

Table des matières

Table des matières	1
Table des illustrations.....	7
Table des tableaux	9
LEXIQUE	11
INTRODUCTION GENERALE.....	13
Chapitre 1 PANORAMA GENERAL DE LA BIOMECHANIQUE CANINE ET DE L'ANALYSE DE LA DEMARCHE.....	15
I. Outils biomécaniques utilisables pour l'espèce canine	19
A. Cinétique.....	20
B. Cinématique.....	22
C. Association des méthodes cinématique et cinétique.....	25
II. Matériel et méthode classiques	26
A. Effectif	26
A. Matériel.....	26
B. Manipulations	27
C. Contrôle de la vitesse.....	28
D. Contrôle de la morphologie	29
III. Variables utilisées	30
A. Cinétique.....	30
1) Variables directes	30
2) Variables indirectes	32
B. Cinématique.....	35
1) Variables directes	35
1) Variables indirectes	35
IV. Objectifs.....	39
A. Etude de sujets sains	40
1) Cinétique.....	40
2) Cinématique.....	42
B. Variation liée à la vitesse.....	44
1) Cinétique.....	44
2) Cinématique.....	46

C.	Variation liée à la taille.....	48
1)	Cinétique.....	48
2)	Cinématique.....	48
D.	Autres variations.....	49
1)	Cinétique.....	49
2)	Cinématique.....	51
E.	Etude de cas pathologiques.....	52
1)	Cinétique.....	53
2)	Cinématique.....	53
F.	Problématique en suspens.....	54
1)	Cinétique.....	54
2)	Cinématique.....	55
	Conclusion du premier chapitre	59

Chapitre 2	VARIATION DES PARAMETRES CINETIQUES CHEZ LE CHIEN LORS DE LA LOCOMOTION SUR TAPIS ROULANT	61
I.	Présentation et objectifs du travail.....	63
A.	Problèmes et solutions proposées	63
B.	Présentation du travail	66
C.	Nouvelles problématiques	68
D.	Objectifs.....	70
II.	Techniques et méthodes.....	71
A.	Chiens	71
B.	Tapis roulant à capteurs de force	71
C.	Déroulement des manipulations	72
D.	Données utilisées	73
E.	Analyse des données.....	74
III.	Résultats et analyse statistique	76
A.	Analyse qualitative	77
B.	Analyse quantitative et statistique	85
C.	Analyse statistique de la variance.....	87
IV.	Discussion.....	88
A.	Discussion du protocole expérimental.....	88
B.	Discussion de l'analyse qualitative.....	90
C.	Discussion de l'analyse numérique de Fz.....	91
D.	Discussion de la variation.....	93
	Conclusion du second chapitre.....	95

Chapitre 3	APPLICATION DE L'ANALYSE BIOMECANIQUE SUR TAPIS ROULANT A L'ETUDE DE CHIENS ATTEINTS D'UNE MYOPATHIE DYSTROPHIQUE.....	97
I.	Présentation de l'affection étudiée : la Myopathie Dystrophique du Golden Retriever (GRMD).....	99
A.	La dystrophie musculaire du Golden Retriever	100
1)	Aspects génétiques	100
a)	Au niveau du chromosome	100
b)	Au niveau de l'ADN.....	101
c)	Au niveau de la protéine.....	101
2)	Phénotype lésionnel : aspects histologiques.....	103
a)	Atteinte du muscle strié squelettique.....	103
(i)	Lésions macroscopiques.....	103
(ii)	Lésions visibles en microscopie optique.....	103
(iii)	Lésions visibles en microscopie électronique à transmission	105
(iv)	Lésions détectables par enzymohistochimie	106
b)	Atteinte du muscle strié cardiaque.....	106
3)	Phénotype clinique	107
a)	Signes locomoteurs.....	107
b)	Autres appareils touchés.....	109
(i)	Signes digestifs.....	109
(ii)	Signes respiratoires	110
(iii)	Signes cardiaques	110
B.	Myopathies similaires dans d'autres espèces	111
1)	Dystrophie Musculaire de Duchenne (DMD)	111
2)	Dystrophie Musculaire liée au X (mdx) chez la souris.....	112
C.	Comparaison des modèles animaux pour l'étude de la myopathie de Duchenne	113
II.	Présentation et objectifs du travail.....	115
III.	Matériel et méthode	116
A.	Chiens	116
B.	Matériel spécifique	117
C.	Déroulement des manipulations	119

D.	Données utilisées	121
E.	Analyse des données.....	123
IV.	Résultats obtenus	123
A.	Réalisation de l'expérience.....	123
B.	Données visuelles	124
C.	Données cinématiques	125
1)	Hanche	125
2)	Genou.....	128
a)	Hauteur	128
(i)	Hauteur en avant.....	128
(ii)	Hauteur en arrière.....	130
(iii)	Hauteur au centre	130
b)	Angles.....	133
(i)	Angle en avant.....	133
(ii)	Angle en arrière.....	137
(iii)	Amplitude.....	140
3)	Cheville.....	143
a)	Hauteur	143
(i)	Hauteur en avant.....	143
(ii)	Hauteur en arrière.....	145
(iii)	Hauteur au centre	145
b)	Angles.....	148
(i)	Angle en avant.....	148
(ii)	Angle en arrière.....	152
(iii)	Amplitude.....	155
V.	Discussion.....	158
A.	Discussion du protocole expérimental.....	158
1)	Méthode	158
2)	Logiciel.....	160
3)	Réalisation des manipulations	161
B.	Discussion des résultats	162
1)	Résultats pour la hanche	163
2)	Résultats pour le genou.....	163
3)	Résultats pour la cheville.....	165

Conclusion du troisième chapitre	169
CONCLUSION GENERALE	171
Glossaire des abréviations utilisées	173
BIBLIOGRAPHIE	175
ANNEXES	185

Table des illustrations

Figure 1 : Déroulement du cycle de marche du chien aux différentes allures	18
Figure 2 : Postérieur gauche de chien appuyant sur un plateau de force	20
Figure 3 : Modélisation usuelle pour un antérieur (A) et un postérieur (B).....	22
Figure 4 : Modélisation d'un chien à l'aide de 11 marqueurs	24
Figure 5 : Appui d'une patte et mise en évidence des trois forces générées	30
Figure 6 : Enregistrement des trois forces lors de l'appui d'un antérieur puis d'un postérieur de chien.....	31
Figure 7 : Intervalles de charge et de décharge pour l'appui d'un antérieur et d'un postérieur de chien.....	32
Figure 8 : Diagramme en boucle (A) et profil du vecteur sagittal (B).....	34
Figure 9 : Courbe d'angle articulaire en fonction du temps pour les articulations du membre antérieur de chien.....	36
Figure 10 : Courbe d'angle articulaire en fonction du temps pour les articulations du membre postérieur de chien.....	37
Figure 11 : Courbe caractéristique pour le poser d'un antérieur et d'un postérieur au pas et au trot.....	42
Figure 12 : Courbe caractéristique au pas et au trot.....	47
Figure 13 : Représentation des variables utilisées pour l'analyse numérique	75
Figure 14 : Evolution de la force verticale F_z au cours d'une capture de 10 secondes	78
Figure 15 : Evolution de la force verticale F_z et de la force médio-latérale F_x	79
Figure 16 : Comparaison de la force médio-latérale F_x et de la force verticale F_z mesurée par les capteurs à l'avant du tapis.....	80
Figure 17 : Comparaison de la force médio-latérale F_x et de la force verticale F_z mesurée par les capteurs à l'arrière du tapis	81
Figure 18 : Evolution de la force verticale F_z et de la force antéro-postérieure F_y	83
Figure 19 : Evolution de F_y , mise en évidence d'un pic à l'impact (données non filtrées).....	84
Figure 20 : Interface d'analyse, superposition des différents pas.....	86
Figure 21 : Mutation génétique à l'origine de la myopathie dystrophique du Golden Retriever	101
Figure 22 : Situation de la protéine Dystrophine dans la cellule musculaire.....	102

Figure 23 : Lésions histologiques du muscle lors du développement de la myopathie dystrophique du Golden Retriever	105
Figure 24 : Représentation des données utilisées pour l'analyse cinématique	122
Figure 25 : Evolution des paramètres de hauteurs moyenne (1) maximale (2) et moyenne (3) pour le marqueur de la hanche	126
Figure 26 : Evolution des paramètres de hauteurs en avant (1) en arrière (2) pour le marqueur du genou	129
Figure 27 : Evolution des paramètres de hauteurs au centre moyenne (1) maximale (2) et minimale (3) pour le marqueur du genou.....	131
Figure 28 : Evolution des paramètres d'angles en avant moyen (1) maximal (2) et minimal (3) pour le marqueur du genou.....	135
Figure 29 : Evolution des paramètres d'angles en arrière moyen (1) maximal (2) et minimal (3) pour le marqueur du genou.....	138
Figure 30 : Evolution des paramètres d'amplitudes moyennes (1) et maximales (2) pour le marqueur du genou.....	141
Figure 31 : Evolution des paramètres de hauteurs en avant (1) en arrière (2) pour le marqueur de la cheville.....	144
Figure 32 : Evolution des paramètres de hauteurs au centre moyenne (1) maximale (2) et minimale (3) pour le marqueur de la cheville	146
Figure 33 : Evolution des paramètres d'angles en avant moyen (1) maximal (2) et minimal (3) pour le marqueur de la cheville	149
Figure 34 : Evolution des paramètres d'angles en arrière moyen (1) maximal (2) et minimal (3) pour le marqueur de la cheville	153
Figure 35 : Evolution des paramètres d'amplitudes moyennes (1) et maximales (2) pour le marqueur de la cheville	156
Figure 36 : Schématisation de la stature d'un chien GRMD, comparaison avec un chien normal.....	167

Table des tableaux

Tableau I : Tableau de statistiques descriptives pour un animal.....	85
Tableau II : Tableau de statistiques descriptives pour l'ensemble des sujets.....	87
Tableau III : Contribution du facteur "Chien" dans la variation totale	88
Tableau IV : Tableau de comparaison des différentes myopathies de l'homme, du chien et de la souris.....	114
Tableau V : Résultats numériques de la force verticale Fz mesurée selon le protocole du chapitre 2.....	186
Tableau VI : Résultats numériques pour le mouvement de la hanche selon le protocole du chapitre 3.....	188
Tableau VII : Résultats numériques pour le mouvement du genou selon le protocole du chapitre 3.....	189
Tableau VIII : Résultats numériques pour le mouvement de la cheville selon le protocole du chapitre 3.....	190

LEXIQUE

Accélération : Evolution de la vitesse par rapport au temps. Mathématiquement, correspond à la dérivée de la vitesse par rapport au temps, donc à la dérivée seconde du déplacement par rapport au temps.

Allure : Type de locomotion particulier pour lequel il est possible de dégager une répétition de foulées identiques caractéristiques. Exemple : pas, trot, galop.

Allure assymétrique : Allure pour laquelle le mouvement des membres situés d'un coté de l'animal, ne reproduit pas les mouvements du coté controlatéral. Exemple : le galop.

Allure symétrique : Allure pour laquelle le mouvement des membres situés d'un coté de l'animal, reproduit « en miroir » les mouvements du coté controlatéral, avec un décalage constant. Exemple : le trot.

Biodynamique : Etude du mouvement des êtres vivants. Intéressante dans l'étude de gestes précis (préhension) de gestes sportifs, de démarche anormales... Se divise généralement en cinétique et cinématique.

Biomécanique : Application des principes de la mécanique aux êtres vivants. Se divise couramment en biostatique et biodynamique.

Cinématique : Type d'analyse du mouvement qui consiste à décrire le mouvement sous forme de trajectoire. La cinématique étudie les mouvements transversaux et angulaires, et les exprime en fonction de coordonnées temporelles.

Cinétique : Type d'analyse du mouvement qui consiste à étudier les forces générées ou subies pendant la locomotion.

Déplacement : Evolution de la position d'un objet, ici d'un marqueur articulaire.

Foulée : Regroupement de la phase d'appui et de la phase de soutien. Peut être considérée au niveau d'une patte ou au niveau de l'animal entier. Egalement appelée cycle de marche.

Freinage : Force nécessaire pour diminuer la vitesse de l'animal. Cette force intervient au début de la phase d'appui.

Force antéro-postérieure (F_y) : Une des trois décompositions de la force de réaction du sol, décomposition effectuée lors d'analyse à plateau de force. Elle correspond à la part de la force effectuée horizontalement, dans le plan sagittal de l'animal. Egalement appelée, force cranio-caudale, ou force de freinage-propulsion.

Force de réaction du sol : Force exercée par une surface en réponse à un appui sur elle-même. La force de réaction du sol correspond à l'opposé des forces à l'appui pour un pied.

Force médio-latérale (F_x) : Une des trois décompositions de la force de réaction du sol, décomposition effectuée lors d'analyse à plateau de force. Elle correspond à la part de la force effectuée horizontalement, perpendiculairement au plan sagittal de l'animal.

Force verticale (F_z) : Une des trois décompositions de la force de réaction du sol, décomposition effectuée lors d'analyse à plateau de force. Elle correspond à la part de la force effectuée verticalement.

Impulse : Terme anglo-saxon, qui correspond à l'aire sous la courbe de la force en fonction du temps. Il peut se calculer pour la force verticale, la force antéro-postérieure de freinage et la force antéro-postérieure de propulsion

Moment selon l'axe vertical : Moment des forces tendant à faire tourner la patte autour de l'axe de rotation Z.

Phase d'appui : Période de la foulée au cours de laquelle la patte est en contact avec le sol. Cette phase regroupe, l'impact initial, l'appui, le soulever.

Phase de soutien : Période de la foulée au cours de laquelle la patte est en l'air.

Plateau de force : Plateau d'analyse permettant l'enregistrement de la force exercée sur lui-même, en terme d'amplitude, de direction et de sens. La force est couramment décomposée selon les trois directions de l'espace.

Position : Placement d'un objet, en l'occurrence d'un marqueur dans un repère défini. La position est exprimée en terme de coordonnées selon les trois dimensions de l'espace.

Propulsion : Force nécessaire pour augmenter la vitesse de l'animal. Cette force intervient à la fin de la phase d'appui.

Trajectoire : Expression du mouvement d'un marqueur en terme de position, déplacement, vitesse et accélération. Mathématiquement, il est possible d'écrire une équation de trajectoire pour déterminer à chaque instant les données de position, vitesse et accélération.

Vitesse : Evolution du déplacement en fonction du temps. Mathématiquement, correspond à la dérivée du déplacement par rapport au temps.

INTRODUCTION GENERALE

Chez le chien, classiquement, la simple « récupération de fonction » a servi de fil conducteur au développement de l'orthopédie depuis 30 ans. La médecine et la chirurgie vétérinaires ont connu de nombreuses avancées thérapeutiques, mais l'évaluation subjective a toujours servi de référence. La biomécanique est un des outils les plus pointus et les plus sous-utilisés dans ce domaine pour l'espèce canine.

La biomécanique peut se définir comme étant l'application de la mécanique à l'étude de tous les organismes vivants, à l'étude des forces générées ou subies par l'organisme et de leurs effets sur son mouvement ou ses déformations.

La locomotion a parfois été comparée à un orchestre symphonique [94] dans lequel « chaque partie doit se mêler dans un motif harmonieux : des oscillations de la tête et de la queue pour l'équilibre, aux efforts coordonnés de chaque membre et muscle pour accomplir sa tâche particulière. Inversement, comme une orchestration, si chacun des mouvements n'est pas en accord avec l'ensemble, la faute devient évidente ». La biomécanique aide à la compréhension des interactions complexes de la locomotion.

La biomécanique comporte deux composantes principales : la biostatique et la biodynamique. La biostatique correspond à l'étude des corps dans une position donnée. Ainsi, cette discipline concerne l'équilibre statique d'une articulation et les forces mises en jeu. La biodynamique correspond à l'étude des structures en mouvement.

La biodynamique, également appelée analyse de la démarche ou analyse du mouvement, regroupe la cinétique et la cinématique. La cinétique correspond à l'étude des forces mises en jeu pendant le mouvement. La cinématique correspond à l'étude du mouvement proprement dit, à la description des trajectoires.

Cette étude vise à montrer l'intérêt de la biomécanique canine, en développant un domaine peu exploré : l'analyse sur tapis roulant. Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique qui présente les connaissances actuelles en biodynamique canine. Le second chapitre est une étude de variation de paramètres cinétiques lors de la locomotion sur tapis roulant chez le chien. Enfin, le troisième chapitre est une application de l'analyse sur tapis roulant, à des animaux malades.

Chapitre 1

PANORAMA GENERAL DE LA BIOMECHANIQUE
CANINE ET DE L'ANALYSE DE LA DEMARCHE

L'analyse de la démarche permet de détecter des altérations du cycle de marche. Plus précisément, l'objectif principal de la biomécanique canine est de pouvoir étudier objectivement des mouvements et des cycles de marche normaux et anormaux, de pouvoir énoncer les anomalies caractéristiques, et ainsi de disposer de données quantitatives permettant les comparaisons dans le temps et entre différents animaux.

Le chien est un **quadrupède digitigrade**. Chaque cycle de marche est la succession de mouvements avec deux ou trois membres à l'appui. Différentes allures sont possibles : le pas, le trot, l'amble, le galop. Le chien, comme tous les animaux digitigrades, est amené à trotter de manière instinctive. L'espèce canine est très hétérogène, elle regroupe des individus de formats très différents, du kilogramme du Chihuahua au quintal du Mastiff. Bien souvent, un individu évoluera à l'allure caractéristique de son format.

