väihkönen et al., 1999*).

- Les paramètres physiologiques  $V_4$  et  $V_{200}$  constituent un moyen adapté pour évaluer le potentiel athlétique des trotteurs de course; leur reproductibilité a été prouvée (*Dubreucq et al., 1995, Guhl et al., 1996*) et plusieurs études ont montré qu'ils étaient liés avec les performances réalisées en course (*Couroucé et al., 1997, Leleu et al., 2005*).

- Enfin, notre méthode d'étude de la respiration est facile à mettre en œuvre, bien tolérée par les chevaux et peu onéreuse. Cette technique a été décrite par *Derksen et al. (2001)*. Certains auteurs rapportent que l'enregistrement des bruits respiratoires à la piste présente des difficultés, notamment au niveau du placement correct du microphone et des interférences avec les bruits surajoutés associés à l'exercice (sabots, vent,...). En utilisant le dispositif tel que le préconise *Derksen et al. (2001)*, c'est-à-dire en plaçant le microphone entre les naseaux, à 4 cm du bout du nez, nous avons pu nous affranchir de ces éventuelles difficultés. De plus, concernant les bruits surajoutés, nous avons remarqué qu'à vitesse correspondant à la fréquence respiratoire maximale, ce sont les bruits expiratoires qui prédominent.

#### *b- Les paramètres locomoteurs*

Pour ce qui est du test locomoteur, le premier avantage du système de mesure est la localisation du capteur : il se trouve sur une surface plane et ferme lui assurant une bonne stabilité, et ceci proche du centre de gravité du cheval. De plus, il présente l'intérêt de permettre l'équipement habituel du cheval, qu'il soit attelé ou monté.

Ce test locomoteur a déjà été validé pour le cheval trotteur (*Barrey et al., 1995b, 1994, Leleu et al., 2002, 2004b*), grâce à un protocole de correspondance vidéo-accélérométrique,

mais aussi de reproductibilité spatiale et temporelle (Leleu, 2004a). La méthode accélérométrique d'analyse de foulées est facile à utiliser sur le terrain et l'analyse des données est rapide.

Drevemo et al. (1980b) indiquent que pour permettre des mesures précises et l'identification des caractéristiques des foulées, l'analyse doit porter sur au moins 3 à 5 foulées. Dans notre étude, nous analysons des échantillons de 20,48 secondes. Or avec une fréquence de foulée minimale de 1,85 foulée/seconde (lors du premier palier attelé), le nombre minimal de foulées analysées est de 35,84 foulées, ce qui paraît largement suffisant pour donner une compréhension acceptable de la locomotion des différents chevaux testés.

### c- Autres données

- Le fait de tester des chevaux de deux écuries différentes, qui peut être un inconvénient comme nous l'avons vu précédemment, présente tout de même l'avantage d'augmenter la représentativité de notre échantillon et de permettre l'extrapolation de nos résultats à la population des trotteurs en général. On peut donc s'attendre à ce que, quelque soit le sexe, l'âge, l'écurie du trotteur considéré, il aura des résultats similaires à ceux que nous obtenons, si on le teste attelé ou monté.

- Ensuite, nous nous sommes affranchis d'un certain nombre de facteurs de confusion, évoqués précédemment, lors de l'analyse des paramètres  $V_4$  et  $V_{200}$ . En effet, pour ces paramètres, chaque cheval a été comparé à lui-même, attelé et monté. Cela permet d'éliminer les problèmes liés aux conditions de test différentes (piste, âge, entraînement, ...).

- Nous avons utilisé une technique de GPS pour évaluer la vitesse des chevaux ainsi que leur position sur la piste. Cette technique a été validée depuis par Kingston et al. (2006). Ils ont démontré que les vitesses moyennes détectées avec le GPS étaient en accord avec celles relevées par l'entraîneur. Cette technologie s'avère fiable, précise et permet d'observer les accélérations réalisées par les chevaux. De telles informations ne peuvent être obtenues lorsque l'on calcule une vitesse moyenne à partir d'un chronomètre et de la distance parcourue.

- Enfin, comme décrit dans la partie I, la plupart des mesures ont été faites en double : deux cardio-fréquencemètres ont été utilisés, mais aussi deux enregistrements de la vitesse... Ces doubles mesures augmentent la robustesse de notre essai et ont permis de faire face à d'éventuelles défaillances techniques du matériel utilisé.

## ***B) Analyse des résultats***

### **1- La vitesse**

La vitesse étant le premier facteur de variation, il est important de comparer les chevaux à des vitesses similaires. Ici, pour tous les paliers, les chevaux ont évolué dans les deux disciplines à des vitesses quasi-identiques. Cependant, de manière inattendue, lors du dernier palier (accélération maximale), les vitesses des chevaux attelés ne sont pas différentes de celles des chevaux montés. Or, d'après l'étude des différents résultats en course, on se serait attendu à voir les chevaux attelés trotter plus vite que ceux montés. Cela s'explique sûrement par le fait que la vitesse obtenue lors de la dernière accélération n'est jamais maximale lors d'un test, en raison principalement du manque d'émulation et de sollicitation par le driver.

### **2- La fréquence cardiaque**

La fréquence cardiaque des chevaux montés est supérieure à celle des chevaux attelés. Cela traduit donc que l'effort demandé est plus difficile à réaliser monté qu'attelé. Cette tendance va se traduire par une fatigue apparaissant plus vite lorsque les chevaux sont montés.

### **3- $V_4$ et $V_{200}$**

Les valeurs de  $V_4$  et de  $V_{200}$  que nous obtenons dans notre étude correspondent à celles décrites par *Casini et Greppi (1996)* et *Couroucé (1999a)*. Ces deux paramètres ont des valeurs supérieures quand les chevaux sont attelés, ce qui traduit une plus grande demande en oxygène lorsque les chevaux sont montés. La  $V_4$  étant considérée comme un bon indicateur de la capacité d'endurance chez le cheval (*Persson et al., 1983*), elle révèle ici que les chevaux ont une meilleure résistance lorsqu'ils sont attelés, puisqu'ils sont moins fatigables. En effet, chez les chevaux montés, l'acide lactique s'accumule plus vite et ils franchissent donc leur « seuil de fatigue » avant les chevaux attelés.