- Les allures du chien (voir figure)

Le **pas** est une allure à trois ou quatre temps où deux, trois ou quatre appuis au sol se succèdent.

Le **trot** est une allure à deux temps, où chaque pas voit l'appui de deux membres controlatéraux. C'est une allure symétrique où chaque côté évolue en miroir de l'autre. C'est de plus, l'allure la plus couramment étudiée, du fait de sa symétrie et de la répétition d'appuis bipodaux.

L'**amble** est une allure particulière à deux temps, pour laquelle, les deux membres du même côté sont en appui au même moment. Il est habituel de parler d'amble ou de trot à l'amble. C'est une allure peu fréquente chez le chien.

Le **galop** est une allure caractérisée par un temps de suspension important. Lors du galop, il se produit la succession des antérieurs puis des postérieurs à l'appui. En général, on observe un temps de suspension après le poser des postérieurs. Chez certaines races, comme le lévrier, on observe deux temps de suspension : un après chaque appui.

Figure 1 : Déroulement du cycle de marche du chien aux différentes allures

Représentation schématique de l'animal d'après [112]



Au pas



Au trot



A l'amble



Au galop



I. Outils biomécaniques utilisables pour l'espèce canine

- Situation historique

Jadis, l'anatomie était simplement descriptive. Au fil des siècles, elle est devenue topographique avec l'avènement de la chirurgie, puis elle devint fonctionnelle, notamment avec les avancées dans le domaine de la physiologie. La biomécanique est un des volets de cette anatomie fonctionnelle.

La première analyse biomécanique a été effectuée par le physiologiste français **Marey** en 1878 [90]. Il s'agissait de décomposer le mouvement d'un homme par une technique de chronophotographie. Outre-Manche, Muybridge [50] s'intéressait à la même époque au galop du cheval par l'étude de séries de photographies.

L'invention du cinématographe, puis de la **vidéographie** a permis de perfectionner l'enregistrement des données. Cependant, l'analyse restait ardue en raison d'un grand nombre de données générées. L'apparition de l'**informatique** moderne a littéralement révolutionné la discipline en permettant l'analyse systématique des enregistrements, ainsi que le stockage et l'interprétation plus simple des millions de données fournies.

- Outil biomécanique idéal

Avant d'envisager les différents outils et les différentes études biomécaniques, il convient d'établir le cahier des charges et les qualités d'un outil biomécanique « idéal » [3]. Cet outil doit en premier lieu être **non invasif**, nécessiter le moins d'entraînement, être sans interférence avec l'animal pendant la collecte.

De plus, il doit être le plus **complet** possible, permettant d'étudier la phase d'appui et la phase de soutien, et aussi l'ensemble de la démarche simultanément au cours de foulées successives, et ce pour une locomotion à grande vitesse.

Enfin, il doit fournir des données **objectives**, précises, exactes, reproductibles, fiables, sensibles aux changements de démarche, et en nombre suffisamment important.

Des facteurs plus secondaires comme le coût économique à l'acquisition et à la manipulation, et l'intégration informatique ergonomique ne sont pas à négliger.

✓ Ainsi, les études **cinématiques** et **cinétiques** ont été les plus productives jusqu'ici : elles permettent une augmentation de la perception et de l'acuité par rapport au regard humain, tout en comportant moins de biais et en fournissant de nombreuses données.

A. Cinétique

Le plateau de force est utilisé depuis de nombreuses années, chez l'homme principalement [32, 34, 80], mais également dans le domaine vétérinaire chez le chat [69], la vache [108] et surtout le chien [6, 9, 13, 33, 76, 128] et le cheval [16, 78, 103, 111].

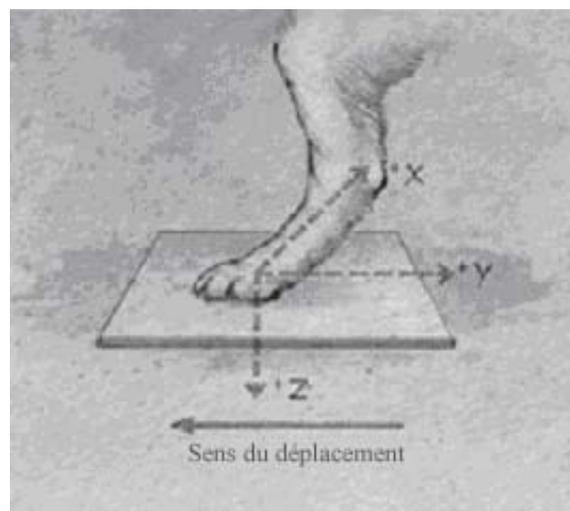
- Système de mesure

A l'aide d'une surface sensible, les **forces** à l'appui des membres (soit l'opposé de la force de réaction du sol) sont mesurées, en réalité les forces de l'ensemble « tronc et membre » par l'intermédiaire d'un membre.

Le système de mesure est constitué d'une **surface rectangulaire**, sous laquelle se situent des capteurs de force, un capteur à chaque angle. (voir figure)

Figure 2 : Postérieur gauche de chien appuyant sur un plateau de force

D'après [11]



D'une part, la surface de mesure doit être rigide, ne présenter aucun basculement lors de l'appui. D'autre part, le plateau proprement dit est recouvert d'une surface couvrante, non glissante, protectrice mais n'absorbant pas les forces. Enfin la surface de contact doit être au même niveau que l'ensemble de la plate-forme d'évolution, elle ne doit **pas pouvoir être détectée** par l'animal de manière à n'entraîner aucun changement dans sa démarche (altération ou évitement complet).

- Capteurs

Les capteurs utilisés sont des jauges de contraintes ou plus souvent actuellement des **capteurs piézo-électriques en quartz**. Le quartz a pour propriété physique de générer un influx électrique en réponse à un changement de forme. Autrement dit, le quartz produit un courant électrique proportionnel à sa déformation lorsqu'il est comprimé. Cette propriété est connue sous le nom d'effet piézo-électrique [3].

Le signal émis peut alors être amplifié et transmis à un système d'analyse : un micro-ordinateur. L'analyse consiste en fait à établir une courbe de régression linéaire entre l'influx reçu et la déformation des cristaux.

Les cristaux vont donc mesurer la force selon une direction donnée. L'association de plusieurs cristaux et une orientation précise permettent de mesurer la force appliquée dans les trois directions de l'espace.

Ce type de capteur est très sensible pour une étendue large de forces appliquées, il permet un échantillonnage à une fréquence supérieure et accepte une gamme de forces plus large. Ces capteurs sont également plus résistants, plus durables et ne nécessitent pas de recalibration régulière. En revanche, ils ont l'inconvénient de dériver régulièrement, ce qui implique une remise à zéro fréquente du signal.

✓ Le plateau de force est facile à utiliser. Rappelons qu'il est important d'être attentif à la taille du plateau, en raison des problèmes de recouvrement de différents appuis et de sensibilité des mesures à la périphérie du plateau.

B. Cinématique

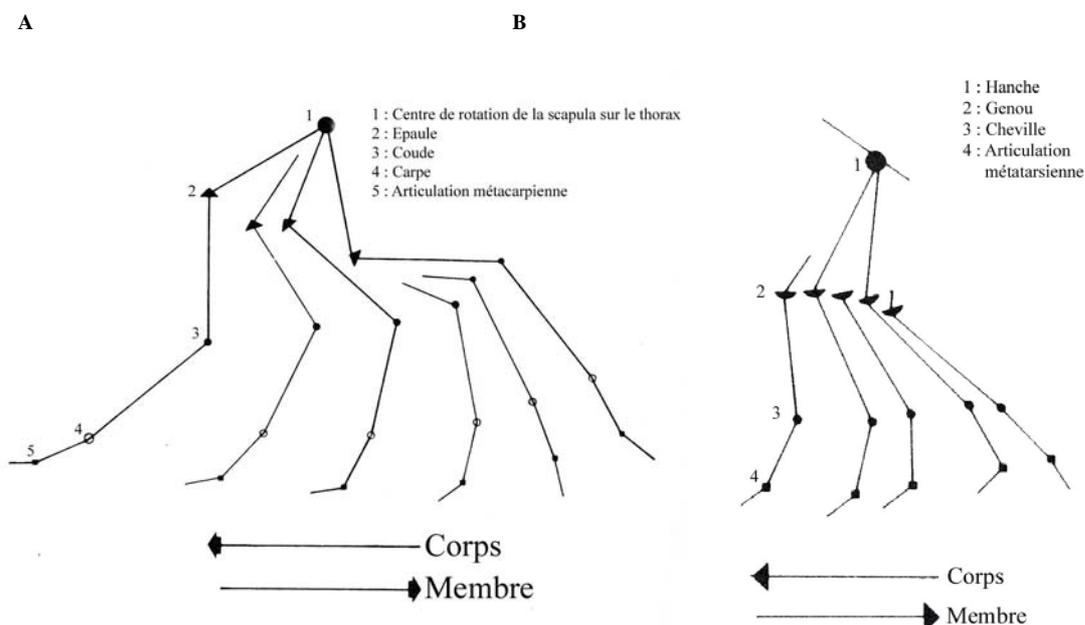
La cinématique fournit également des informations intéressantes. En effet, la cinématique s'intéresse à la description du mouvement. Le but est alors de déterminer les **trajectoires** des différents éléments anatomiques. Il s'agit alors de mesurer les déplacements de ces éléments, afin de les exprimer en terme de position, vitesse et accélération, angulaire et rectiligne. Comme précédemment, le cheval [8, 10, 20, 65, 72, 82, 84, 103, 107, 121] et le chien [1, 12, 40-42, 51, 63, 76, 126] sont les espèces les plus étudiées.

- Simplifications usuelles

Il est cependant impossible de s'intéresser au corps de manière exhaustive et de modéliser parfaitement le mouvement. Les hypothèses couramment formulées sont les suivantes [52]. Les segments corporels sont assimilés à des corps rigides indéformables : ce qui induit une géométrie invariante, et des centres de gravité en un point fixe. Les frottements et les glissements entre les surfaces articulaires sont considérés comme négligeables. Le mouvement des masses molles (muscles et peau) est négligeable et n'affecte pas les propriétés inertielles des segments corporels. Le **modèle inertiel**, bien qu'approximatif, est supposé valide quelque soit le mouvement réalisé. (voir figure)

Figure 3 : Modélisation usuelle pour un antérieur (A) et un postérieur (B)

D'après [112]



- Caméras

Le principe d'analyse est de procéder à des enregistrements à l'aide de caméras vidéo. Les fréquences d'acquisition les plus fréquemment utilisées vont de 60 à 100 Hz. Ces fréquences sont satisfaisantes pour l'étude du pas et du trot. Elles sont cependant insuffisantes pour l'étude du galop. Il est également possible d'utiliser des caméras haute fréquence mais leur coût élevé est souvent prohibitif.

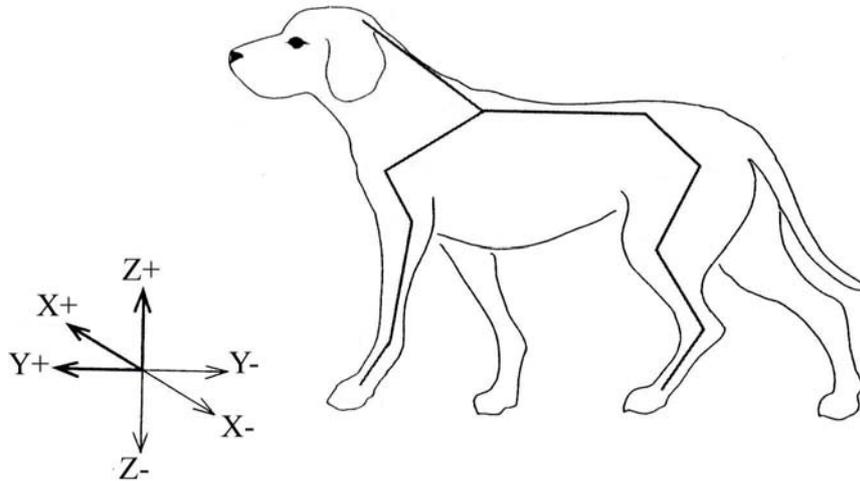
- Marqueurs

Les articulations sont repérées et les segments osseux sont considérés comme des segments rigides reliant chaque articulation. Différents types de marqueurs sont utilisés : des marqueurs réfléchissants, des marqueurs lumineux ou colorés. Le plus fréquemment, les marqueurs sont placés sur la **projection cutanée du centre articulaire**.

Les repères osseux utilisés en général sont au nombre de 11 : (1) pour les capteurs axiaux, derrière l'oreille au niveau de l'aile de l'atlas, à la pointe du col de la scapula, sur la pointe dorsale de la crête iliaque ; (2) pour le membre antérieur, au niveau de l'acromion et du tubercule majeur de l'humérus, sur l'épicondyle latéral de l'humérus, au niveau du processus styloïde ulnaire et de l'os carpal V, sur la partie latérale distale du cinquième métacarpien ; (3) pour le membre postérieur, sur le grand trochanter du fémur, au milieu de l'articulation fémoro-tibiale entre l'épicondyle latéral du fémur et la tête de la fibula, sur la malléole latérale, et sur la partie latérale distale du cinquième métatarsien. (voir figure)

Figure 4 : Modélisation d'un chien à l'aide de 11 marqueurs

D'après [55]



- Deux dimensions ou trois dimensions

Deux méthodes générales sont possibles. La méthode la plus simple consiste à étudier le mouvement en deux dimensions. Une seule caméra est alors nécessaire. Il s'agit de considérer le mouvement comme une projection dans le plan sagittal, c'est-à-dire dans le plan perpendiculaire à l'axe de prise de vue de la caméra.

Cette technique a l'avantage d'être simple, de nécessiter peu de matériel et de fournir un nombre de données moindre (les mouvements sont en effet étudiés dans un seul plan).

L'alternative est d'analyser le mouvement dans un espace en trois dimensions. le mouvement de l'animal est alors considéré dans toutes les directions de l'espace. Plusieurs caméras sont nécessaires afin de recréer virtuellement un espace en trois dimensions. En effet, il s'agit de déterminer les **coordonnées de chaque élément selon trois axes**. Pour cela, il est impératif que chaque marqueur soit perçu par au moins deux caméras. En conséquence, cette technique implique l'utilisation de deux, quatre voire dans le meilleur des cas, de six caméras.

Augmenter le nombre de prise de vues permet de déterminer la position du marqueur même dans le cas où celui-ci disparaît du champ d'une ou de deux caméras. Plusieurs caméras permettent également d'étudier un champ cinématographique plus large.

✓ Cette technique est intéressante et semble plus complète que les procédés cinétiques. Néanmoins, elle admet certains inconvénients importants : l'analyse des enregistrements est très chronophage et l'équipement est très onéreux.

C. Association des méthodes cinématique et cinétique

Dans les études les plus récentes, les deux domaines biodynamiques sont associés [10, 43, 82, 85, 107]. En effet, ces deux techniques sont tout à fait complémentaires.

La cinétique renseigne sur les **forces** générées au cours du mouvement. Elle est plus facile à utiliser, le nombre de données fournies est moindre, et elle admet moins de biais. Elle permet de déterminer précisément le début et la fin de l'**appui**. Cependant, elle ne transmet aucune information sur la phase de soutien, et considère le membre globalement. Enfin, elle ne permet d'étudier qu'un seul appui pour un plateau.

La cinématique fournit des données sur les **trajectoires**. Elle admet certaines limites importantes à prendre en compte, notamment sur le déplacement des marqueurs par rapport aux articulations. Néanmoins, elle est essentielle, puisqu'elle fournit des informations sur la phase de soutien et elle est de plus **spécifique de chaque articulation**. En outre, elle permet d'étudier autant de foulées que le permet le champ cinématographique. En général, le système enregistre un maximum de trois foulées pour un chien de format moyen.

✓ Il apparaît qu'il est extrêmement intéressant de combiner les deux techniques afin d'obtenir une analyse complète du cycle de marche d'un animal.

Deux outils sont donc majoritairement utilisés : le plateau de force et les marqueurs articulaires. Ils permettent l'étude du mouvement par des méthodes respectivement cinétique et cinématique. Ces deux méthodes sont complémentaires et peuvent être associées facilement grâce au fait que les protocoles expérimentaux sont proches.

II. Matériel et méthode classiques

Dans la grande majorité des études, le protocole expérimental de collecte des données est similaire.

A. Effectif

Les chiens sont en premier lieu **sélectionnés**. Lorsque des sujets sains sont recherchés, ils sont au moins évalués cliniquement, et leur anamnèse est contrôlée. Lors de sélection plus précise, ils subissent un examen orthopédique (par un ou plusieurs vétérinaires) des examens radiographiques (bassin et genou en général). Parfois, l'avis du propriétaire de l'animal est également pris en compte, notamment lors d'études liées au suivi d'interventions chirurgicales [29].

Le **nombre** de sujets utilisés est variable en fonction des objectifs des études, ce nombre varie de 1 [15] à 130 [99], le plus souvent, il oscille entre 15 et 20.

Les **racés** utilisés sont en premier lieu le Greyhound [42, 74, 92, 93, 99-98] du fait de son effectif important aux Etats-Unis et de sa conformation constante au sein de la race, ou moins fréquemment le Labrador [14, 51], ou encore des chiens de format moyen non racés [1, 22, 26, 55, 96, 97].

A. Matériel

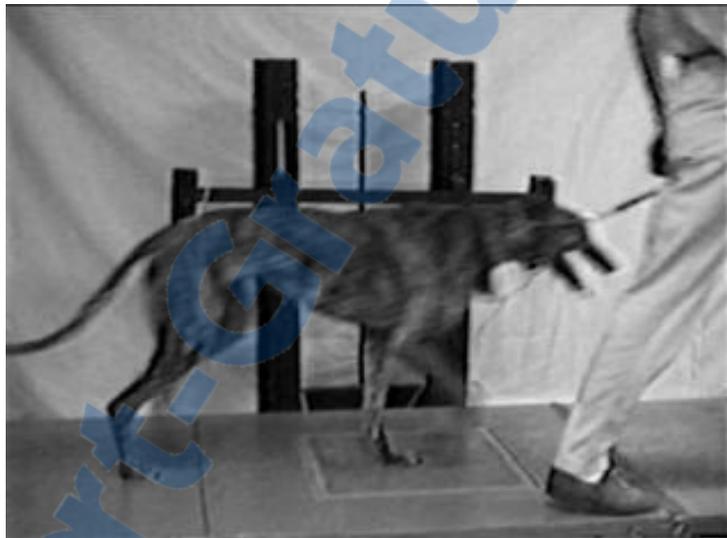
En pratique, la **plate-forme d'évolution** est de quelques mètres (7 à 15), munie d'un plateau de force non détectable. Pour la cinématique, l'ensemble du système est dans un premier temps calibré à l'aide de segments de longueur précise, un ou plusieurs segments, formant une ligne ou un solide suivant le type de repères utilisé : respectivement deux dimensions et trois dimensions. L'**environnement** est stabilisé au maximum, cela comprend la surface de la piste, les personnes présentes, le laboratoire et notamment la proximité de grandes surfaces verticales (meubles ou murs) et l'horizon de vision du chien. Quelquefois, les auteurs mentionnent le fait que l'animal est habitué aux expériences : au laboratoire, à sa tâche et au conducteur.

B. Manipulations

Le chien est mené en **laisse**, au pas ou au trot, par un ou plusieurs conducteurs. Une attention particulière est accordée au fait que le chien ne soit pas distrait, qu'il ne tire pas sur la laisse, qu'il ait une allure régulière, sans changement de direction, sans baisser ou lever de tête.

Photographie 1 : Chien marchant sur une plate-forme lors d'analyse cinétique

D'après [49]



Dans de nombreux cas, en plus du contrôle par le conducteur, un observateur ou une mesure par l'intermédiaire d'un enregistrement vidéo est ajouté.

Pour la cinétique, il convient de définir, un appui valide, comme un appui net, précisément sur le plateau, centré, dans la mesure du possible, sans recouvrement entre différents membres. Pour la cinématique, les foulées valides sont celles pour lesquelles tous les marqueurs sont visibles à chaque instant de la foulée.

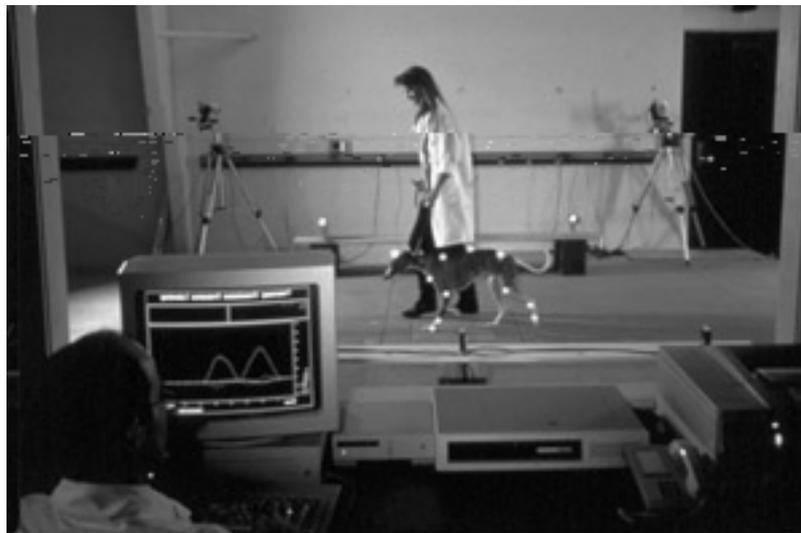
Les études portent la plupart du temps sur deux membres ipsilatéraux ou sur les quatre membres.

Pour le plateau de force, les acquisitions se font en général entre 200 et 1000 Hz, pendant une durée variable de l'ordre de la milliseconde. Généralement, la capture des données se déclenche au poser. Pour l'analyse cinématique, l'enregistrement débute dès le

départ du chien, le film est ensuite coupé pour observer uniquement la succession des foulées dans le champ cinématographique. L'enregistrement est ensuite retraité informatiquement par un procédé de digitalisation et de repérage des marqueurs, en anglais « **tracking** ». Cette digitalisation peut être manuelle ou automatique. Il est absolument nécessaire de réaliser plusieurs essais, cinq à sept en général, du fait de la variabilité importante des mesures.

Photographie 2 : Chien marchant sur une plate forme lors d'analyse cinématique

D'après [1]



C. Contrôle de la vitesse

Les lois physiques de Newton indiquent l'importance du contrôle de la vitesse. En effet, la relation fondamentale de la dynamique affirme que l'accélération γ fournie à un corps de masse m par une force F est proportionnelle à la grandeur de cette force, de même sens et de même direction, ce qui se traduit par la relation : $F=m*\gamma$. Ainsi, si un système se déplace à des vitesses variables, les mouvements et les forces générées seront différents.

Dans la plupart des cas, les expérimentateurs utilisent des **cellules photoélectriques**, deux en général. La vitesse moyenne est donc mesurée entre les deux cellules. L'espacement est en général de deux mètres, toutefois, il n'a jamais été possible de définir d'espacement idéal, celui-ci étant de plus fonction du format de l'animal et de l'allure étudiée [93].

De plus, ce système ne permet pas d'assurer une vitesse constante, la vitesse effective au poser sur le plateau, la vitesse instantanée, reste inconnue. Il faut également noter qu'en raison des variations de taille, la vitesse instantanée pourra être différente pour une même vitesse moyenne [29].

Lors d'analyse cinématique, la vitesse est en plus contrôlée à posteriori à l'aide de l'enregistrement vidéo. Ce sont les marqueurs axiaux qui sont utilisés en général. Il est alors possible de suivre plus précisément la vitesse pendant le temps de l'évolution dans le champ cinématographique.

En général, une plage de vitesse acceptable, tolérable est établie permettant d'inclure ou d'exclure les différents essais.

En outre, il faut signaler qu'il est difficile d'attester du déclenchement du chronomètre par le chien lui-même et non par la laisse ou le conducteur [92].

Plus récemment, certains auteurs se sont intéressés au contrôle de l'accélération [26] : ils effectuent leurs mesures à l'aide cette fois de trois cellules photoélectriques. Ce principe permet de rajouter une donnée, néanmoins, le nombre de mesures fourni reste très faible : seulement trois cellules sont disposées, une seule mesure d'accélération est donc obtenue.

D. Contrôle de la morphologie

Comme précédemment, les lois physiques de la dynamique démontrent qu'il est nécessaire de contrôler la morphologie. Initialement, seul le poids a été contrôlé, puis les auteurs ont de plus en plus limité les échantillons à des chiens de **conformation** et de **taille** comparables. Ainsi, généralement, des chiens de la même race sont étudiés : il serait difficile d'étudier simultanément des chiens de race plutôt digitigrade comme le Greyhound et des chiens de race plutôt plantigrade comme le pointer [97] ; dans le même sens, il existe des races de chiens dits « galopeurs » type lévriers et de chiens dits « trotteurs » type molossoïdes qui ont un cycle de marche différent en raison d'un confort plus marqué à l'une ou l'autre allure [95].

Il est aussi préférable de standardiser d'autres paramètres comme la masse musculaire, la longueur et l'angulation des membres, l'activité et la condition physique [95].

Ces protocoles ont tous pour but d'étudier le mouvement dans des conditions les plus proches du mouvement habituel du chien. Tous les contrôles nécessaires (vitesse, morphologie) doivent être effectués sans perturber la fonction locomotrice que ce soit avant ou pendant les mesures.

III. Variables utilisées

Toutes les études visent à comprendre les interactions complexes entre variables dépendantes et indépendantes qui peuvent influencer les résultats.

A. Cinétique

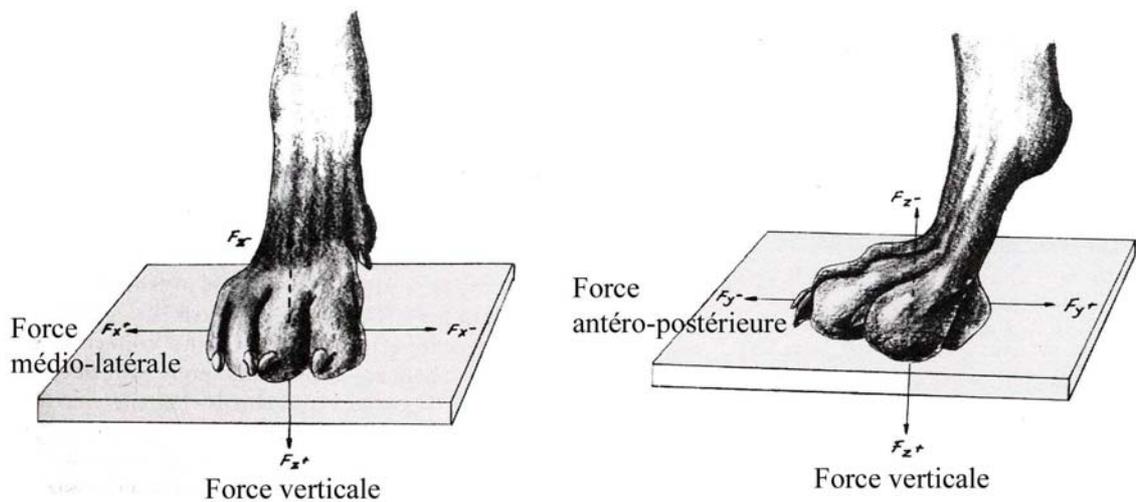
1) Variables directes

On s'intéresse aux **forces dans les trois directions** de l'espace, dans le but d'établir un graphique de la force en fonction du temps.

- Forces F_z , F_y , F_x (voir figure)

Figure 5 : Appui d'une patte et mise en évidence des trois forces générées

D'après [3]

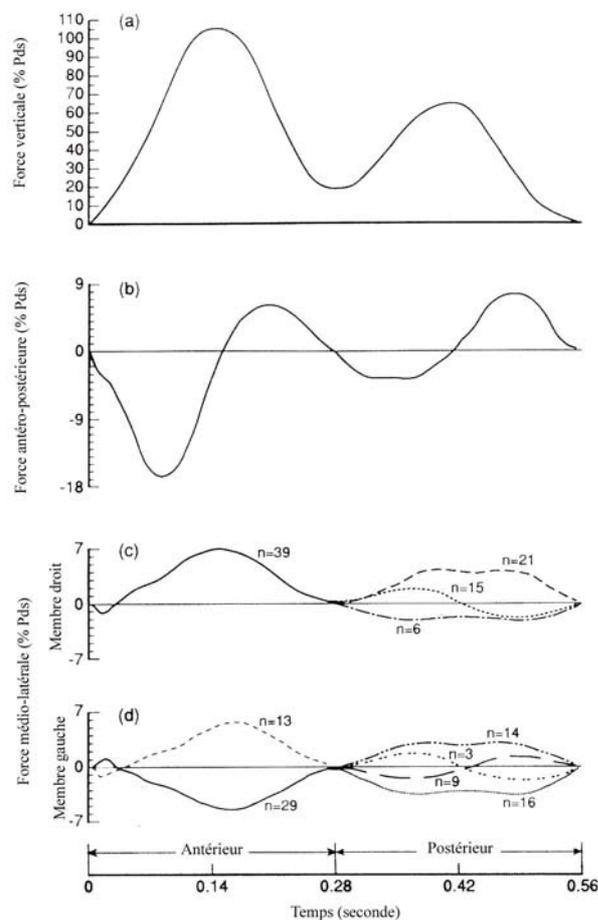


La force verticale **Fz** a jusqu'ici été la plus étudiée. La force antéro-postérieure **Fy** a fait l'objet d'études plus récentes, dans lesquelles on distingue systématiquement la force de freinage **Fyb** (braking), et la force de propulsion **Fyp** (propulsion). Pour ces deux signaux, les paramètres étudiés sont le plus souvent le maximum de la courbe : PFz ou PFyb-PFyp ; l'aire sous la courbe, en anglais « **impulse** » : IFz ou IFyb-IFyp ; et la force moyenne : MFz ou MFyb-MFyp.

La force médio-latérale **Fx**, même si elle est la plupart du temps mesurée, a fait l'objet de peu d'analyse numérique. Etant donnée sa grande variabilité, seules des données qualitatives ont pu être répertoriées. L'amplitude des forces a également une influence : il s'agit surtout de l'influence relative par rapport au « bruit de fond » induit par les vibrations artéfactuelles expérimentales. Ainsi, la force médio-latérale est très difficile à étudier et à modéliser en raison de sa faible amplitude. (voir figure)

Figure 6 : Enregistrement des trois forces lors de l'appui d'un antérieur puis d'un postérieur de chien

D'après une étude réalisée sur 43 chiens [97]



- Moment

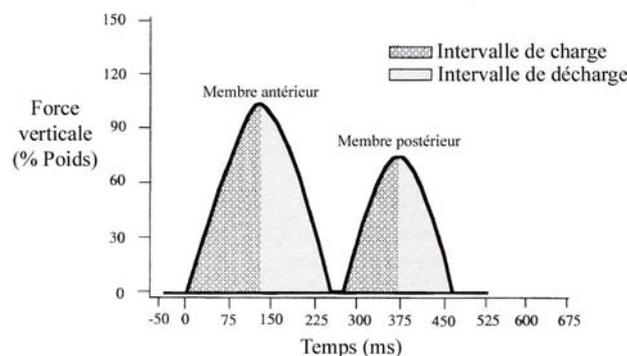
Dans de rares cas, les auteurs s'intéressent également au moment selon l'axe vertical [43, 97, 127], pour lequel on distingue un pic et une force moyenne. Cette étude n'a cependant pas été poursuivie ; très peu de références sont disponibles, les mesures et l'interprétation étant particulièrement ardues.

- Temps

Les chercheurs s'intéressent également aux données temporelles, il a ainsi été mesuré le temps total de l'appui, l'instant du pic maximal de force, et en liaison avec cet instant, les différents intervalles de charge et de décharge. (voir figure)

Figure 7 : Intervalles de charge et de décharge pour l'appui d'un antérieur et d'un postérieur de chien

D'après [28]



2) Variables indirectes

Les variables précitées correspondent à des données brutes. Il est intéressant dans de nombreux cas de retraiter ces données brutes afin de pouvoir mieux appréhender les résultats fournis.

- Pourcentage de distribution

Citons le pourcentage de distribution, qui correspond en fait au pic de force verticale d'un membre rapporté à la somme des pics des quatre membres [29]. Cette variable est intéressante afin d'évaluer la **répartition** du poids sur chacun des appuis.

- Pente de charge et de décharge

Autre exemple, nous avons l'évaluation des pentes de charge et de décharge, et le moment de pente de charge maximale et celui de décharge maximale [28]. Ces données vont indiquer l'acceptation de la charge, la **sévérité de l'impact**. La pente maximale de charge informe sur l'initiation du poser, la pente maximale de décharge sur le début du soulever. Il s'agit de données supplémentaires, plus spécifiques par rapport au pic de force ou à l'instant de ce pic. Les études déjà menées montrent que la pente de charge constitue un prodrome de boiterie clinique, elle augmente également après stabilisation chirurgicale [30]. Nous disposons alors d'une mesure indirecte du stress fonctionnel [28, 85].

- Symétrie

La symétrie peut également être évaluée à l'aide de différents index prenant en compte une ou plusieurs variables selon différents procédés mathématiques [102]. On obtient alors un indice permettant de **grader les asymétries** physiologiques ou pathologiques.