De plus, la fréquence cardiaque étant plus élevée quand les chevaux sont montés, il en résulte des paramètres  $V_{200}$  plus bas. Ainsi, lorsque les chevaux sont attelés, ils ont une réponse cardiaque à l'effort plus faible que quand ils sont montés.

L'équipe de *Thornton et al. (1987)* a aussi pu noter une baisse significative de  $V_4$  et de  $V_{200}$  suite à l'ajout d'une charge. Dans leur étude, 5 trotteurs réalisent deux tests d'effort, le premier sans charge puis l'autre avec une charge d'environ 10 % de leur poids corporel, le tout se déroulant sur tapis roulant. Les deux tests sont espacés de deux jours. Ils obtiennent, lors de l'ajout de la charge, une diminution moyenne de  $80 \pm 59$  m/min pour  $V_4$  et de  $29 \pm 20$

m/min pour  $V_{200}$ . Dans notre étude, les différences sont respectivement de  $14 \pm 13$  m/min pour  $V_4$  et de  $20 \pm 25$  m/min pour  $V_{200}$ . L'écart important obtenu par *Thornton et al. (1987)* pour la  $V_4$  s'explique probablement par le fait que 3 des 5 chevaux de leurs tests ont des  $V_4$  très augmentées lors de l'ajout de la charge (jusqu'à 130 m/min de plus). Cela pourrait être dû à un intervalle plus court entre les deux tests (deux jours seulement), ne permettant pas à ces chevaux de récupérer totalement du test précédent.

#### 4- La fréquence respiratoire

Les valeurs de fréquence respiratoire que nous obtenons varient en moyenne entre 1,5 et 1,9 cycle respiratoire/seconde, ce qui correspond aux résultats de *Thornton et al. (1987)*. De plus, nous avons pu noter une fréquence respiratoire significativement plus importante lorsque les chevaux sont montés. *Thornton et al. (1987)* constatent aussi une augmentation de la fréquence respiratoire lors de l'ajout d'une charge, mais qui n'est pas significativement différente. Cela est certainement dû au fait que les chevaux de leur étude, testés sur tapis roulant, n'évoluaient qu'à vitesse sous-maximale.

L'analyse des paramètres cardiaques et métaboliques apporte une première réponse à notre problématique initiale. Si les chevaux montés trottent moins vite, c'est parce qu'ils sont plus sollicités d'un point de vue physiologique. Cela conduit à une efficacité musculaire moindre, qui se traduit par des performances inférieures. Celles-ci s'expliquent aussi par la détérioration de la qualité des allures. En effet, on ne peut dissocier la locomotion des capacités physiques, car l'efficacité de celle-ci repose sur l'intensité, la vitesse et la durée de la contraction musculaire.

#### 5- Longueur et fréquence de foulée

Les résultats révèlent clairement que les chevaux montés ont une longueur de foulée plus faible et une fréquence de foulée plus grande par rapport aux chevaux attelés. Cela traduit un geste de plus faible amplitude avec une diminution de la durée de la foulée chez les chevaux montés. *Thornton et al. (1987)* font des constatations similaires : ils notent que l'ajout d'une charge se traduit par une augmentation de la fréquence des foulées et une diminution de leur longueur. Cependant, ces modifications des caractéristiques de foulée qu'ils obtiennent sont moins marquées que dans notre étude, ce qui est lié au fait que les chevaux de *Thornton et al. (1987)* évoluent sur tapis roulant, et donc à des vitesses inférieures à celles de notre étude. Or les paramètres de longueur et de fréquence de foulées sont très dépendants de la vitesse

(Leach et Drevemo, 1991). Thornton et al. (1987) obtiennent des valeurs de fréquences de foulées inférieures à celles de notre étude de 1,82 foulée/seconde en moyenne. Il s'agit aussi d'une conséquence des conditions de test différentes, dans la mesure où la comparaison de la locomotion sur tapis roulant et à la piste révèle une diminution de la fréquence des foulées et une augmentation de leur longueur sur tapis roulant (Barrey et al., 1993b, Buchner et al., 1994, Couroucé, 1999b).

Ces résultats s'avèrent donc être un élément capital pour expliquer que les chevaux attelés trottent plus vite, dans la mesure où ils présentent une foulée plus grande qui se répète à une fréquence plus basse que lorsqu'ils sont montés. D'ailleurs, il a été montré que l'augmentation de la vitesse du trot serait due principalement à une augmentation de la taille des foulées plutôt que de leur vitesse d'exécution. Plusieurs études, notamment celles de Leleu (2004a) sur les trotteurs et de Munoz et al. (1998) sur les anglo-arabes, révèlent qu'avec l'augmentation de l'âge et de l'entraînement, les chevaux voient leur fréquence de foulée diminuer et leur longueur de foulée augmenter. Or c'est en multipliant les entraînements que le cheval développe une locomotion plus efficace et plus rapide. De même, Roneus et al. (1995) montrent que les trotteurs les plus performants sont ceux qui ont les foulées les plus longues à vitesses égales.

Enfin, les études menées chez l'homme obtiennent des résultats similaires : elles décrivent que le fait de porter un sac à dos entraîne une foulée plus courte et une fréquence de foulée augmentée. Cette constatation s'explique par une diminution de la rotation du bassin qui nécessite, pour maintenir une vitesse constante, que la fréquence des foulées augmente (Lafiandra et al., 2003).

Cependant, certains travaux sont en contradiction avec cette explication. En effet, Bayer (1973) qui étudie une quinzaine de trotteurs, note que ceux qui ont les meilleures performances présentent les fréquences de foulées les plus élevées. De même, Leleu (2004a), qui étudie les corrélations entre variables locomotrices et performances en course montre que les chevaux les plus performants sont ceux qui ont les fréquences de foulées les plus élevées. Cependant, toutes ces études concernent des chevaux testés alors qu'ils évoluaient à vitesse maximale, ce qui n'est pas le cas dans notre étude.

## 6- Couplage locomoteur et respiratoire

La fréquence de foulée plus basse chez les chevaux attelés est associée à une fréquence respiratoire significativement inférieure par rapport aux chevaux montés. En effet, ces deux paramètres évoluent conjointement et au final, le rapport entre locomotion et respiration n'est pas influencé par le fait d'être monté ou attelé. On peut émettre l'hypothèse que les chevaux

montés adoptent un schéma respiratoire différent en réponse à l'augmentation de leur fréquence de foulée, afin de maintenir un couplage locomotion-respiration qui soit proche du rapport 1 :1, tel que l'ont décrit *Barrey et al. (2000)* et *Cotrel et al. (2006)*.

## 7- Symétrie et régularité

Les chevaux attelés adoptent des allures plus symétriques et régulières que les chevaux montés. Or la qualité des allures et la régularité du trot sont des facteurs essentiels de performance en course (*Leleu, 2004a*). Comme nous l'avons évoqué précédemment, la dépense énergétique étant plus forte quand le cheval est monté, il lui est plus difficile de conserver des allures symétriques et régulières.

Même si notre analyse ne révèle pas de différences significatives de régularité entre les chevaux montés et attelés, la principale caractéristique de cette variable est qu'elle diminue avec la vitesse indépendamment de la discipline. Cela reflète qu'une coordination parfaite est de plus en plus difficile à maintenir par le cheval quand la vitesse augmente.

Une cause possible de la perte de symétrie lorsque les chevaux sont montés réside dans les interférences que le cavalier peut créer avec la locomotion du cheval à grande vitesse. La perte de symétrie quand le cheval est monté permet donc d'expliquer que celui-ci trotte moins vite. En effet, pour permettre au trot de devenir plus rapide, une très grande reproductibilité du schéma locomoteur est nécessaire, puisqu'il est alors essentiel d'obtenir le plus fréquemment possible la foulée la plus efficace possible.

## 8- Déplacements dans les trois dimensions

Les activités dorso-ventrales, longitudinales et latérales sont une quantification de l'amplitude et de la fréquence des accélérations dans les trois dimensions.

- Pour ce qui est des déplacements dorso-ventraux, ils sont plus importants quand le cheval est monté. Ainsi, le caractère « bondissant » du trot semble être accentué quand le cheval est monté. En effet, le trajet ondulant du centre de gravité chez le cheval monté devient plus plat lorsqu'il est attelé.

Les mouvements du centre de gravité, dans quelque direction que ce soit, réduisent l'efficacité de la locomotion et ils seraient donc une des causes de performances moindres des chevaux montés. Cependant, il faut tenir compte du fait que si le mouvement du centre de gravité des chevaux attelés paraît plus « écrasé », c'est peut-être parce que le poids des

brancards est réparti constamment sur le dos du cheval et exerce un appui sur celui-ci en diminuant les mouvements verticaux.

D'autre part, un autre facteur qui pourrait biaiser ce résultat réside dans le fait que le capteur est fixé sur la sangle de la selle (pour le cheval monté). En effet, au trot « en-levé », le cavalier monte et descend dans ses étriers, c'est-à-dire qu'il s'assoit dans la selle et s'en relève en rythme avec les foulées du cheval. Or ce mouvement vertical pourrait probablement entraîner un mouvement de la selle, qui s'écraserait sur le dos du cheval à chaque fois que le cavalier s'assoit et remonterait lorsqu'il se lève. La sangle (et donc le capteur) étant directement lié à la selle, cela pourrait accentuer le mouvement dorso-ventral.

- Concernant l'activité longitudinale, elle est plus importante chez les chevaux montés. Or une activité longitudinale élevée signifie des efforts de freinage et de propulsion importants (*Leleu, 2004a*). On comprend donc clairement que les chevaux attelés, qui présentent une activité longitudinale faible, aient une locomotion bien plus efficace.

- Enfin, de manière inattendue, les chevaux attelés montrent des déplacements latéraux plus importants que les chevaux montés. Cela est en contradiction avec le fait qu'attelé la locomotion est de meilleure qualité, puisque tout déplacement du centre de gravité freine le cheval. Cependant, on peut expliquer cette observation en considérant que les chevaux montés peuvent beaucoup moins se déplacer latéralement dans la mesure où ils sont « encadrés » par les jambes de leur cavalier de chaque côté. De même, il est possible que cette augmentation des déplacements latéraux chez les chevaux attelés soit due au fait que la sangle ait pu être ajustée avec une tension moins forte chez ces chevaux. Cela pourrait représenter un biais dans la mesure où le capteur accélérométrique est fixé à la sangle et que si celle-ci est moins tendue, les mouvements mesurés par le capteur seront plus importants. Cependant, il paraît difficile de s'affranchir de ce facteur de biais, puisqu'il n'est pas possible de quantifier précisément la tension avec laquelle la sangle est fixée.

A ce propos, l'étude de *Bowers et Slocombe (1999)* révèle que lorsque la sangle est trop tendue en course, elle diminue les performances des chevaux, ceux-ci se trouvant gênés dans leurs mouvements et leur respiration. On peut donc émettre l'hypothèse selon laquelle les chevaux montés sont sanglés de façon trop importante et qu'il pourrait éventuellement s'agir d'un facteur limitant leurs performances.

L'augmentation des déplacements dorso-ventraux et de l'activité longitudinale chez les chevaux montés permet, en partie, d'expliquer que la demande énergétique soit supérieure dans cette condition.

La gestuelle permettant de réaliser le trot le plus rapide nécessite une augmentation de la durée et de la longueur de la foulée, une symétrie et une régularité élevées, ainsi qu'une minimalisation des déplacements thoraciques dans les trois dimensions. Ces aptitudes biomécaniques vont de pair avec une coordination parfaite, le tout se réalisant à un coût énergétique moindre, dans le but de retarder au maximum l'apparition du phénomène de fatigue.

A l'origine des différences d'aptitudes physiologiques et de geste entre les chevaux attelés et montés, se trouve très certainement le cavalier. En effet, quand le cheval est monté, le cavalier modifie les mouvements naturels du centre de gravité du cheval, l'empêchant ainsi d'atteindre une vitesse supérieure. De plus, la répartition du poids sur le dos du cheval et les forces de freinages accrues ne sont pas favorables au cheval monté.