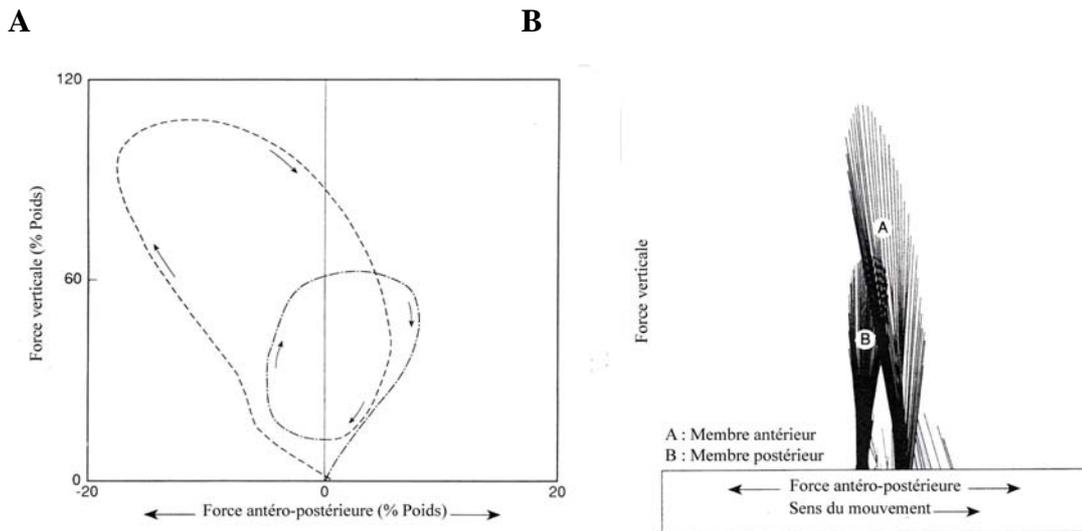
✓ D'autres données comme le pourcentage de frein et de propulsion [74], ou le centre de pression [27] ont également été étudiées, mais elles nécessitent à ce jour des investigations plus poussées avant de pouvoir réellement être intéressantes.

- Lecture des courbes

En outre, on dispose de différents modes de lecture des différentes courbes. Ainsi certains auteurs ont proposé l'établissement de diagramme en boucle, également appelé **dynamogramme** [34, 97] permettant de corréler deux forces de directions différentes et de faciliter les comparaisons. De plus, il est également possible d'établir un **profil du vecteur**

sagittal [18, 97] représentant la force totale selon les deux directions du plan sagittal en fonction du temps. (voir figure)

Figure 8 : Diagramme en boucle (A) et profil du vecteur sagittal (B)
d'après [97]



Cependant, la mesure de variables discrètes est parfois insuffisante, et la comparaison de l'allure des courbes est également informative par le fait que l'ensemble de la mesure est prise en compte [97]. Il a ainsi été décrit l'utilisation de procédés mathématiques comme les **coefficients de Fourier** [2, 105], ceci dans le but de faciliter les comparaisons. Les coefficients de Fourier visent à traduire les ondulations observées en terme d'oscillations harmoniques sinusale et cosinusale, pondérées par des coefficients. Il faut néanmoins rester vigilant sur les limites mathématiques inhérentes à ces procédés, et ainsi bien évaluer la précision des équations.

B. Cinématique

1) Variables directes

- Coordonnées de position

Il s'agit des coordonnées de position des différents segments, ainsi que des données temporelles. Ces coordonnées fournissent des informations sur les **déplacements transversaux et angulaires**. Pour les paramètres transversaux, les exemples les plus caractéristiques sont la longueur des foulées, la durée de la phase d'appui et de soutien. Les paramètres angulaires les plus couramment utilisés sont les **séries de flexion et extension** pour chacune des articulations.

- Repères utilisés

Les systèmes les plus performants fournissent des coordonnées selon un repère en trois dimensions. Cependant, les mouvements étudiés couramment sont dans le **plan sagittal** de l'animal (flexion et extension). Dans quelques études cependant [63, 88], les auteurs s'intéressent aux mouvements de translation médio-latérale soit abduction/adduction, aux mouvements de circumduction, ou aux mouvements de rotation interne et externe.

1) Variables indirectes

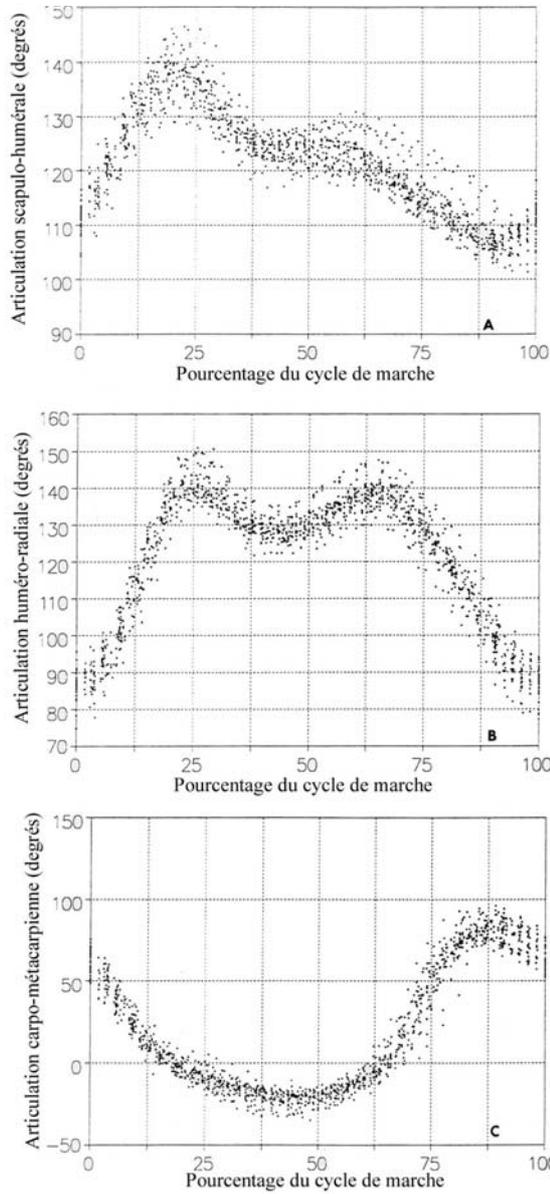
- Corrélation position/temps, mesure de trajectoire

L'établissement de variables indirectes consiste la plupart du temps à reporter les données initiales en fonction du temps. On obtient alors, pour les données transversales : la vitesse, l'accélération. Pour les données angulaires, il est habituel d'établir un diagramme de flexion/extension en fonction du temps et ce, afin d'évaluer la vitesse du déplacement angulaire. (voir figures)

Figure 9 : Courbe d'angle articulaire en fonction du temps pour les articulations du membre antérieur de chien

d'après une étude réalisée sur huit chiens [42]

A_ Données mesurées



B_ Modélisation par les coefficients de Fourier

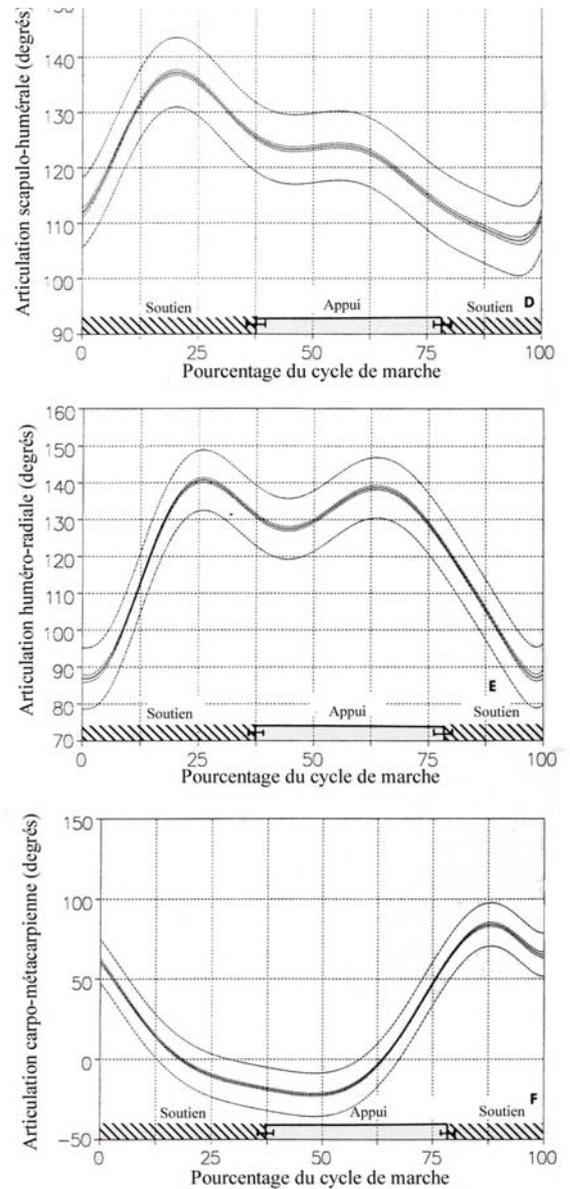
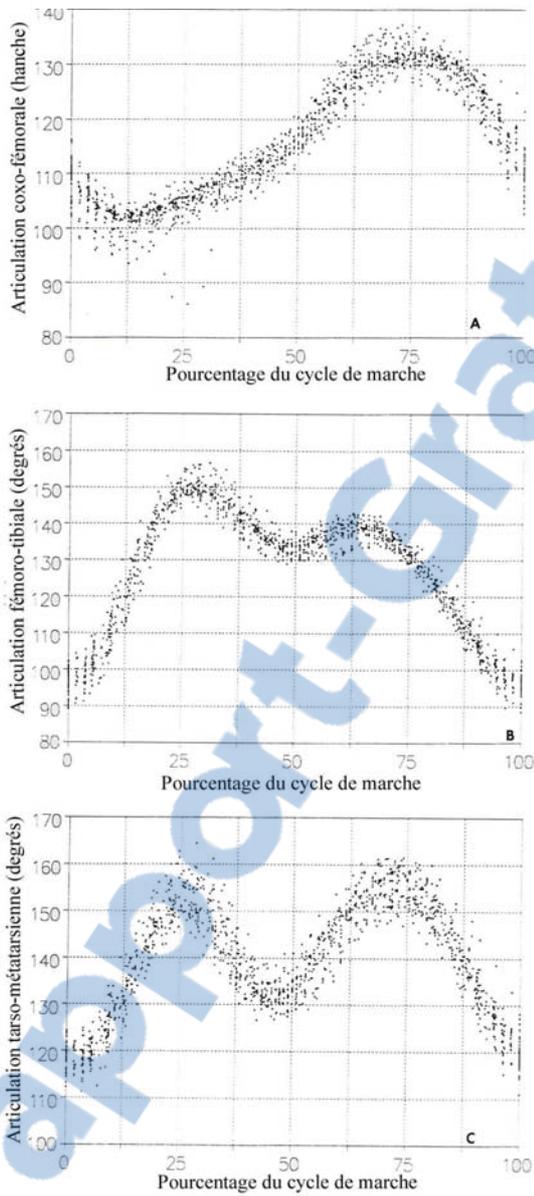


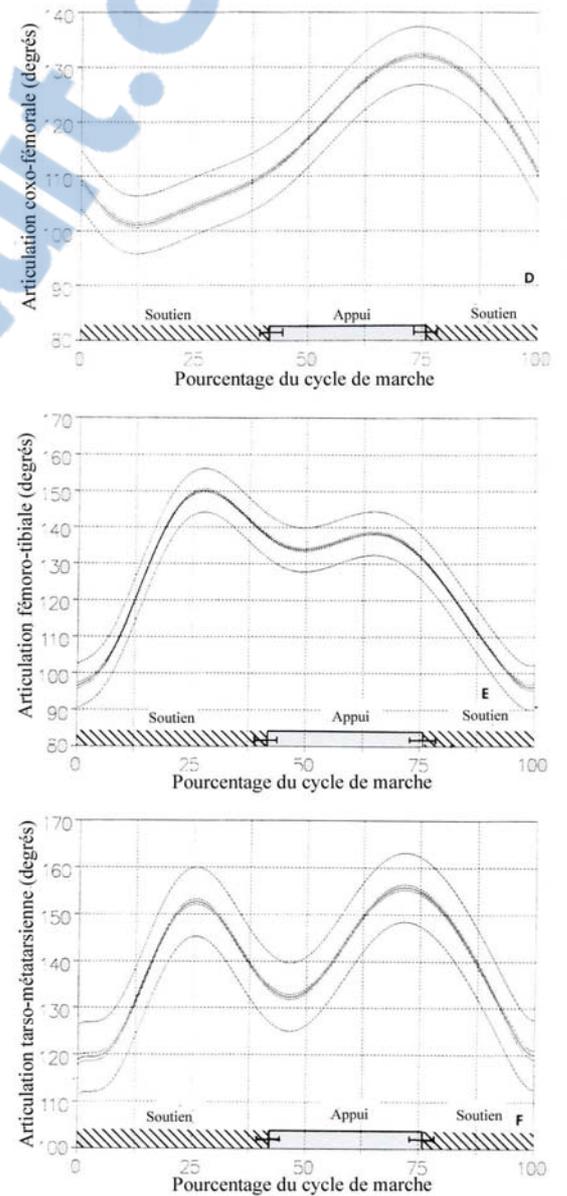
Figure 10 : Courbe d'angle articulaire en fonction du temps pour les articulations du membre postérieur de chien

d'après une étude réalisée sur huit chiens [42]

A_ Données mesurées



B_ Modélisation par les coefficients de Fourier



- Comparaison des courbes

La comparaison de ce type de courbe peut s'avérer complexe dans le but d'établir une différence quantitative ou dans le cas d'études statistiques. **L'allure des courbes** est aussi importante à prendre en compte que les valeurs particulières [42, 55]. Comme dans le cas des variables cinétiques, il est possible de faire appel à des procédés de modélisation mathématique, comme les coefficients des transformations de **Fourier** [41, 55, 101] mais aussi comme l'écriture d'une équation polynomiale [1, 42, 65]. Les **équations polynomiales** visent à représenter au mieux la courbe observée sous forme d'une fonction $y=f(x)$.

Il faut également être prudent quant à la précision des équations et les limites mathématiques inhérentes à ces modélisations. En effet, les coefficients obtenus permettent une comparaison quantitative et statistique des différents sujets, néanmoins, ils ne correspondent à aucun événement particulier de la foulée. Il n'y a pas de corrélation entre le coefficient et un mouvement précis [55].

Concernant cette modélisation, nous sommes donc face à un dilemme autant pour la cinématique que pour la cinétique. En effet, il s'agit de choisir entre une interprétation des mesures à l'aide de variables discrètes et une interprétation à l'aide d'une représentation mathématique des courbes, dont les paramètres équationnels ne peuvent plus être rapportés aux événements enregistrés.

Fréquemment, les variables discrètes servent à étudier un animal et les techniques de modélisation permettent de comparer différents enregistrements sur l'ensemble de la mesure. **L'association est fondamentale.** Les techniques de modélisation permettent d'établir l'existence d'une différence, et les valeurs particulières permettent de préciser la nature de cette différence en plusieurs points

Quelles que soient la ou les variables utilisées, l'objectif est identique. Il s'agit de pouvoir étudier précisément et de manière continue la courbe mesurée.

Une variable idéale serait précise, reproductible, décrirait exactement à chaque instant les caractéristiques des mesures et pourrait être rapportée à chaque instant à un mouvement précis. Pour remplir ces conditions, il est nécessaire d'utiliser plusieurs variables, et notamment d'associer des variables discrètes et continues.

Enfin, il est fondamental de dire qu'aucune de ces variables directes ou indirectes ne permet à elle seule d'interprétation complète du cycle de marche. On voit alors l'intérêt des associations de différentes méthodes, notamment l'association cinétique/cinématique permettant de recueillir un maximum d'informations.

IV. Objectifs

L'objectif principal est d'étudier le cycle de marche et de détecter des anomalies par des moyens techniques, alternatifs à l'observation simple. Ainsi, des sujets normaux et anormaux ont été étudiés afin de dégager des caractéristiques communes et les différentes sources de variation.

- Biomécanique et observation visuelle

Les résultats d'un plateau de force ont été comparés aux données venant d'une échelle de boiterie clinique [23, 57]. Ainsi, il a été montré que l'utilisation du plateau de force chez le chien fournissait des renseignements **plus précis** que la simple observation clinique subjective. Cependant, il est possible que l'échelle utilisée n'ait pas été adaptée. Nous pouvons donc dire que le plateau de force permet surtout d'avoir une **évaluation fonctionnelle** du membre, évaluation plus pertinente et surtout moins biaisée qu'une échelle visuelle. Cette différence de performance des deux approches est variable selon les articulations, certaines étant plus faciles à évaluer que d'autres. Le plateau de force donne donc des informations plus reproductibles.

Enfin, il n'y a pas toujours de corrélation stricte entre l'examen clinique orthopédique et l'utilisation fonctionnelle réelle. Citons le cas du genou pour lequel il arrive qu'une instabilité soit détectée sans que celle-ci ait de retentissement notable sur le déplacement de l'animal [30].

A. Etude de sujets sains

Il s'agit ici d'explorer l'analyse biomécanique en elle-même afin d'en améliorer les performances, de connaître les différents paramètres importants à contrôler et de standardiser les résultats obtenus.

1) Cinétique

Les courbes de force en fonction du temps obtenues dans les trois directions de l'espace ont des allures et des amplitudes caractéristiques. La force verticale **Fz** a été estimée comme **la plus reproductible** [19], du fait de son coefficient de variation plus faible, et de sa variabilité moindre ; elle a de plus semblé avoir une acuité et une sensibilité supérieures. Cela explique que la grande majorité des références bibliographiques concernent Fz.

- Courbes des forces en fonction du temps

Chaque force montre une **allure caractéristique** de courbe (voir figure). La force Fz est toujours dirigée vers le bas. Au pas nous reconnaissons un pic bimodal. Le premier maximum correspond au poser de la partie la plus proximale de la face palmaire, puis le second correspond à l'appui maximal. Au trot, il se produit comme un resserrement de ces deux phases et un pic unique est observé, correspondant aux phases de charge et de décharge du membre.