## CONCLUSION

Lorsqu'on observe des courses attelées et des courses montées, il apparaît une impression de plus grande « facilité » à trotter chez le cheval attelé, celle-ci se confirmant par les temps record enregistrés. A travers cette étude, nous avons tenté de décrire quelles étaient les adaptations physiologiques et biomécaniques qui pouvaient expliquer ces différences de performances entre chevaux attelés et montés. Il apparaît donc que c'est grâce à une foulée plus grande et qui dure plus longtemps, à des déplacements plus réguliers et symétriques, associés à de faibles mouvements du centre de gravité que le cheval attelé adopte une locomotion plus économique. Ainsi, grâce à une efficacité musculaire supérieure et à une sollicitation cardiaque moindre, il parvient à courir plus vite et plus longtemps que le cheval monté, avec un franchissement plus tardif de son « seuil de fatigue ». Les modifications significatives que nous avons pu observer reflètent l'augmentation du coût énergétique de la locomotion pour les chevaux montés. Cela serait dû à la fois à l'ajout de poids que représente le jockey, mais s'explique aussi par les interactions cheval-cavalier.

Une des applications directes de cette étude serait son utilisation par les entraîneurs dans l'orientation du choix de carrière de leurs chevaux. En effet, il serait intéressant d'évaluer les jeunes chevaux dans les deux disciplines et de noter dans laquelle ils ont le plus d'aptitudes. Ces orientations de carrière sont d'ailleurs déjà pratiquées de façon empirique par certains entraîneurs, qui par exemple font monter les chevaux qui ont de grandes allures pour leur « casser » les allures. Cependant, l'utilisation de ce test par les entraîneurs reste très peu probable en raison du coût qu'implique un tel suivi médico-sportif pour une écurie. En outre, les entraîneurs devraient tenir compte, dans leurs programmes d'entraînement, du coût métabolique supérieur que représente le fait de monter le cheval plutôt que de l'atteler.

Dans notre étude, nous avons uniquement analysé les paramètres liés au cheval pour expliquer les différences de performances qui existent entre les deux disciplines. Il serait intéressant d'étudier l'effet des différentes positions du cavalier sur les performances du cheval monté. En effet, il existe différentes façons pour le cavalier d'accompagner le trot. Si le cavalier adoptait une position qui gêne moins le cheval dans ses mouvements, on assisterait peut-être à une augmentation des vitesses de courses des chevaux montés. Ainsi en trottant « en équilibre », c'est-à-dire en appui sur les étriers et proche de la selle sans s'y asseoir, le cavalier permettrait peut-être de diminuer les mouvements du centre de gravité dans les trois dimensions. D'autre part, il limiterait aussi ses mouvements de mains qui induisent des modifications du positionnement de la tête du cheval, se répercutant sur sa locomotion. Il faut noter qu'il s'agit d'une tendance qui se développait lorsque nous avons réalisé ces tests, et qui

maintenant est généralisée, la plupart des jockeys ayant adopté ce type de monte. D'ailleurs on peut se demander dans quelle mesure l'évolution des courbes de temps record dans les deux disciplines ces dernières années serait une conséquence de ce changement de position des jockeys. En effet, les figures 1 et 2 présentées en introduction reflètent une tendance des courbes « attelé » et « monté » à se rapprocher l'une de l'autre lors des cinq dernières années, traduisant que les différences de temps records dans les deux disciplines s'estompent. Il reste à prouver qu'il existe vraiment un lien entre cette position du jockey et l'augmentation de la vitesse de trot. Pour cela, il serait intéressant de réaliser un test pour comparer l'effet des différentes positions du cavalier sur les performances du cheval.

**AGREMENT ADMINISTRATIF**

Je soussigné, A. MILON, Directeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, certifie que  
**Melle MOTTINI, Virginia, Charlotte, Marie**  
a été admis(e) sur concours en : 2003  
a obtenu son certificat de fin de scolarité le : **10 JUIL. 2008**  
n'a plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.

**AGREMENT SCIENTIFIQUE**

Je soussigné, Pierre Louis TOUTAIN, Professeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,  
autorise la soutenance de la thèse de :  
**Melle MOTTINI, Virginia, Charlotte, Marie**  
intitulée :  
«TROT ATTELE/TROT MONTE : Comparaison de la physiologie de l'effort et de la locomotion. »

**Le Professeur  
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse  
Professeur Pierre Louis TOUTAIN**

**Vu :  
Le Directeur  
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse  
Professeur Alain MILON**



**Vu :  
Le Président de la thèse :  
Professeur Bettina COUDERC**

**Vu le : 28 JUIL. 2008  
Le Président  
de l'Université Paul Sabatier  
Professeur Gilles FOURTANIER**





## BIBLIOGRAPHIE

1. ABE, D., YANAGAWA, K., NIIHATA, S.  
Effects of load carriage, load position, and walking speed on energy cost of walking.  
*Appl. Ergon.*, 2004, **35**, 329-335.
2. ART, T., AMORY, H., LEKEUX, P.  
Notions de base de physiologie de l'effort.  
*Prat. Vét. Equine*, 2000, **32**, 7-13.
3. ART, T., LEKEUX, P.  
Physiologie de l'effort et médecine sportive équine.  
*Prat. Vét. Equine*, 1991, **23** (2), 5-14.
4. ART, T., LEKEUX, P.  
Ventilatory and arterial blood gas tension adjustments to strenuous exercise in Standardbreds.  
*Am. J. Vet. Res.*, 1995, **56** (10), 1332-1337.
5. AUVINET, B., DEMONCEAU, T., COUROUCE, A.  
Intérêts prédictifs du suivi de la fréquence cardiaque et de la lactatémie chez le trotteur en course.  
*Compte-rendu de la 19ème Journée d'Etude, CEREOPA, Paris*, 1993, 2-13.
6. AUVINET, B., GALLOUX, P., GOUPIL, X. & al.  
Cinétique des lactates sanguins chez le cheval de Concours Complet d'Equitation ; Intérêt de la récupération active.  
*Compte-rendu de la 17ème Journée d'Etude, CEREOPA, Paris*, 1991b, 108-120.
7. BARREY, E.  
Modélisation du cheval à l'effort. Mise au point d'un simulateur sur un logiciel de calcul.  
*Rec. Méd. Vét.*, 1990a, **166** (12), 1135-1144.
8. BARREY, E., AUVINET, B., COUROUCE, A.  
Complémentarité des tests locomoteurs et des tests d'effort pour évaluer le potentiel de performance du trotteur.  
*EquAthlon*, 1995a, **7** (27), 8-13.
9. BARREY, E., AUVINET, B.  
Analyse de la foulée du trotteur par une ceinture accélérométrique.  
*EquAthlon*, 1993a, **5** (19), 35-38.
10. BARREY, E., AUVINET, B., COUROUCE, A.  
Gait evaluation of race trotters using an accelerometric device.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 1995b, **18**, 156-160.
11. BARREY, E., COUROUCE, A., d'ORSETTI, H. & al.  
Couplage de la ventilation respiratoire avec la locomotion du cheval de course.  
*EquAthlon*, 2000, **30**, 32-35.
12. BARREY, E., DEMONCEAU, T.  
Détermination du seuil anaérobie chez le cheval-athlète.  
*EquAthlon*, 1990b, **2** (8), 25-28.