La force Fy montre toujours la même allure que ce soit au pas ou au trot. En effet, nous retrouvons toujours une phase de freinage correspondant au poser de la patte, jusqu'à l'appui maximum puis une phase de propulsion, qui va de l'appui maximal jusqu'au soulever.

La force Fx est très variable d'un animal à l'autre, d'une allure à l'autre et aussi d'une étude à l'autre. Le seul caractère général à toutes les mesures est la faible amplitude [92].

- Variation en fonction du membre étudié

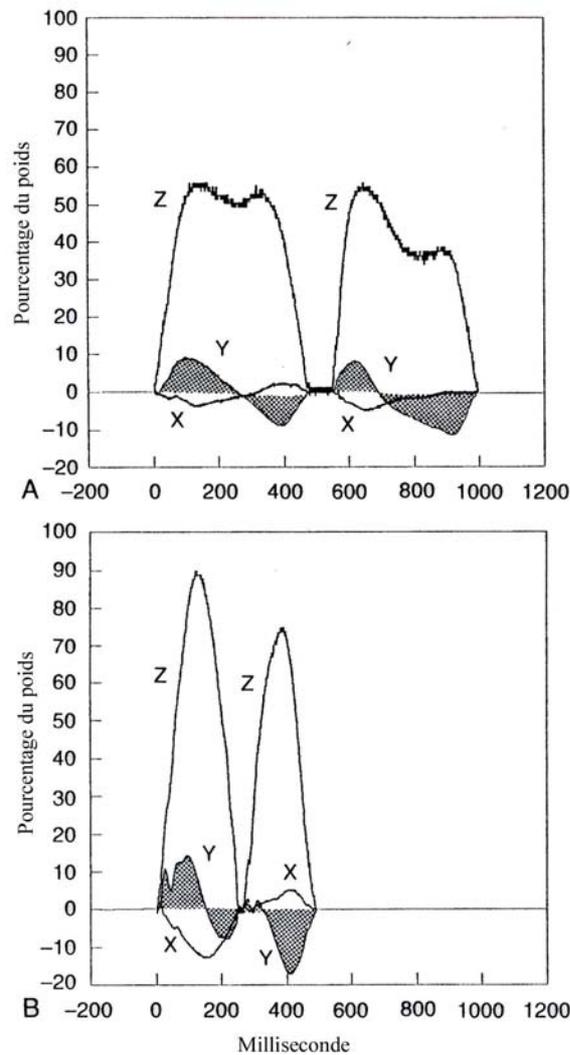
Il n'a jamais été détecté de différence significative entre les cotés gauche et droit. Cependant, il a souvent été mis en évidence une **asymétrie physiologique** considérée comme tolérable. En effet, il n'y a jamais de symétrie parfaite, la différence détectée est cependant la plupart du temps inférieure à 8% [24]. Nous pouvons également nous demander si cette asymétrie est réelle ou liée au système de mesure.

En revanche, il existe une **différence d'appui entre les antérieurs et les postérieurs** (voir figure).

Concernant la force verticale, chez le chien, le centre de gravité est déplacé vers l'avant par rapport au milieu géométrique, et ce en raison du poids de la tête. **60%** du poids est alors porté par les antérieurs contre **40%** sur les postérieurs [29]. Lors de la marche, le pic de F_z est plus précoce pour les postérieurs. Les pentes maximales de charge et de décharge sont supérieures et plus précoces pour les antérieurs [28].

Concernant la force antéro-postérieure, les durées relatives du freinage et de la propulsion ont été étudiées. Ainsi, pour les membres antérieurs, 52% du temps est consacré au freinage, 48% est consacré à la propulsion [29]. Ce rapport est relativement constant quelles que soient l'allure (pas ou trot) et la vitesse. Pour les membres postérieurs, seul 34% du temps est consacré au freinage, contre 66% à la propulsion [29]. On comprend donc que le membre antérieur est plutôt consacré à **l'amortissement et au freinage**, contrairement au membre postérieur qui permet la **propulsion**.

Figure 11 : Courbe caractéristique pour le poser d'un antérieur et d'un postérieur au pas et au trot d'après [40]



2) Cinématique

La cinématique a été largement utilisée chez le cheval [8, 10, 65, 72, 107, 121]. Les études concernant le chien sont moins nombreuses et correspondent souvent à l'étude de situations pathologiques.

- Courbes d'angle en fonction du temps

Cependant, les principales caractéristiques de la démarche ont été décrites. Il s'agit d'études portant sur des animaux de format moyen (Greyhound et croisés), au pas [55, 87] ou

au trot [1, 42, 51, 71, 88, 101]. Les résultats obtenus sont des modèles de flexion et extension en fonction du temps, **spécifiques de chaque articulation et de chaque allure**.

Les courbes obtenues sont simples et concernent les mouvements de grande amplitude (flexion/extension). Les mouvements de rotation et de translation, mouvements plus fins ne sont pas étudiés. Cependant, ces mesures permettent déjà de différencier un animal sain, d'un animal boiteux.

- Variation en fonction du membre étudié

D'après l'allure des courbes il est évident que les mouvements des membres antérieurs et postérieurs ne peuvent être comparés. Néanmoins, la symétrie entre deux membres opposés (deux antérieurs ou deux postérieurs) peut être évaluée par méthode cinématique. Les études sur ce sujet [51, 101] ont montré que le **trot** était une allure symétrique, dans le sens où chaque côté de l'animal reproduit les mouvements de l'autre « en miroir ».

La plupart du temps les deux faces du chien sont étudiés successivement. Cependant, l'intérêt principal de l'analyse cinématique est de permettre une **analyse simultanée** des deux côtés de l'animal. Une des possibilités est d'utiliser deux systèmes d'enregistrement vidéo de chaque côté. Il est également possible dans le cas d'étude du train arrière, de placer les marqueurs sur tout le train postérieur à droite et à gauche [88]. Cette dernière solution permet également d'étudier les déplacements médio-latéraux ainsi que les mouvements d'adduction/abduction en plus des déplacements dans le plan sagittal et des mouvements de flexion/extension.

Rappelons qu'une méthode ne permet pas à elle seule de comprendre la locomotion. L'association de plusieurs procédés est essentielle afin d'optimiser la connaissance des processus de marche.

Dans tous les cas, le cycle de marche est un processus complexe, et l'ensemble des évènements dynamiques n'est pas intégralement compris tant sur le plan anatomique que physiologique.

Enfin, à ce jour, il n'existe pas de données sur les paramètres standards pour chaque race de chien. Etablir une base de données pour l'ensemble de l'espèce canine correspond à un travail gigantesque. L'établissement et la quantification des variations inter- raciales permettraient de définir précisément une démarche normale.

Nous venons d'énoncer des consensus généraux. De nombreux auteurs se sont aussi intéressés aux différentes variations, significatives ou non des mesures obtenues.

B. Variation liée à la vitesse

Il faut distinguer les variations liées à la vitesse à allure constante et les variations liées au changement d'allure.

Bien souvent, il est souhaitable de travailler à vitesse constante du fait que la vitesse constitue une **variation expérimentale non nécessaire** [92].

Il a été démontré que l'évaluation de la vitesse par le conducteur ou par un observateur était insuffisante [92]. Il est donc obligatoire d'utiliser un système de mesure. Quelques études anciennes ne mentionnent pas ce système, les résultats sont donc sujets à caution.

1) Cinétique

- Vitesse

Les variations des forces en liaison avec la vitesse ont été beaucoup étudiées. Des différences significatives ont ainsi pu être notées entre les mesures dès 0.6 m/s de variation de vitesse [73, 92]. Les auteurs préconisent alors une **plage de vitesse tolérable** d'au maximum 0.3 m/s [92, 97].

- Force verticale F_z

Nous retiendrons simplement que l'augmentation de la vitesse provoque une augmentation du pic de force verticale, une diminution de l'impulse de cette même force et une diminution du temps de contact [73, 92, 93].

De même, l'augmentation de la vitesse entraîne une variation de la pente maximale de charge, en réalité une augmentation de la valeur brute, mais sans variation de la date d'apparition [28]. Pour la pente de décharge, le maximum est supérieur et au même instant pour les antérieurs, supérieur et plus précoce pour les postérieurs [28].

- Force antéro-postérieure F_y

Concernant la force antéro-postérieure, les variations sont moins prononcées. Nous avons uniquement pu relever dans la littérature quelques tendances parfois différentes selon l'allure.

Pour le membre antérieur, les rapports entre temps de freinage et temps de propulsion restent relativement constant quelles que soient la vitesse et l'allure, et l'augmentation de la vitesse conduit généralement à une diminution des temps de freinage et de propulsion [74].

Pour le membre postérieur, nous retrouvons les mêmes variations que pour les antérieurs mais seulement au pas [74]. Au trot la durée de la propulsion diminue tandis que la durée de freinage reste constante ce qui entraîne une diminution du pourcentage de temps passé à la propulsion [74].

Concernant l'amplitude des forces, certaines tendances ont pu être dégagées au trot. L'augmentation de la vitesse entraîne une augmentation du pic de freinage, ainsi qu'une augmentation de l'impulse de freinage et une diminution de l'impulse de propulsion [92].

✓ Ces différentes études ont donc supposé puis démontré l'influence de la vitesse. Nous avons mentionné précédemment la difficulté de son contrôle. Certains auteurs ont alors proposé d'utiliser la durée de contact, supposée être le reflet de la **vitesse instantanée** comme variable de contrôle [91]. Effectivement, la corrélation entre, par exemple, le pic de force verticale et le temps de contact est supérieure, comparée à celle entre ce même pic et la vitesse moyenne.

Néanmoins, aucune étude ne porte sur les éventuelles variations de la durée de contact avec des états pathologiques, des boiteries ou simplement de la fatigue, variations qu'il est logique de supposer.

- Allure

Concernant l'allure, nous noterons juste que les fluctuations de vitesse sont importantes au **pas**, qui est une allure plus irrégulière. De plus, nous remarquons que lors de la **transition pas-trot** la durée de propulsion du membre postérieur augmente [74]. La prédominance de la fonction propulsive du membre postérieur est ici confirmée.

De plus, il est acquis que le pas est une allure beaucoup plus instable, et pour laquelle on observe beaucoup plus de variations qu'au trot. Le trot est aussi une allure symétrique. Ces deux faits font que le trot est l'allure la plus fréquemment étudiée.

- Accélération

Concernant l'accélération, une étude montre des changements significatifs lors de décélération ou d'accélération [26]. On voit notamment lors de la décélération une augmentation du temps de freinage pour le membre antérieur et une augmentation du temps de contact pour le membre postérieur ; lors de l'accélération, une augmentation du pic de force verticale pour le membre postérieur. Nous retrouvons à nouveau les différentes fonctions des membres : **frein** pour les antérieurs, **propulsion** pour les postérieurs.

Cette étude montre également l'insuffisance de l'évaluation subjective de l'accélération. Bien que l'étude ait été effectuée par un observateur expérimenté, les données relevées à l'aide de la simple observation ont montré une variabilité nettement supérieure à celles sélectionnées à l'aide d'un appareillage automatique, cellules photoélectriques en l'occurrence.

2) Cinématique

- Vitesse

L'augmentation de la vitesse provoque évidemment des modifications des mouvements. Les variations ont principalement été étudiées chez le cheval. Succinctement, l'augmentation de la vitesse entraîne une augmentation de la **longueur et de la fréquence** des foulées, ainsi qu'une diminution de la durée de la foulée et une **augmentation des angulations** [35].

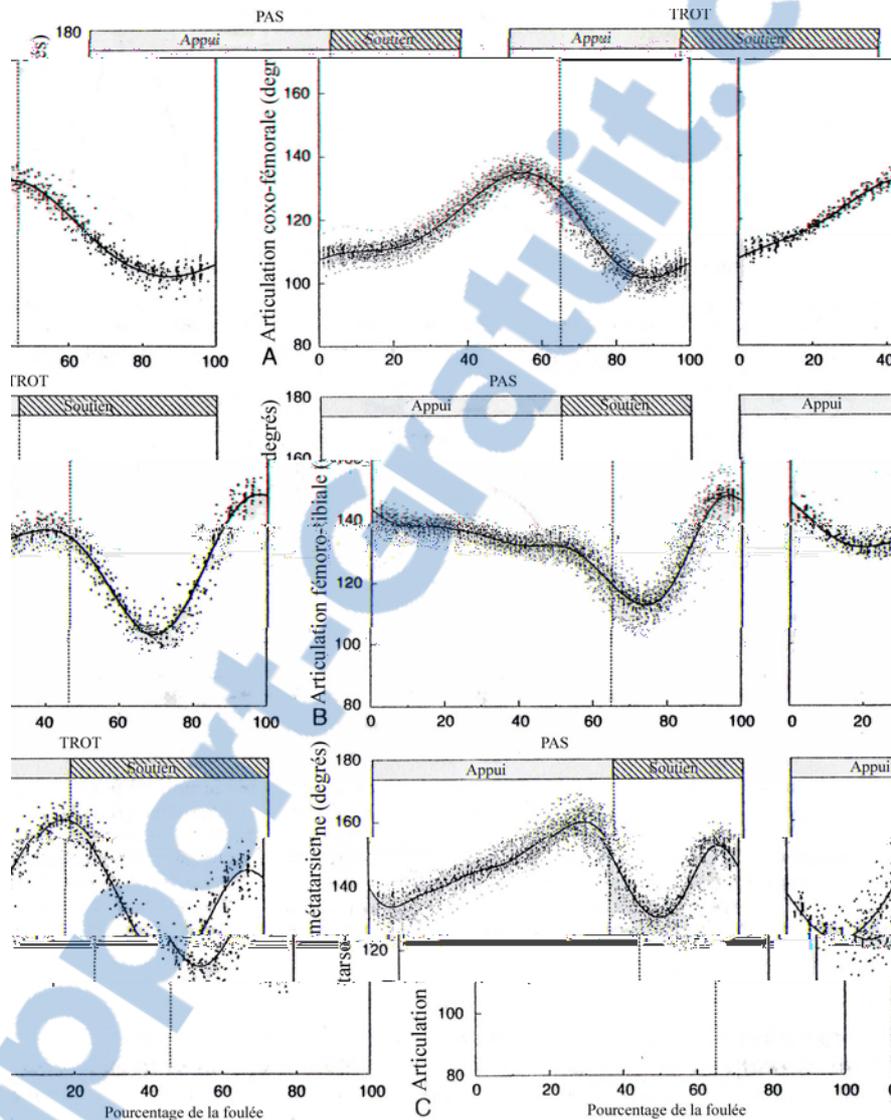
- Allure

Les variations selon l'allure ont été étudiées. Il s'agit principalement de comparer les courbes de flexion/extension au pas et au trot [40]. D'une part, cette comparaison montre que l'inflexion des différentes courbes est plus importante au pas, ce qui laisse penser que les

mouvements articulaires sont **plus complexes au pas**. D'autre part, les amplitudes articulaires sont **plus importantes au trot**. (voir figure)

Figure 12 : Courbe caractéristique au pas et au trot

d'après [40]



Enfin, il semble que la variabilité des mesures soit différente pour certaines articulations. En effet, le **carpe** a montré une variabilité supérieure au trot par rapport au pas [55]. Cependant, cette variabilité n'a pas été étudiée au cours d'une même étude, mais au cours d'une comparaison, où les deux méthodes expérimentales ne sont pas totalement identiques.

Concernant les autres paramètres, la durée de la phase d'appui est plus importante au pas, environ 2/3 de la foulée au pas, contre 1/3 seulement au trot [55].

C. Variation liée à la taille

1) Cinétique

Les variations liées à la taille et au format du chien ont été étudiées par des mesures cinétiques chez le chien [29, 77].

Il existe une **corrélation négative entre la taille et la force verticale** [29, 93] : plus le chien est grand, moins la force (normalisée par le rapport au poids) transmise par chaque membre est importante. Il n'a toutefois pas pu être définie de corrélation précise étant donné que les variations morphologiques provoquent nécessairement une variation de la vitesse instantanée du membre.

Une corrélation positive existe entre la taille et la durée du contact [29, 93] : plus le chien est grand, plus sa surface d'appui est importante et plus la durée augmente. En réalité, l'augmentation de cette durée est à relier avec la diminution du pic de force verticale, ce qui diminue la charge sur le système musculo-squelettique.

Nous mentionnerons également l'existence d'une corrélation positive entre l'impulse de force antéro-postérieure (frein ou propulsion) et la taille [29].

2) Cinématique

Ces mêmes variations liées à la taille ont été étudiées à l'aide de méthodes cinématiques chez le cheval [65]. Sommairement, il existe une corrélation **négative entre la taille et la fréquence des foulées**. De plus, pour augmenter sa vitesse, un cheval de grande taille aura tendance à augmenter la fréquence de ses foulées, alors qu'un cheval de petite taille aura tendance à augmenter la longueur de ses foulées. Nous pouvons supposer que des variations de même type sont retrouvées chez le chien. Un petit chien, dont la fréquence des foulées est initialement élevée, augmentera l'amplitude des foulées pour accélérer. Au contraire, un grand chien, dont l'amplitude des foulées est initialement élevée, augmentera la fréquence des foulées.