13. BARREY, E., GALLOUX, P., VALETTE, J.P. & al.  
Stride characteristics of overground versus treadmill locomotion in the saddle horse.  
*Act. Anat.*, 1993b, **146**, 90-94.
14. BARREY, E., HERMELIN, M., VAUDELIN, J.L. & al.  
Utilisation of an accelerometric device in equine gait analysis.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 1994, **17**, 7-12.
15. BAYER, A.  
Bewegungsanalysen an Trabrennpferden mit Hilfe des Ungulographie.  
*Zbl. Vet. Med. A.*, 1973, **20**, 209-221.
16. BAYLY, W.M.  
The energetic basis of exercise.  
In: JONES, W.E.  
*Equine Sports Medicine, Philadelphia*, 1989, 11-16.
17. BAYLY, W.M.,  
Training programs.  
*Vet. Clin. North Am. Equine Pract.*, 1985, **1**, n°3, 597-610.
18. BOWERS, J.R., SLOCOMBE, R.F.  
Influence of girth strap tensions on athletic performance of racehorses.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 1999, **30**, 52-56.
19. BUCHNER, H.H., SAVELBERG, H.H.C.M., SCHAMHARDT, H.C. & al.  
Habituation of horses to treadmill locomotion.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 1994, **17**, 13-15.
20. BUCHNER, H.H.F., OBERMÜLLER, S., SCHEIDL. M.  
Body centre of mass movement in the sound horse.  
*Vet. J.*, 2000, **160**, 225-234.
21. CASINI, L., & GREPPI, G.F.  
Correlation of racing performance with fitness variables after exercise tests on treadmill and on track in Standardbred racehorses.  
*Pferdeheilkunde*, 1996, **4**, 466-469.
22. CLAYTON H.M.  
Locomotion.  
In: JONES, W.E.  
*Equine Sports Medicine, Philadelphia*, 1989.
23. CLAYTON, H.M.  
Comparison of the stride kinematics of the collected working, medium and extended trot in horses.  
*Equine Vet. J.*, 1994, **26**, (3), 230-234.
24. CLAYTON, M.H., LANOVAZ, J.L., SCHAMHARDT, H.C. & al.  
The effects of a rider's mass on ground reaction forces and fetlock kinematics at the trot.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 1999, **30**, 218-221.

25. COTREL, C., LELEU, C., COUROUCE-MALBLANC, A.  
Factors influencing variation in locomotor-respiratory coupling in Standardbred Trotters in the field.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 2006, **36**, 562-566.
26. COUROUCE, A.  
Contribution à l'évaluation de la charge de travail du cheval trotter à l'entraînement et en course.  
Thèse Méd. Vét. Nantes 18, 1993, 171p.
27. COUROUCE, A.  
Epreuves d'effort de terrain et applications pratiques.  
*Prat. Vét. Equine*, 2000a, **32**, 87-93.
28. COUROUCE, A.  
Field exercise testing for assessing fitness in French Standardbred trotters.  
*Vet. J.*, 1999a, **157**, 112-122.
29. COUROUCE, A., CHATARD, J.C., AUVINET, B.  
Estimation of performance potential of Standardbred trotters from blood lactate concentration measured in field conditions.  
*Equine Vet. J.*, 1997, **29** (5), 365-369.
30. COUROUCE, A., CHRETIEN, M., VALETTE, J.P.  
Physiological variables measured under field conditions according to age and state of training in French Trotters.  
*Equine Vet. J.*, 2002, **34**, (1), 91-97.
31. COUROUCE, A., GEFFROY, O., BARREY, E. & al.  
Comparison of exercise tests in French trotters under training track, racetrack and treadmill conditions.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 1999b, **30**, 528-532.
32. COUROUCE-MALBLANC, A.,  
La médecine sportive appliqué au cheval athlète.  
Cours d'approfondissement en sciences cliniques des équidés, Dominante T1-PRO  
"Pathologie equine", Session 2007-2008, 28p.
33. DAHL, S.  
Contribution à l'étude de la récupération active chez le trotteur à l'entraînement.  
Thèse Méd. Vét. Alfort 041, 2005, 92p.
34. DAVIE, A.J., PRIDDLE, T.L., EVANS, D.L.  
Metabolic responses to submaximal field exercise tests and relationships with racing performance in pacing Standardbreds.  
*Equine Vet. J. Suppl.*, 2002, **34**, 112-115.
35. DE COCQ, P., VAN WEEREN, P.R., BACK, W.  
Effects of girth, saddle and weight on movements of the horse.  
*Equine Vet. J.*, 2004, **36** (8), 758-763.

36. DEMONCEAU, T., AUVINET, B.  
Test d'effort de terrain pour trotteurs à l'entraînement : réalisation pratique et premiers résultats.  
Compte-rendu de la 18<sup>ème</sup> Journée d'Etude, CEREOPA, Paris, 1992, 120-132.
37. DEMONCEAU, T., VALETTE, J.P., WOLTER, R. & al.  
Modélisation de la relation lactate-vitesse chez le cheval de sport en fonction de la spécificité de l'entraînement.  
Compte-rendu de la 17<sup>ème</sup> Journée d'Etude, CEREOPA, Paris, 1991, 99-107.
38. DERKSEN, F.J., HOLCOMBE, S.J., HARTMANN, W. & al.  
Spectrum analysis of respiratory sounds in exercising horses with experimentally induced laryngeal hemiplegia or dorsal displacement of the soft palate.  
*Am. J. Vet. Res.*, 2001, **62** (5), 659-664.
39. DREVEMO, S, DALIN, G., FREDRICSON, I. & al.  
Equine locomotion : 2. The analysis of coordination between limbs of trotting Standardbreds.  
*Equine Vet. J.*, 1980b, **12** (2), 66-70.
40. DREVEMO, S, DALIN, G., FREDRICSON, I. & al.  
Equine locomotion : 3. The reproducibility of gait in Standardbred trotters.  
*Equine Vet. J.*, 1980c, **12** (2), 71-73.
41. DREVEMO, S., DALIN, G. FREDRICSON, I. & al.  
Equine locomotion : 1. The analysis of linear and temporal stride characteristics of trotting Standardbreds.  
*Equine Vet. J.*, 1980a, **12** (2), 60-65.
42. DUBREUCQ, C., CHATARD, J.C., COUROUCE, A. & al.  
Reproducibility of a standardised exercise test for Standardbred trotters under field conditions.  
*Equine Vet J., Suppl.*, 1995, **18**, 108-112.
43. EVANS, D.L., HARRIS, R.C., SNOW, D.H.  
Correlation of racing performance with blood lactate and heart rate after exercise in Thoroughbred horses.  
*Equine Vet. J.*, 1993, **25** (5), 441-445.
44. EVANS, D.L., RAINGER, J.E., HODGSON, D.R., EATON, M.D. & al.  
The effects of intensity and duration of training on blood lactate concentrations during and after exercise.  
*Equine Vet. J., Suppl*, 1995, **18**, 422-425.
45. EVANS, D.L., ROSE, R.J.  
Cardiovascular and respiratory responses in Thoroughbred horses during treadmill exercise.  
*J. exp. Biol.*, 1988, **134**, 397-408.
46. FERRANTE, P.L.  
Lactate measurement and interpretation : blood vs. plasma.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 1995, **18**, 478-479.
47. FERRANTE, P.L., KRONFELD, D.S.  
Effect of sample handling on measurement of plasma glucose and blood lactate concentrations in horses before and after exercise.  
*Am. J. Vet. Res.*, 1994, **55** (11), 1497-1500.

48. FORTIER, G., BERMAN, F., COUROUCE, A.  
Approche hématologique et biochimique dans le suivi médico-sportif du cheval athlète : intérêts et limites.  
2 - Bilan à l'exercice et à l'entraînement.  
*Prat. Vét. Equine*, 2000, **32**, 103-107.
49. FRANCAUX, M.A., JACQMIN, P.A., STURBOIS, X.G.  
The maximum lactate clearance : a new concept to approach the endurance level of an athlete.  
*Archives Internationales de Physiologie, Biochimie et Biophysique*, 1993, **101**, 57-61.
50. FRIC Jr, J., FRIC, J., BOLDT, F. & al.  
Reproducibility of post-exercise lactate and anaerobic threshold.  
*Int. J. Sports Med.*, 1988, **9**, 310-312.
51. GOTTLIEB, M., ESSEN-GUSTAVSSON, B., LINDHOLM & al.  
Circulatory and muscle metabolic responses to draught work compared to increasing trotting velocities.  
*Equine Vet. J.*, 1988, **20** (6), 430-434.
52. GOTTLIEB, M., ESSEN-GUSTAVSSON, B., SKOGLUND-WALLBERG, H.  
Blood and muscle metabolic responses to draught work of varying intensity and duration in horses.  
*Res. Vet. Sci.*, 1989, **47**, 102-109.
53. GUHL, A., LINDNER, A., VON WITTKE, P.  
Reproducibility of the blood lactate-running speed curve in horses under field conditions.  
*Am. J. Vet. Res.*, 1996, **57** (7), 1059-1062.
54. HARRIS, P., SNOW, D.H.  
The effects of high intensity exercise on the plasma concentration of lactate, potassium and other electrolytes.  
*Equine Vet. J.*, 1988, **20** (2), 109-113.
55. HOYT, D.F., TAYLOR, C.R.  
Gait and the energetics of locomotion in horses.  
*Nature*, 1981, **292**, 239-240.
56. HOYT, D.F., WICKLER, S. J., COGGER, E.A.  
Time of contact and step length : the effect of limb length, running speed, load carrying and incline.  
*J. Exp. Biol.*, 2000, **203**, 221-227.
57. JOHNSTON, C., GOTTLIEB-VEDI, M., DREVEMO, S. & al.  
The kinematics of loading and fatigue in the Standardbred trotter.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 1999, **30**, 249-253.
58. KATZ, A., SAHLIN, K.  
Regulation of lactic production during exercise.  
*J. Appl. Physiol.*, 1988, **65** (2), 509-518.
59. KINGSTON, J.K., SOPPET, G.M., ROGERS, C.W. & al.  
Use of a global positioning and heart rate monitoring system to assess training load in a group of Thoroughbred racehorses.  
*Equine Vet. J. Suppl.*, 2006, **36**, 106-109.