D. Autres variations

Une fois la taille des animaux et la vitesse fixée pour un même protocole, les autres sources de variation des mesures ont été étudiées. Ces variations ont des causes non orthopédiques.

1) Cinétique

Nous avons pu distinguer, les variations journalières, celles liées au conducteur, celles liées à la répétition des essais et celles liées aux différents individus de format comparable. Trois études majeures sont consacrées à ces variations. Elles sont effectuées au trot.

- Variation globale

La variation globale a en premier lieu été étudiée [29, 97] : l'analyse biomécanique à l'aide d'un plateau de force s'est révélée être une technique très reproductible, particulièrement pour la force verticale, au vu des faibles coefficients de variation obtenus. Ces résultats ont été obtenus chez le cheval et chez le chien.

Certains auteurs ont alors tenté d'étudier les différents facteurs responsables de ces variations globales [58]. Considérant les facteurs « **chien** », « **conducteur** » et « **répétition des essais** » une étude a été menée à l'aide de cinq chiens, cinq conducteurs et sur cinq essais par conducteur sur les variables PFz, IFz, IFy. Il en ressort que la variation liée au conducteur est minimale : de 0 à 7% de la variance totale. En revanche, les variations liées au chien (14 à 69%) et aux répétitions (29 à 85%) sont plus importantes. Nous noterons cependant que le groupe de chiens utilisé n'était pas très homogène en terme de format, même si une seule race a été prise en compte.

Les auteurs concluent donc que l'influence du conducteur est négligeable pour peu que le nombre d'essais, le nombre de chiens et leur taille soient judicieusement choisis, et que la vitesse soit contrôlée.

- Variation journalière

Une autre équipe s'est intéressé à la variation journalière [100]. 52 chiens furent utilisés, les variables PFz et IFz ont été mesurées. Les animaux effectuent sept essais, pendant trois jours consécutifs. Les auteurs distinguent les facteurs « chien », « jour » et « essai ». Cette étude a permis de distinguer une **variation significative d'un jour sur l'autre**. En effet, 60 à 77% de la variation est imputable aux variations inter-individuelles, mais 10 à 30% est liée au jour et 10 à 13% à la répétition des essais.

L'importance des variations journalières est réelle bien que tous les chiens aient été certifiés cliniquement sains (examen général, orthopédique et radiologique) pour l'inclusion dans l'étude. Ces variations seraient liées à l'environnement externe et interne, à des traumatismes mineurs non détectés, au stress, à l'horaire, au climat... Ces résultats montrent l'existence d'une variation journalière significative, et ce, en l'absence d'intervention exogène ou de modification particulière. Une telle constatation est également retrouvée chez le sujet humain [100].

Les auteurs tentent alors d'établir l'importance des échantillons et le nombre de jours et de répétitions nécessaires pour l'étude de l'influence d'actions extérieures comme un traitement médical ou chirurgical.

- Sélection et habituation

Enfin, l'impact de la sélection et de l'habituation a été documenté [99]. Ainsi sur 133 chiens étudiés tous aptes à marcher en laisse, deux groupes sont formés : le premier (n=81) comprend des chiens qui ne seront pas habitués préalablement au laboratoire et aux manipulations, le second (n=52) comprend des chiens sélectionnés pour leur style de trot constant et qui seront habitués deux semaines avant les mesures à l'environnement (groupe 2_a) et à l'évolution sur la plate-forme (groupe 2_b).

Au final, les chiens du premier groupe sont parfois réticents aux premières manipulations et il est de tout façon obligatoire de les **initier avant toute mesure**. Des différences significatives ont été remarquées entre les trois groupes (1 ; 2a ; 2b). Nous retiendrons surtout que le coefficient de variation intra-chien est plus faible pour le groupe 2.

Les auteurs concluent donc qu'une sélection et qu'un certain degré d'habituation permettent d'**augmenter la précision et la reproductibilité** des mesures. Les auteurs mentionnent également la similarité de leurs résultats avec ceux déterminés pour l'habituation à la locomotion sur tapis roulant chez le cheval [20].

✓ Cependant, il faut rester prudent sur les variations détectées en raison de l'éventuelle variation de la sensibilité et de la résistance du plateau utilisé.

2) Cinématique

- Répétabilité

La répétabilité de la méthode a été évaluée [71]. Il s'agit d'une étude effectuée sur des greyhounds, dont les caractéristiques cinématiques et cinétiques sont enregistrées trois fois à trois semaines d'intervalle, soit sur une période totale de six semaines. Chaque séance comporte cinq essais valides par chien. Il n'est pas apparu de différence entre les séances sur la période d'étude, excepté pour le paramètre longueur de foulée. L'analyse de mouvement par la biodynamique est donc **répétable sur une période d'au moins six semaines**.

- Variance au pas

On répertorie deux études au pas [55, 87]. Ces expériences ont montré une grande constance des différents paramètres, qui permettent de confirmer la fiabilité de la technique. 15 chiens de grande race ont été utilisés [55], les mesures sont effectuées du côté droit, et chaque animal a effectué cinq essais. Le calcul de variance des angulations est fait à partir des coefficients de Fourier.

Les valeurs de variance intra et inter chiens obtenues sont nettement inférieures aux coefficients étudiés. Ces valeurs faibles indiquent également la **fiabilité** de la méthode et la constance de la démarche pour des chiens de même format. Les variations observées sont conformes à celle observée chez l'homme ou chez l'animal à l'aide de capteurs invasifs.

- Variance au trot

Au trot, la variance de l'amplitude angulaire des différentes articulations a été étudiée [44]. Une étude portant sur 8 greyhounds, équipés sur le coté droit, et répétant cinq fois le même passage dans le champ cinématographique, a différencié la part de la variance attribuable à la répétition des essais et la part attribuable aux différences entre animaux.

Il en ressort que pour toutes les articulations, sauf le carpe, les variations imputables aux différences entre chiens et à la répétition des essais sont minimales. En conséquence, la cinématique est un moyen de mesure **fiable, même avec répétition des essais**, tant que les animaux sélectionnés sont similaires au départ. Cependant, pour le **carpe**, la variance est nettement supérieure. Cette articulation semble donc admettre une variation plus grande. Cependant, cette articulation est surtout plus difficile à étudier [1, 42], dans le sens où les mouvements sont plus complexes, les articulations radio-carpienne et métacarpo-phalangiennes sont très proches, et tous les facteurs de variation sont difficiles à identifier.

Le but final de toutes ces études est de déterminer les caractères importants à fixer (vitesse, taille,...) et le nombre de chiens et de répétitions nécessaires pour un protocole expérimental optimal. Il convient cependant de rester vigilant, tous les paramètres ne pouvant être strictement contrôlés. Nous pouvons ici citer l'habitude et l'expérience du conducteur qui peuvent influencer les mesures, la docilité et l'habitude du chien (en liaison avec la répétition des essais), la durée des séances.

Rappelons également qu'il est toujours difficile de certifier que le déclenchement des cellules photoélectriques est bien effectué par le chien et non par la laisse ou le conducteur.

E. Etude de cas pathologiques

L'application principale de la biodynamique en médecine vétérinaire canine est l'étude de troubles orthopédiques. Ainsi, il s'agit de tenter de disposer d'un **outil de diagnostic précoce et d'évaluation quantitative** [44].

Il est possible d'étudier l'impact d'un traitement médical et chirurgical aussi bien en terme de réussite stricte qu'en terme de rapidité d'action. Le **succès thérapeutique** peut alors être certifié dans le temps, pour plusieurs animaux. La rémission de certaines affections traitées ou non, peut aussi être évaluée, on pourra alors contrôler la reprise d'activité [36, 39, 46, 59, 86, 98].

Enfin, les sujets anormaux peuvent également être étudiés comme modèle de recherche aussi bien pour le domaine **vétérinaire**, on pourra alors comparer deux traitements [5, 23, 68, 70, 123], que pour la médecine **humaine**, l'animal étant souvent un bon modèle d'expérimentation [79, 104].

Les affections les plus étudiées sont généralement aussi les plus fréquemment rencontrées : la dysplasie de la hanche [2, 12, 19, 23, 43, 45, 67, 75, 113, 122], la rupture du ligament croisé cranial [22, 41, 47, 57, 63, 82, 83], les synovites aiguës [3, 54, 95], différentes situations arthrosiques [21, 25, 56, 96, 106, 123, 124].

1) Cinétique

Des modifications sont détectées : variations des paramètres cinétiques par rapport aux analyses précédant l'apparition de la lésion, et variations vis à vis des autres membres (redistribution de la force et du poids). Ces changements traduisent une volonté d'**éviter la charge** en temps et en amplitude. Au fur et à mesure de l'évolution que ce soit du traitement ou de la rémission, il est couramment observé une amélioration de l'appui, une amélioration de la capacité à arrêter et à initier le pas suivant [67]. Cette évolution a ainsi pu être corrélée avec une volonté d'utiliser le membre, liée à une diminution de la douleur.

2) Cinématique

Le même type d'étude a été effectué à l'aide de méthodes cinématiques. Les changements observés sont généralement liés à une **raideur du mouvement**. Cela signifie qu'on observe fréquemment une diminution de la flexion et de l'extension des articulations touchées, tant en terme de déplacement qu'en terme de vitesse et d'accélération [12, 41]. Ces variations sont probablement liées à des stimuli douloureux, engendrés par l'**instabilité** articulaire. Toutefois, ces changements peuvent être également causés uniquement par l'instabilité et le déséquilibre qu'elle induit, les changements constituant une adaptation fonctionnelle à ce déséquilibre.

✓ Dans tous les cas, l'ensemble des auteurs s'accorde à dire que l'importance des changements liés à la boiterie est toujours fonction de la sévérité et de la durée de la boiterie. Il faut également prendre en compte les éventuelles lésions des autres membres, le stoïcisme de l'animal et l'influence variable des éventuels traitements concomitants [95]. En conséquence, il est souvent plus facile d'interpréter une **évolution dans le temps** qu'une valeur brute [29, 95].

✓ Ajoutons qu'un autre consensus général porte sur le fait que le membre controlatéral ne peut être utilisé comme contrôle. Il existe toujours une **redistribution des forces** lors de boiterie, ce qui modifie les paramètres du membre sain [23, 29, 57, 67, 75, 95, 96]. Par exemple, le membre postérieur controlatéral d'un membre atteint d'une rupture du ligament croisé cranial peut supporter jusqu'à 130% de la charge habituelle [40, 57, 96]. La majorité des études sont concordantes, nous avons relevé une seule étude contradictoire [83], contestée depuis [21].

Cette dernière affirmation est non seulement valable pour les études biodynamiques, mais on peut également l'étendre aux études biochimiques, physiologiques ou histologiques, chaque fois qu'une structure influencée par la charge est concernée : cartilage, os, tendons,...[95, 96]

Ces études ont développé l'analyse biodynamique comme outil d'évaluation de la fonction locomotrice. En effet, elle a des applications dans le diagnostic : présence ou non d'une anomalie et nature de celle-ci ; dans le pronostic : évaluation de l'intensité du déficit locomoteur ; et dans le suivi : évolution de l'atteinte dans le temps. De plus, comme le mouvement est étudié dans les conditions les plus proches des conditions physiologiques, il n'est pas abusif de dire que l'analyse de la démarche par la biodynamique constitue un test fonctionnel de la fonction locomotrice.

F. Problématique en suspens

1) Cinétique

- Redistribution

Comme nous venons de le dire, la redistribution de la force et du poids lors de boiterie est clairement établie [54, 59, 95, 96]. Le chien « apprend » à redistribuer son poids pour en tirer avantage, notamment lors de boiterie chronique [95]. Cependant, les **caractéristiques exactes** restent encore à préciser : s'agit-il d'une redistribution vers le membre équivalent et controlatéral et/ou vers le membre ipsilatéral et/ou vers le membre diagonalement opposé ? Les interactions potentielles temps-force et traitement-force seront également à élucider.

De manière générale, la redistribution est fonction de la boiterie, tant dans son intensité que dans sa durée, des autres membres et de la sensibilité de l'individu.

- Boiterie et succession des foulées

Toujours dans la thématique des boiteries, l'impact d'un trouble fonctionnel n'est pas totalement élucidé. La boiterie, la douleur et l'instabilité vont certainement induire une **allure anormale, non caractéristique** [12]. La persistance d'une affection va entraîner des modifications des caractéristiques générales de la locomotion, comme la vitesse de passage au trot, la vitesse de confort, la constance des foulées, etc... La locomotion peut varier du fait de la modification de la foulée en général, mais aussi par la modification de la **régularité** des foulées. Ainsi, un animal atteint d'un trouble orthopédique pourra évoluer soit avec l'ensemble de ses cycles de marche modifiés, soit avec des foulées anormales se produisant plus ou moins fréquemment, soit simplement avec une irrégularité des foulées. Cette dualité entre la variation du cycle de marche ou de la régularité des cycles est importante à prendre en compte. Idéalement, il serait souhaitable d'étudier de nombreuses foulées successives afin de détecter la moindre anomalie.

- Corrélation entre mesure et événement réel

Enfin, le tracé des courbes laisse également quelques interrogations. Un **pic à l'impact** du membre est systématiquement retrouvé [21, 28, 97]. Ce pic est présent sur la force verticale, mais il est particulièrement visible sur la force antéro-postérieure. Il est difficilement décelable sur la force médio-latérale. Quelle est sa signification ? Son importance ? Son influence sur les mesures ?

Des études futures devraient permettre de résoudre ces différents problèmes, et ainsi améliorer la connaissance générale et appliquée de la cinétique.

2) Cinématique

- Placement des marqueurs et « tracking » informatique

Le placement des marqueurs sur les reliefs anatomiques est un élément particulièrement important. En effet, il est primordial que ce placement soit toujours effectué par la **même personne** et de préférence par un manipulateur **expérimenté** [1, 42, 55]. Malgré ces précautions, il est classique que le placement diffère légèrement d'une analyse à l'autre. Cette erreur expérimentale n'induit pas de modification de l'allure des courbes angle/temps, mais induit un léger déplacement selon l'axe des ordonnées sur le graphique [42].

C'est pourquoi il est souvent plus intéressant d'observer l'allure des différentes courbes obtenues que de simples valeurs particulières.

Quelques techniques de normalisation ont été proposées [12, 42], notamment de pondérer les valeurs obtenues en fonction des moyennes intra et inter-chien [42].

Le suivi informatique des marqueurs, autrement appelé « tracking », est variable selon les articulations en cause. Une articulation est **plus ou moins facile à étudier** suivant sa position par rapport à la caméra et suivant la distance entre deux marqueurs différents. Ainsi, la taille du chien intervient dans la facilité du « tracking » dans le sens où elle modifie la position des marqueurs par rapport à la caméra et les uns par rapport aux autres [1].

- Mouvement des masses molles

Les mouvements des masses molles sont également un artefact important [1, 12, 41, 42, 89]. Les marqueurs sont placés sur les reliefs, l'animal étant au repos. Or, l'ensemble peau-muscle décrit un **mouvement différent de l'articulation seule** en raison de caractéristiques inertielles différentes. Cela signifie que le marqueur placé sur l'articulation lorsque le chien est en appui, ne correspond plus précisément à l'articulation, lorsque le chien est en mouvement, les membres en flexion ou en extension.

A ces mouvements passifs, s'ajoutent les contractions musculaires et tendineuses et les mouvements de structures appartenant à l'articulation comme par exemple la rotule [42]. Tous ces mouvements contribuent au fait que la trajectoire du capteur ne correspond pas strictement à la trajectoire réelle de l'articulation.

Les mouvements les plus couramment étudiés sont les mouvements de flexion et extension. Ces mouvements sont amples, et par conséquent sont moins susceptibles d'être perturbés de manière importante par le « bruit de fond » induit par les mouvements des masses molles, que d'autres types de mouvements plus fins, comme les mouvements de rotation [12, 41].

Des marqueurs invasifs ont été utilisés chez l'animal de laboratoire [63]. Il s'agissait d'un système de reconnaissance spatiale, avec des capteurs sphériques en tungstène fixés directement à l'os à l'aide de plaques d'ostéosynthèse modifiées. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un système de radio-cinématique. Cette méthode a fourni des

informations précises et intéressantes, notamment sur les mouvements de translation et de rotation de faible amplitude. Cependant, la modification de la locomotion induite par le placement de ces capteurs n'a pas encore été élucidée.

Des techniques de **normalisation** des mesures ont cependant été proposées [42, 121]. Elles procèdent par modélisation et quantification du mouvement des masses molles. Le suivi du trajet des capteurs est alors modifié par une technique de correction algorithmique.

✓ Ces variations peuvent être limitées, mais elles sont dans tous les cas difficiles à éliminer. Cependant, elles ne diminuent pas l'intérêt de l'analyse cinématique pour peu qu'elles ne soient pas ignorées par l'expérimentateur [42, 55].

- Récupération

Enfin, la question de la récupération n'est pas totalement conclue. Peut-on espérer une « normalisation » de toutes les valeurs et un **retour aux conditions initiales** ? A quel moment peut-on considérer le sujet comme ayant retrouvé l'ensemble de ses aptitudes ?

En outre, l'analyse cinématique semble dans certains cas, notamment dans le cas de la rupture du ligament croisé cranial **plus sensible** que l'analyse cinétique [82]. En effet, les auteurs n'ont pas constaté de retour aux conditions initiales après réparation chirurgicale dans le cas d'analyse cinématique, alors que ce retour semblait effectif dans le cas d'analyse cinétique.