60. KRAM, R., TAYLOR, C.R.  
Energetics of running : a new perspective.  
*Nature*, 1990, **346**, 265-266.
61. KUBO, K., TAKAGI, S., MURAKAMI, M. & al.  
Heart rate and blood lactate concentration of horses during maximal work.  
*Bull. Equine. Res. Inst.*, 1984, **21**, 39-45.
62. LAFIANDRA, M., WAGENAAR, R.C., HOLT, K.G., & al.  
How do load carriage and walking speed influence trunk coordination and stride parameters?  
*J. Biomech.*, 2003, **36**, 87-95.
63. LAGARDE, J., PEHAM, C., LICKA, T. & al.  
Coordination dynamics of the horse-rider system.  
*J. Mot. Behav.* 2005, **37** (6), 418-424.
64. LEACH, D.H., DREVEMO, S.  
Velocity-dependent changes in stride frequency and length of trotters on a treadmill.  
*Equine Exercise Physiology*, 1991, **3**, 136-140.
65. LELEU, C.  
Analyse des facteurs locomoteurs de performance chez le cheval Trotteur.  
Thèse Doct.Sci-FA., Rennes, 2004a, 187p.
66. LELEU, C., BARILLER, F., COTREL, C. & al.  
Reproducibility of a locomotor test for trotter horses.  
*Vet. J.*, 2004b, **168**, 160-166.
67. LELEU, C., COTREL, C., COUROUCE-MALBLANC, A.  
Relationships between physiological variables and race performance in French Standardbred trotters.  
*Vet. Rec.*, 2005, **156**, 339-342.
68. LELEU, C., GLORIA, E., RENAULT, G., & al.  
Analysis of trotter gait on the track by accelerometry and image analysis.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 2002, **34**, 344-348.
69. LINDHOLM, A., SALTIN, B.  
The physiological and biochemical response of Standardbred horses to exercise of varying speed and duration.  
*Acta Vet. Scand.*, 1974, **15**, 310-324.
70. LOVELL, D.K., REID, T.A., ROSE, R.J.,  
Effects of maximal exercise on equine muscle: changes in metabolites, pH and temperature.  
*Equine Exercise Physiology*, 1987, **2**, 312-320.
71. LOVELL, D.K., ROSE, R.J.,  
Effects of post exercise activity on recovery from maximal exercise.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 1995, **18**, (*Equine Exercise Physiology 4*), 188-190.
72. MARLIN, D.J., HARRIS, R.C., HARMAN, J.C. & al.  
Influence of post-exercise activity on rates of muscle and blood lactate disappearance in the Thoroughbred horse.  
*Equine Exercise Physiology*, 1987, **2**, 321-331.

73. MARLIN, D.J., HARRIS, R.C., SNOW, D.H.  
Rates of blood lactate disappearance following exercise of different intensities.  
*Equine Exercise Physiology*, 1991, **3**, 188-195.
74. MARSLAND, W.P.  
Heart rate response to submaximal exercise in the Standardbred horse.  
*J. Appl. Physiol.*, 1968, **24** (1), 98-101.
75. McMICKEN, D.F.  
An energetic basis of equine performance.  
*Equine Vet. J.*, 1983, **15** (2), 123-133.
76. MOTTINI, V., LELEU, C., COTREL, C.  
Harnessed vs. mounted Standardbreds on the track : changes in gait and physiological variables.  
*Equine Vet. J. Suppl.*, 2006, **36**, 468-472.
77. MUNOZ, A., SANTISTEBAN, R., RUBIO, M.D. & al.  
Locomotor, cardiocirculatory and metabolic adaptations to training in Andalusian and Anglo-Arabian horses.  
*Res. Vet. Sci.*, 1998, **66**, 25-31.
78. *Palmarès des courses classiques au trot attelé et trot monté en France*. (Page consultée le 10 juin 2008), [en ligne]. Adresse URL : <http://trot.courses-france.com/>
79. PEHAM, C., LICKA, T., SCHOBESBERGER, H. & al.  
Influence of the rider on the variability of the equine gait.  
*Hum. Mov. Sci.*, 2004a, **23**, 663-671.
80. PEHAM, C., SCHOBESBERGER, H.  
Influence of the load of a rider or of a region with increased stiffness on the equine back : a modelling study.  
*Equine Vet. J.*, 2004b, **36** (8), 703-705.
81. PERSSON, S.G.B, ULLBERG, L.E.  
Blood volume in relation to exercise tolerance in trotters.  
*J. S. Afr. Vet. Assoc.*, 1974, **45** (4), 293-299.
82. PERSSON, S.G.B.  
Evaluation of exercise tolerance and fitness in the performance horse.  
*Equine Exercise Physiology*, 1983, **1**, 441-457.
83. PERSSON, S.G.B.  
Heart rate and blood lactate responses to submaximal treadmill exercise in the normally performing Standardbred trotter - Age and sex variations and predictability from the total red blood cell volume.  
*J. Vet. Med. A.*, 1997, **44**, 125-132.
84. PERSSON, S.G.B., ESSEN-GUSTAVSSON, B., FUNKQUIST, P. & al.  
Plasma, red cell and whole blood lactate concentrations during prolonged treadmill exercise at V<sub>LA4</sub>.  
*Equine Vet. J. Suppl.*, 1995, **18**, 104-107.

85. PÖSÖ, A.R., LAMPINEN, K.J., RÄSÄNEN, L.A.  
Distribution of lactate between red blood cells and plasma after exercise.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 1995, **18**, 231-234.
86. PREEDY, D.F., COLBORNE, G.R.  
A method to determine mechanical energy conservation and efficiency in equine gait: a preliminary study.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 2001, **33**, 94-98.
87. RAINGER, J.E., EVANS, D.L., HODGSON, D.R. & al.  
Blood lactate disappearance after maximal exercise in trained and detrained horses.  
*Research in Veterinary Science*, 1994, **57**, 325-331.
88. RÄSÄNEN, L.A., LAMPINEN, K.J., PÖSÖ, A.R.  
Responses of blood and plasma lactate and plasma purine concentrations to maximal exercise and their relation to performance in Standardbred trotters.  
*Am. J. Vet. Res.*, 1995, **56** (12), 1651-1656.
89. ROBERT, C., VALETTE, J.P., POURCELOT, P. & al.  
Effects of trotting speed on muscle activity and kinematics in saddlehorses.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 2002, **34**, 295-301.
90. RONEUS, N., ESSEN-GUSTAVSSON, B., JOHNSTON, C. & al.  
Lactate response to maximal exercise on the track: relation to muscle characteristics and kinematic variables.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 1995, **18**, 191-194.
91. RONEUS, N., ESSEN-GUSTAVSSON, B., LINDHOLM, A. & al.  
Plasma lactate response to submaximal and maximal exercise tests with training, and its relationship to performance and muscle characteristics in Standardbred trotters.  
*Equine Vet. J.*, 1994, **26** (2), 117-121.
92. ROSE, R.J., EVANS, D.L.  
Cardiovascular and respiratory function in the athletic horse.  
*Equine Exercise Physiology*, 1987, **2**, 1-24.
93. SCHUBACK, K., ESSEN-GUSTAVSSON, B.  
Muscle anaerobic response to a maximal treadmill exercise test in Standardbred trotters.  
*Equine Vet. J.*, 1998, **30** (6), 504-510.
94. SERRAUD, N.,  
La locomotion du cheval trotteur de course : description et principales causes de non-performance.  
Thèse Méd. Vét. Toulouse, 2003, 181p.
95. SLOET VAN OLDRUITENBORGH-OOSTERBAAN, M., BARNEVELD, A.,  
SCHAMHARDT, H.C.  
Effects of weight and riding on workload and locomotion during treadmill exercise.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 1995, **18**, 413-417.
96. SPRIGINGS, E., LEACH, D.  
Standardised technique for determining the centre of gravity of body and limb segments of horses.  
*Equine Vet. Journal*, 1986, **18** (1), 43-49.