L'intérêt de la biodynamique par rapport à l'observation visuelle a donc été démontré. Les principales caractéristiques de chaque allure et les variations expérimentales ou pathologiques ont été étudiées, permettant de déterminer les différents paramètres à fixer. Il subsiste néanmoins quelques interrogations qui ne diminuent cependant pas l'intérêt de la technique.

Conclusion du premier chapitre

Ce premier chapitre a permis de décrire les deux principales techniques d'analyse de mouvement, à savoir la cinétique et la cinématique. Les protocoles expérimentaux, les paramètres mesurés, les objectifs des études ainsi que leurs limites ont été détaillées. Il est souvent souhaitable d'associer les deux techniques. Néanmoins, la difficulté principale de l'analyse biomécanique réside dans le grand nombre de données générées. Il est donc fondamental de se limiter aux paramètres discriminants lors de chaque étude.

Nous avons donc vu l'intérêt potentiel de l'analyse de mouvement dans l'étude d'affections locomotrices, tant initialement sur le plan diagnostique que pronostic, puis lors du suivi et du contrôle. Elle constitue un test fonctionnel de la fonction locomotrice. La locomotion peut être modifiée soit dans le cycle de marche lui-même, soit dans la succession des cycles. Il est nécessaire d'analyser plusieurs foulées pour étudier la fonction locomotrice.

Les études à venir devraient permettre d'améliorer encore la collecte des données, ainsi que le traitement de l'information. Ces améliorations permettront de mieux appréhender les facteurs déterminants le mouvement, comme les caractéristiques morphologiques ou neuromusculaires. Ces progrès induiront une meilleure compréhension, c'est-à-dire une perception plus précise et plus proche, du mouvement.

Chapitre 2

VARIATION DES PARAMETRES CINETIQUES
CHEZ LE CHIEN LORS DE LA LOCOMOTION
SUR TAPIS ROULANT

Nous avons vu dans le premier chapitre une revue générale de l'analyse de mouvement chez le chien. L'intérêt de la discipline est grand, les études nombreuses et variées, et des consensus importants ont été relevés : acuité de la technique, paramètres expérimentaux à fixer, modifications de la locomotion par des troubles orthopédiques.

Néanmoins, les protocoles utilisés sont tous semblables, malgré la diversité des études : l'animal évolue en laisse, sur une plate-forme. Nous proposons d'utiliser une technique novatrice : la locomotion sur tapis roulant.

Cette étude vise à étudier les paramètres cinétiques de la locomotion canine, lors d'une marche atypique pour l'animal : l'évolution sur un tapis roulant.

I. Présentation et objectifs du travail

Nous allons dans un premier temps présenter le cheminement qui a conduit à utiliser un tapis roulant pour étudier la locomotion du chien.

A. Problèmes et solutions proposées

Nous avons cité précédemment les différents obstacles pratiques, limitant la précision et la faisabilité des analyses biomécaniques dans l'espèce canine.

- Contrôle de la vitesse

Rappelons la limite liée au contrôle nécessaire de la vitesse et de l'accélération. Le système majoritairement utilisé actuellement (cellules photoélectriques) est peu satisfaisant. Il serait possible de multiplier les cellules afin d'augmenter le nombre de mesures, mais cela nécessiterait un investissement matériel et n'enlèverait pas la question du placement et de l'espacement de ces différentes cellules. Il serait en effet nécessaire d'adapter la position des cellules en fonction du format et de l'allure étudiée. Cela entraînerait une complication des manipulations tant sur le plan théorique que pratique.

Des solutions comme l'analyse vidéo et cinématique ou l'accélérométrie ont également été proposées. Ces techniques permettent en effet une mesure plus précise et plus continue de la vitesse. Cependant, cela n'ôte pas la problématique de la **constance de la vitesse** : un suivi précis de la vitesse permet simplement d'opérer une sélection plus stricte des

essais effectués. Cependant, le temps passé à la collecte des données est déjà important avec les systèmes courants actuels et les plages de vitesse couramment admises. Restreindre les critères d'inclusion des essais augmenterait encore, et probablement de manière prohibitive, ce temps passé.

Il est donc nécessaire de stabiliser la vitesse en plus du monitoring précis. Pour cela, nous pouvons proposer de travailler systématiquement avec le même conducteur, mais il existera toujours une variabilité résiduelle. De plus, étant donnée la durée des manipulations, il s'agira d'un travail conséquent pour le conducteur concerné.

✓ Pour satisfaire ces deux conditions, nous pouvons proposer d'utiliser un tapis roulant, dont le contrôle soit suffisamment précis pour permettre de connaître la vitesse et pour lequel les animaux soient suffisamment contenus et habitués pour évoluer correctement sur la machine.

- Limites des protocoles classiques

Il faut également noter les limites liées au matériel et au plateau de force en lui-même. Ainsi, dans la quasi-totalité des études citées, un plateau de force unique est utilisé. Pour obtenir des valeurs fiables pour les différentes variables, il est donc nécessaire de **répéter les passages**. Or il est évidemment impossible de reproduire à l'identique cinq ou sept fois le même passage, ce qui entraîne nécessairement une augmentation de la variabilité des mesures.

De plus, pour analyser les quatre membres, il est nécessaire de faire plusieurs mesures successives, en séparant au moins les deux côtés de l'animal, au plus, chacun des quatre membres. Il est impossible d'effectuer une **analyse simultanée** des quatre membres, ce qui permettrait une analyse plus fine de la démarche et notamment des interactions entre les différents membres à chaque appui. Cela pose un problème pour les analyses de redistribution des forces lors de boiterie par exemple ou lors d'études de symétrie.

Enfin, un seul plateau ne permet pas de prendre en compte des **appuis consécutifs**. Cela pose un problème lorsqu'on souhaite une analyse précise des allures, notamment du fait de la variabilité des foulées.

- Solutions techniques déjà envisagées

Différentes solutions ont été proposées. Chez le cheval, certaines équipes utilisent des ferrures particulières dites ferrures de force (« **force-shoe** ») [3], qui permettent d'obtenir les forces à l'appui de chacun des membres pour toutes les foulées, le système de mesure étant intégré aux membres. Chez le cheval, cet outil ne perturbe pas la locomotion de l'animal, cependant nous pouvons légitimement penser qu'un tel système est difficilement adaptable en l'état chez le chien.

Il existe une autre alternative, l'utilisation de **plusieurs plateaux** placés successivement et stratégiquement sur une plate-forme d'évolution [14, 15, 66]. Un tel outil a été mis au point, il consiste en quatre plateaux consécutifs. Néanmoins, il ne permet d'analyser que huit appuis consécutifs, représentant trois pas complets. De plus, le système est difficile à mettre en place, onéreux, les essais intégralement réussis semblent difficiles à obtenir du fait du placement des plateaux et de la variabilité du format des animaux et des allures de confort.

La solution que nous pouvons proposer est l'utilisation d'un tapis roulant qui permet le mouvement de l'animal tout en restant en un point fixe [64].

Il faut aussi noter que ce système faciliterait également une analyse cinématique simultanée. Le champ cinématographique serait alors fixe, ce qui permettrait de déterminer initialement et définitivement tous les paramètres : distance focale, éclairage nécessaire... Cela permettrait également de diminuer le matériel nécessaire, à commencer par le nombre de caméras : il ne sera alors plus nécessaire de disposer des caméras tout au long du parcours.

B. Présentation du travail

Comme nous venons de le voir, l'utilisation d'un tapis roulant dans l'analyse de la locomotion pourrait permettre de s'affranchir de certains obstacles dans la capture et l'analyse des mesures. Il convient alors de s'interroger sur la **faisabilité** d'une telle expérience de locomotion sur tapis roulant pour des quadrupèdes.

- Tapis roulant et animaux

Nous avons relevé différentes études chez le **cheval** [8, 48, 125]. Ces études portent sur différents aspects du cheval à l'exercice : étude des fonctions respiratoire et cardiaque, étude locomotrice, étude biomécanique, entraînement physique.

Néanmoins, à la connaissance de l'auteur il n'y a pas récemment d'utilisation décrite chez le chien d'un tapis roulant comme outil d'analyse biomécanique. Le tapis roulant est en général utilisé pour standardiser les entraînements et l'activité physique dans des études sur des sujets en rapport avec les fonctions musculo-tendineuses. Nous avons pu relever une seule étude [114-116] datant de 1973, réalisée sur **un seul chien**, pour lequel les électromyogrammes de 55 muscles et la locomotion ont été étudiés grâce à un film 16 mm. L'ancienneté de cette étude fait que les techniques utilisées ne sont pas aussi performantes en matière de recueil de données, de temps nécessaire et de précision des mesures.

Depuis, certaines études biomécaniques mentionnent des tentatives de faire évoluer un chien sur un tapis roulant [89]. Aucune n'a semblé réussir, les chiens ont été décrits comme craintifs, réticents aux mouvements, tentant d'éviter l'exercice par échappement latéral, ce qui au final ne permet pas d'analyse et peut de plus se révéler dangereux pour l'animal. Toutefois, les caractéristiques précises des machines utilisées ne sont jamais citées, le comportement général du chien (craintif ou curieux, obéissant ou non...) ne semble pas pris en compte.

✓ L'utilisation régulière d'un tapis roulant dans un cadre d'entraînement sportif au sein du laboratoire a montré qu'a priori un grand nombre d'animaux était capable de s'adapter à cette locomotion, adaptation nécessitant un temps plus ou moins long suivant les sujets. Nous pouvons supposer disposer d'un nombre important de sujets aptes, même s'il reste toujours

quelques animaux totalement récalcitrant, pour différentes raisons (physiques, comportementales, caractéristiques de la machine...).

- Tapis roulant pour chien

Il est donc logique de penser qu'il sera possible d'étudier la locomotion sur tapis roulant. Il s'agit à présent de définir précisément les **propriétés de la machine** à utiliser.

De manière générale, la longueur du tapis doit permettre l'évolution de chiens de format et de capacité musculaire différents (ce qui induit des foulées différentes tant dans leur amplitude que dans leur fréquence).

La **vitesse** et particulièrement sa commande doivent permettre une habitude de l'animal, elles doivent permettre des variations progressives, et la vitesse initiale doit être faible pour éviter les départs abrupts. Dans la même optique, vitesse et **longueur** sont liées afin de permettre, dans les premiers temps tout au moins, des variations de la position de l'animal, sans sortie de la zone d'évolution.

Le **revêtement** de la bande de défilement est également important : un chien évoluant en situation normale, sans protection particulière sur ses coussinets. La texture doit permettre un bon appui de chaque membre, ne pas endommager les pattes du chien (griffes, coussinets, métacarpes et métatarses), nous pensons notamment au risque d'abrasion au fur et à mesure des séances et au risque de brûlure en cas de refus temporaire du chien de marcher.

Il faut envisager également un moyen de contention efficace, pour permettre une trajectoire rectiligne, contention qui ne gênera pas le chien, ni les mesures effectuées, notamment les mesures cinématiques.

Une fois, ces questions résolues, nous disposerons donc d'un outil permettant de manipuler des chiens facilement, régulièrement et sans danger. Nous utiliserons donc ce dispositif afin d'étudier le cycle de marche du chien.

C. Nouvelles problématiques

Ce dispositif est donc innovant dans le cadre d'analyse du mouvement. Il convient de s'interroger sur les changements induits par ce nouvel instrument dans les méthodes d'analyse biodynamique.

- Interactions entre animal et tapis roulant

Cependant, nous pouvons logiquement nous poser la question suivante : la locomotion observée est-elle classique ? Est-ce qu'il existe des interactions entre l'outil d'analyse « tapis roulant » et la locomotion ?

Cette question a été longuement étudiée chez le cheval [84, 125]. Il ressort des différentes études que l'évolution sur tapis roulant est différente de la locomotion sur piste. Ainsi, il a été décrit des **modifications des paramètres cinématiques** [84] : on observe une modification des foulées, avec raccourcissement de la phase de soutien et allongement de la phase d'appui ; l'animal essayant d'augmenter sa stabilité. De plus, les auteurs ont relevé une diminution des variabilités inter- et intra-individuelles sur tapis comparé à la piste. Chez le chien, il a été mentionné que l'animal restait souvent le regard fixé vers la source de défilement de la bande et ne présentait pas les mouvements de tête habituels [115].

- Tapis roulant et analyse biomécanique

D'autre part, dans la même optique, puisque l'évolution sur tapis roulant est atypique pour l'animal, nous pouvons légitimement nous demander si cette locomotion est **constante au cours du temps (pendant l'analyse et jour après jour)** ou si nous assistons à une certaine habitude et un certain entraînement.

Cette problématique a été envisagée chez le cheval [20]. Dix chevaux identiques ont été entraînés pendant dix minutes, en réalité cinq minutes au pas, cinq minutes au trot, deux fois par jour pendant cinq jours. Les variables cinématiques ont été interprétées pour les deux premières sessions aux temps 0, 1, 2 et 5 minutes, pour les sessions suivantes aux temps 0 et 5 minutes.

Les résultats de cette étude sont particulièrement intéressants. Les premières foulées ont montré des chevaux peureux et peu assurés. Il semble que deux phases peuvent être distinguées. Premièrement, il y a une phase d'**accommodation rapide** pendant les premières minutes où le sujet recherche son équilibre et une posture idéale. Deuxièmement, une phase d'**habituat**ion est observée, pendant laquelle le cheval stabilise son cycle de marche. Il faut noter qu'au fur et à mesure des séances, la phase d'accommodation est de plus en plus brève et la phase d'habituat

✓ Au final, les auteurs cherchent à connaître le moment opportun d'une analyse biomécanique pour ce type de mouvement. Leur conclusion est que le comportement de chaque animal est différent, **certain**s s'adaptant plus vite que d'autre. D'autre part, il y a toujours une **variabilité intra-individuelle** importante, aucun animal n'ayant montré de stabilisation parfaite des données au cours des différentes sessions.

Les auteurs s'accordent cependant à penser qu'il est possible d'obtenir des données fiables si on évite la première phase d'accommodation rapide. Ils affirment aussi qu'une analyse du mouvement au trot requiert un entraînement d'au moins deux sessions.

Il faut signaler que pour cette étude, la vitesse de confort des animaux a d'abord été déterminée sur piste. Chaque cheval a ensuite évolué sur le tapis à cette vitesse prédéterminée, les différentes données étant normalisées pour permettre les comparaisons. Nous pouvons alors nous interroger sur cette notion de **vitesse de confort** : est-il nécessaire de la connaître au préalable et comment la mesurer ?

A la lumière des études réalisées chez le cheval, un tapis roulant semble donc utilisable dans le cadre d'analyse biodynamique, mais cette utilisation modifie significativement la locomotion. Il a été nécessaire d'établir les circonstances précises permettant l'étude du mouvement du cheval sur tapis, comme étant le plus proche possible du mouvement réel.

D. Objectifs

Nous venons d'énoncer les interrogations suscitées par l'utilisation d'un tapis roulant pour une analyse biomécanique. Nous pouvons penser qu'un chien pourra de toute façon marcher sur un tapis roulant, mais quelle sera cette locomotion? Comment l'animal s'adaptera-t-il? Observerons-nous une locomotion normale, quasi-normale ou totalement atypique? Cette locomotion sera-t-elle constante pendant l'analyse et plus généralement dans le temps?

- But de l'étude

Pour tenter de répondre à ces questions, il convient en premier lieu de s'intéresser à la **locomotion d'un chien normal sur tapis roulant**. Nous pourrions alors regarder son accommodation, son habitude.

L'objectif de cette étude est de déterminer la **variation de la force de réaction du sol** générée au cours de la locomotion du chien normal lorsque celle-ci est effectuée à vitesse constante et imposée sur un tapis roulant. Nous nous intéresserons alors à l'accommodation du chien, c'est-à-dire aux **variations pendant le temps de l'analyse**, à l'habitude du chien, c'est-à-dire, aux **variations au cours du temps**. Toutefois, nous n'oublierons pas de prendre en compte également la variation journalière de cette locomotion, variation déjà démontrée et évaluée dans le cadre d'une étude biomécanique « classique ».

- Animaux et mesures

Nous étudierons donc un groupe de chiens le plus **homogène** possible: même race, même format, même activité, même conditions de logement... avec un test le plus stable possible: même lieu, même outil, même vitesse.

Nous mesurerons la force de réaction du sol, à l'aide d'un tapis à capteurs de force, et nous étudierons la variance des différentes mesures pendant l'analyse et sur plusieurs jours, le tout sur un lot de chiens homogènes. Une fois la variance établie, nous dégagerons différents facteurs : intra-individuels : facteur «**jour** », facteur «**séquence** », et inter-individuel : facteur « **chien** », auquel nous attribuerons un certain pourcentage de contribution à la variation

globale. Nous saurons alors évaluer l'influence des variations inter-individuelles, et nous pourrons alors statuer sur la reproductibilité et la répétabilité du test.

II. Techniques et méthodes

A. Chiens

L'étude a porté sur **dix chiens** mâles adultes âgés de 2 à 6 ans pesant de 26 à 34 kg. Il s'agissait de Bergers Belges Malinois, chiens de travail appartenant au service de sécurité de la Mairie de Paris. Ils étaient élevés dans un même chenil, conçu selon le mode box/niche. Ils étaient sortis tous les jours et patrouillaient régulièrement dans le cadre de leur activité de sécurité.