97. THORNTON, J., PAGAN, J., PERSSON, S.  
The oxygen cost of weight loading and inclined treadmill exercise in the horse.  
*Equine Exercise Physiology* 2, 1987, 206-214.
98. THORNTON, J.R.  
Exercise testing.  
*Vet. Clin. North Am. Equine Pract.*, 1985, 1 (3), 573-595.
99. THORNTON, J.R., ESSEN-GUSTAVSSON, B., LINDHOLM, A., et al.  
Effects of training and detraining on oxygen uptake, cardiac output, blood gas tensions, pH and lactate concentrations during and after exercise in the horse.  
*Equine Exercise Physiology*, 1983, 1, 470-486.
100. VÄIHKÖNEN, L.K., HYYPPÄ, S., PÖSÖ, A.R.  
Factors affecting accumulation of lactate in red blood cells.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 1999, 30, 443-447.
101. VALETTE, J.P., WOLTER, R.  
Intérêt des mesures de lactatémie et de fréquence cardiaque comme critères d'aptitudes sportives.  
*Compte-rendu de la 14ème Journée d'Etude, CEREOPA*, Paris, 1988, 1-11.
102. WEBER, J.M., PARKHOUSE, W.S., DOBSON, G.P. & al.  
Lactate kinetics in exercising Thoroughbred horses : regulation of turnover rate in plasma.  
*Am. J. Physiol.*, 1987, 253, R896-R903.
103. WICKLER, S.J., HOYT, D.F., COGGER, E.A., & al.  
Effect of load on preferred speed and cost of transport.  
*J. Appl. Physiol.*, 2001, 90, 1548-1551.
104. WICKLER, S.J., HOYT, D.F., COGGER, E.A., & al.  
The cost of transport in an extended trot.  
*Equine Vet. J., Suppl.*, 2002, 34, 126-130.
105. WILSON, R.G., ISLER, R.B., THORNTON, J.R.  
Heart rate, lactic acid production and speed during a standardized exercise test in Standardbred horses.  
*Equine Exercise Physiology*, 1983, 1, 487-496.
106. WOLTER, R.,  
La nutrition de l'animal de sport.  
*Sciences et Sport*, 1987, 2, 63-93.

Toulouse, 2008

NOM : MOTTINI

Prénom : VIRGINIA

TITRE : Trot attelé/trot monté : comparaison de la physiologie de l'effort et de la locomotion.

RESUME :

L'analyse des temps records en course de trot sur ces 25 dernières années illustre clairement que les chevaux attelés sont toujours plus rapides que les chevaux montés dans des épreuves équivalentes. Ce travail a pour objectif de déterminer l'origine de cette différence de vitesse entre chevaux attelés et montés.

Un rappel bibliographique concernant la physiologie de l'effort du trotteur, l'évaluation de son aptitude sportive, la biomécanique du trot et l'influence du cavalier sur la locomotion du cheval, est d'abord présenté. Le protocole comprend la réalisation de tests d'effort standardisés sur une dizaine de trotteurs évoluant attelés ou montés, au cours desquels sont mesurés des paramètres physiologiques et locomoteurs. Il ressort de cette étude que les chevaux montés ont une  $V_4$  (vitesse pour une lactatémie de 4mmol/L),  $V_{200}$  (vitesse pour une fréquence cardiaque de 200bttts/min), longueur de foulée, symétrie et activité latérale qui sont plus basses, mais une fréquence respiratoire, fréquence de foulée, déplacement dorso-ventral, activité verticale et longitudinale qui sont plus élevés par rapport aux chevaux attelés. Ces modifications significatives reflètent l'augmentation du coût énergétique de la locomotion lorsque les chevaux sont montés, entraînant une détérioration de la qualité des allures et s'expliquant à la fois par l'ajout de poids que représente le jockey mais aussi par l'interaction de celui-ci avec le cheval.

MOTS-CLES : cheval, trot, trotteurs, physiologie de l'effort, locomotion, test d'effort.

---

ENGLISH TITLE : Harnessed vs. mounted Standardbred : changes in physiological and gait variables.

ABSTRACT :

It has become apparent through analysis of record time in trot races over the past 25 years that harnessed horses are always faster than mounted horses in equivalent events. The aim of this work is to investigate the cause of that speed difference between mounted and harnessed horses.

First, a bibliographic review deals with exercise physiology of trotters, assessment of athletic potential, locomotion biomechanics and effects of a rider on horse's locomotion. The protocol consists in standardised exercise testing of ten trotters, while harnessed or mounted. Physiological and gait variables are measured throughout the tests. This study reveals that  $V_4$  (speed for a blood lactate concentration of 4mmol/L),  $V_{200}$  (speed for a heart rate of 200beats/min), stride length, trot symmetry and lateral activity were lower in mounted condition. In contrast, respiratory frequency, stride frequency, dorsoventral displacement, vertical and longitudinal activities were higher in mounted horses compared to harnessed horses. These significant differences reflect an increase in the energy requirement of locomotion in the mounted condition, leading to an altered locomotion biomechanics. This higher energy cost may be related to the weight loading by the jockey but also to the horse-rider interaction.

KEYWORDS : horse, Standardbred, field exercise tests, gait, exercise physiology.