Les chiens étaient **cliniquement sains**, ils n'ont présenté aucune anomalie de la démarche, ils ont été gradés au niveau 0 sur l'échelle de boiterie établie par Sumner-Smith [112]. Ils n'avaient **aucun antécédent** d'anomalies orthopédiques, ils ont été déclarés indemnes de dysplasie par diagnostic **radiologique**. En outre, il s'agissait de chiens de travail, étant utilisés tous les jours dans le cadre de patrouille ou d'entraînement, ils avaient donc une activité physique importante et étaient suivis régulièrement par leur conducteur et les responsables du chenil.

Ils n'avaient **aucun entraînement** à la locomotion sur tapis roulant, aucun d'entre eux n'ayant été initié précédemment, que ce soit dans le cadre d'analyse scientifique ou de simple entraînement physique.

De plus, les chiens ont été **sélectionnés** par les responsables pour leur caractère docile, obéissant et ni trop craintifs, ni trop agressifs.

B. Tapis roulant à capteurs de force

Nous avons utilisé un tapis instrumenté type Adal 3D-Course® simple bande, fourni par la société Tec-Machine. La surface utile était de **2.2 m de longueur pour 0.50 m de largeur**. Le tapis était contrôlé par un pupitre de commande qui fournissait une gamme de vitesse de 0 à 25 km/h, avec une précision de l'ordre du dixième de km/h.

Le tapis était pourvu de quatre capteurs de forces (Kistler). Il s'agissait de capteurs en **quartz**, permettant de mesurer les forces à l'appui dans les trois directions de l'espace : F_x , F_y , F_z .

Ces capteurs étaient situés à même le sol, sous l'ensemble « banc/bande de défilement ». Ils étaient espacés de 0.72 m dans la largeur et de 1.4 m dans la longueur. Le centre de la surface de mesure a été repéré sur la machine.

L'ensemble de la machine était relié à un amplificateur, lui-même relié à un ordinateur personnel compatible IBM, par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition 16bits (National Instruments Ni-Daq®). Les mesures ont été effectuées à l'aide du logiciel Adirun®.

La **calibration** du tapis instrumenté a été effectuée **sur place** à l'aide d'une masse marquée de 156 kg. Pour la force verticale (F_z), la masse a été placée précisément au centre de la surface d'analyse. Pour les forces antéro-postérieure (F_y) et médio-latérale (F_x), nous avons utilisé une tige métallique munie d'une jauge de contrainte, cette tige a été reliée d'un côté au centre du tapis, de l'autre à la masse marquée de 156 kg.

Pour chaque direction, nous avons pu établir une courbe de régression linéaire du voltage en fonction de la force.

C. Déroulement des manipulations

Avant chaque mesure, les capteurs ont été réinitialisés, et l'animal a été pesé à l'aide de la plate-forme elle-même.

Le chien a été muni d'un **harnais de contention**, et maintenu sur le tapis à une position relativement constante proche du centre de la surface d'analyse, par le conducteur placé au-dessus du plateau de force. L'animal a été stimulé, motivé à l'avant du tapis par un jouet afin de maintenir une direction de marche constante.

Dans tous les cas, nous avons attendu pour la capture des mesures que le chien ait une allure stable, allure constatée par le manipulateur et le conducteur.

L'enregistrement des mesures s'est effectué à trois vitesses différentes : 4 km/h animal au pas, puis 8 km/h animal au trot lent, puis **10 km/h animal au trot rapide**. Ces vitesses ont été déterminées en fonction du format des chiens utilisés pour pouvoir obtenir les trois allures souhaitées quel que soit le sujet étudié.

A chaque vitesse, le chien a évolué pendant une minute durant laquelle il s'est habitué au mouvement de la bande. **Aucune donnée n'a été mesurée pendant cette première minute.** Une fois l'allure stable obtenue, nous avons enregistré le signal émis par les capteurs, enregistrement effectué à **500 Hz, pendant 10 secondes.** Le signal a ensuite été filtré à 50 Hz. Nous avons procédé à l'enregistrement d'au moins **trois séquences non consécutives**, pour chacune des vitesses. Une attention particulière a été accordée au comportement du chien pendant l'enregistrement : nous avons veillé à la stabilité de l'allure, à minimiser les variations de l'environnement et particulièrement à éviter toute source de distraction. Au total, l'analyse complète a duré au maximum de 10 à 15 minutes.

Ce même protocole d'analyse a été répété pour un même chien trois jours de suite, soit neuf enregistrements par chien et par vitesse.

D. Données utilisées

L'animal a évolué sur **un seul plateau** de force pendant toute l'analyse. Nous avons donc étudié la force de réaction du sol pour l'ensemble du corps.

Pour cette étude, nous nous sommes limités à l'étude du trot, allure plus simple à étudier, du fait de la succession d'appuis bipodaux. Les données stockées au pas nécessiteront une analyse plus poussée.

La force de réaction du sol a été mesurée dans les trois directions de l'espace, nous avons donc obtenu les forces verticale (F_z), antéro-postérieure (F_y), et médio-latérale (F_x). Ces forces ont été normalisées en rapportant leurs valeurs au poids du sujet. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement à F_z : au pic **PF_z** (rapporté au poids : % Pds) et à l'impulse **IF_z** (%Pds·s), à la durée de la foulée **Str** (ms), à la date de survenue du pic **Tz** (rapporté à la durée de la foulée %Str), au temps de contact **Tc** (%Str), et au temps de vol **Tv** (%Str) (voir figure). Les forces antéro-postérieure et médiolatérale, bien qu'elles aient été mesurées, n'ont pas fait l'objet d'une étude numérique.

E. Analyse des données

Chaque variable a été interprétée à l'aide de **statistiques descriptives** classiques (moyenne, écart-type, coefficient de variation, intervalle de confiance à 5%) pour chaque chien, chaque jour et à chaque séquence.

De plus, afin de répondre à la question posée sur la variation des paramètres cinétiques, les moyennes pour chaque séquence ont été interprétées par un test d'analyse de variance, pour lequel nous avons distingué trois facteurs :

le facteur « **séquence** » à 3 niveaux

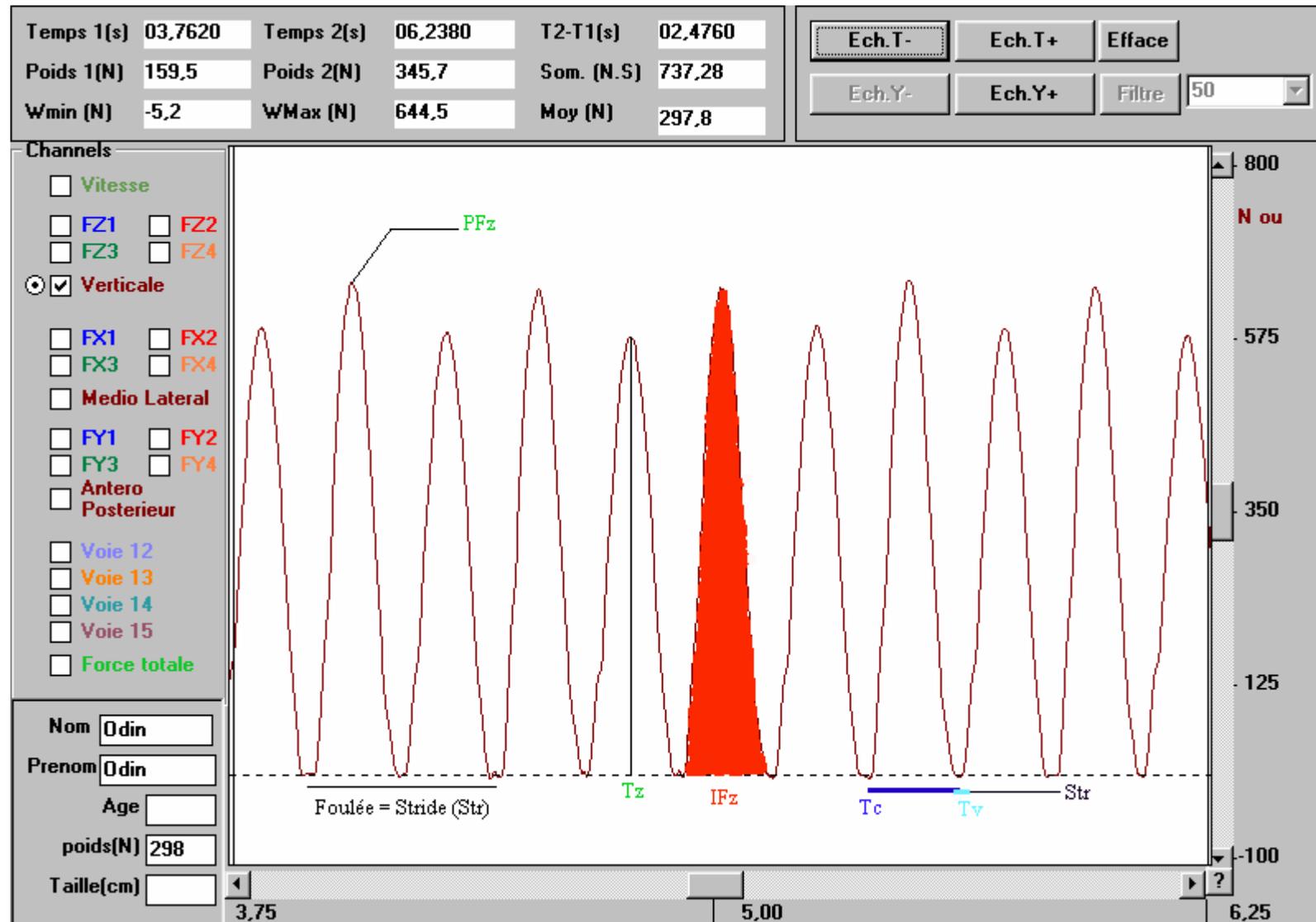
le facteur « **jour** » à 3 niveaux

le facteur « **chien** » à 10 niveaux

Ce test a permis d'étudier la variation totale des variables et la contribution des différents facteurs à cette variation.

Nous avons comparé ensuite les différentes moyennes obtenues à l'aide du test de Student-Newman-Keuls.

Figure 13 : Représentation des variables utilisées pour l'analyse numérique



III. Résultats et analyse statistique

Parmi tous les chiens présentés, **aucun n'a refusé** l'exercice et seuls trois se sont montrés récalcitrants et ont manifesté des signes d'angoisse au début des manipulations.

- Qualité du tapis roulant utilisé

La longueur du tapis et le revêtement ont été tout à fait satisfaisants. Ils ont permis l'évolution du chien dans un espace suffisamment long et stable.

La plage de vitesse a, elle aussi, été correctement étendue. La vitesse initiale suffisamment basse (1,5 km/h) et particulièrement la **montée progressive** jusqu'à cette première vitesse stabilisée ont permis un départ « en douceur », et ont évité un stress initial chez l'animal. De plus, dans tous les cas, il convient d'être particulièrement attentif au comportement du chien, notamment en relation avec la vitesse : limiter le temps passé à des allures inconfortables, échelonner l'augmentation de la vitesse en fonction du format de l'animal et favoriser les transitions progressives.

- Comportement du chien

Initialement, deux vitesses de trot ont été choisies pour l'analyse: 8 km/h et 10 km/h. Cependant, à 8 km/h, trois chiens sur les dix étudiés ont présenté un **trot dit à l'amble, atypique** chez cette race, difficilement analysable et interprétable. Cette allure particulière a disparu à des vitesses plus élevées et n'a pas été observée à 10 km/h.

La contention de l'animal s'est avérée facile. L'animal étant stimulé pour un déplacement vers l'avant, le conducteur a effectué un simple maintien du chien, l'animal pouvant parfois même être totalement lâché sur le tapis. Dans tous les cas, il n'a jamais été relevé de variations flagrantes dans les mesures liées à la contention de l'animal.

A. Analyse qualitative

Pour tous les chiens et à chaque séquence d'analyse, nous avons eu la même allure de courbe pour chacune des directions de la force mesurée.

- Force verticale F_z

Pour la force verticale (voir figure), nous avons observé une succession de courbes d'allure **parabolique** avec un maximum correspondant à chaque appui bipodal : « Antérieur droit-Postérieur gauche » ou « Antérieur gauche-Postérieur droit ». Nous avons eu un passage par zéro correspondant à une brève phase de **vol**. Chaque parabole a donc correspondu à un pas.

- Force médio-latérale F_x

Concernant la force médio-latérale (voir figure), nous avons observé des sinusoides de fréquence environ deux fois moindre que la force verticale, avec un maximum ou un minimum simultané au pic de la force verticale, et un passage par zéro au moment de la phase de vol. Nous avons donc une **série de couples de paraboles de F_z avec successivement F_x positif puis F_x négatif**.

Une analyse vidéo en temps réel a permis de voir que la force F_x positive a correspondu aux foulées « Antérieur droit-Postérieur gauche » et que la force F_x négative a correspondu aux foulées « Antérieur gauche-Postérieur droit ». De plus, nous avons remarqué que, lorsque la force F_x a été positive, le signal émis par le capteur situé à l'avant droit a été supérieur à celui émis par le capteur situé à l'avant gauche. Lorsque la force F_x a été négative, les rapports de force entre capteurs ont été inversés (voir figure). Concernant les capteurs situés à l'arrière, nous avons noté le même type de variation mais la différence entre les forces mesurées était très faible (voir figure).

Figure 14 : Evolution de la force verticale Fz au cours d'une capture de 10 secondes

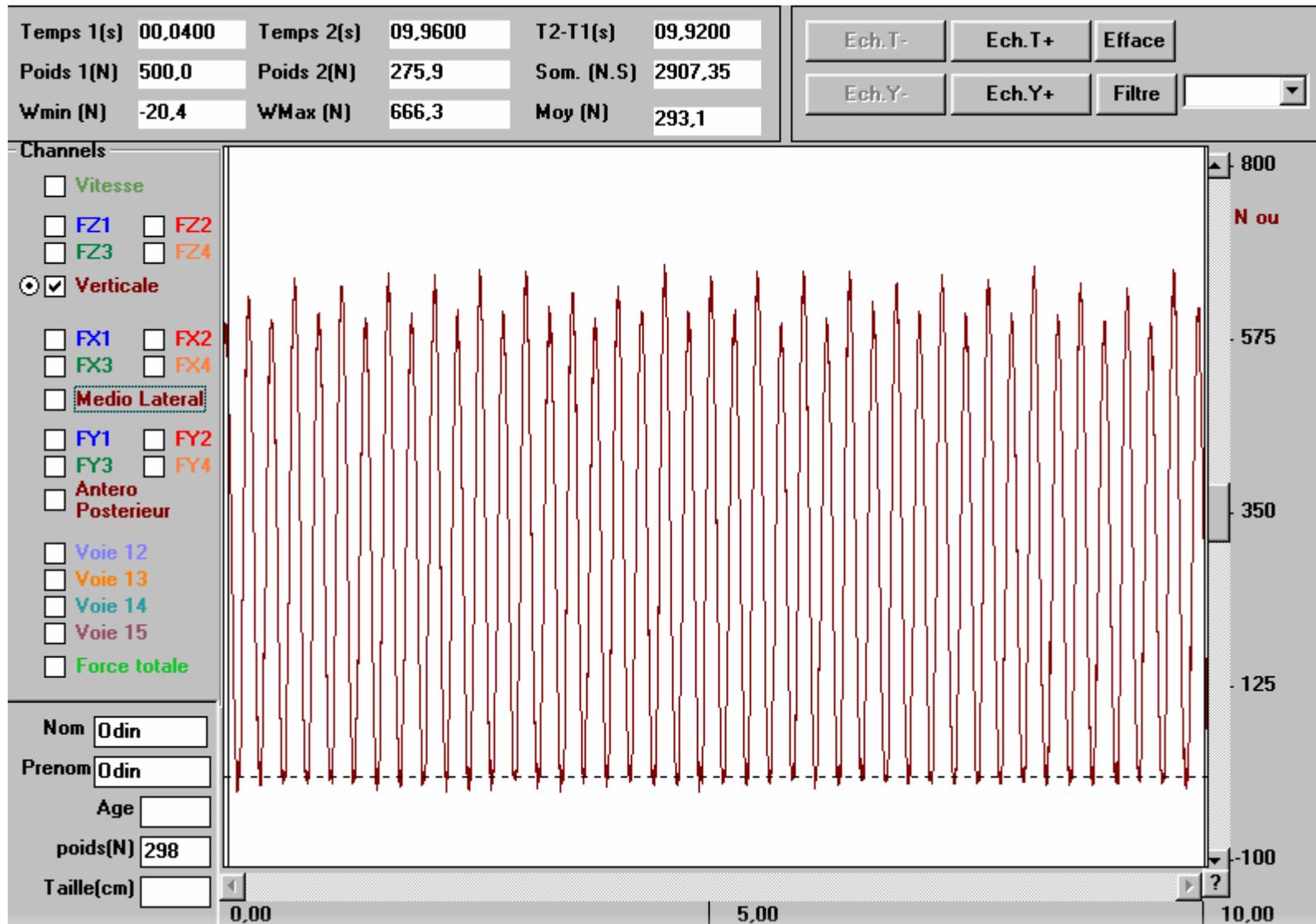


Figure 15 : Evolution de la force verticale Fz et de la force médio-latérale Fx

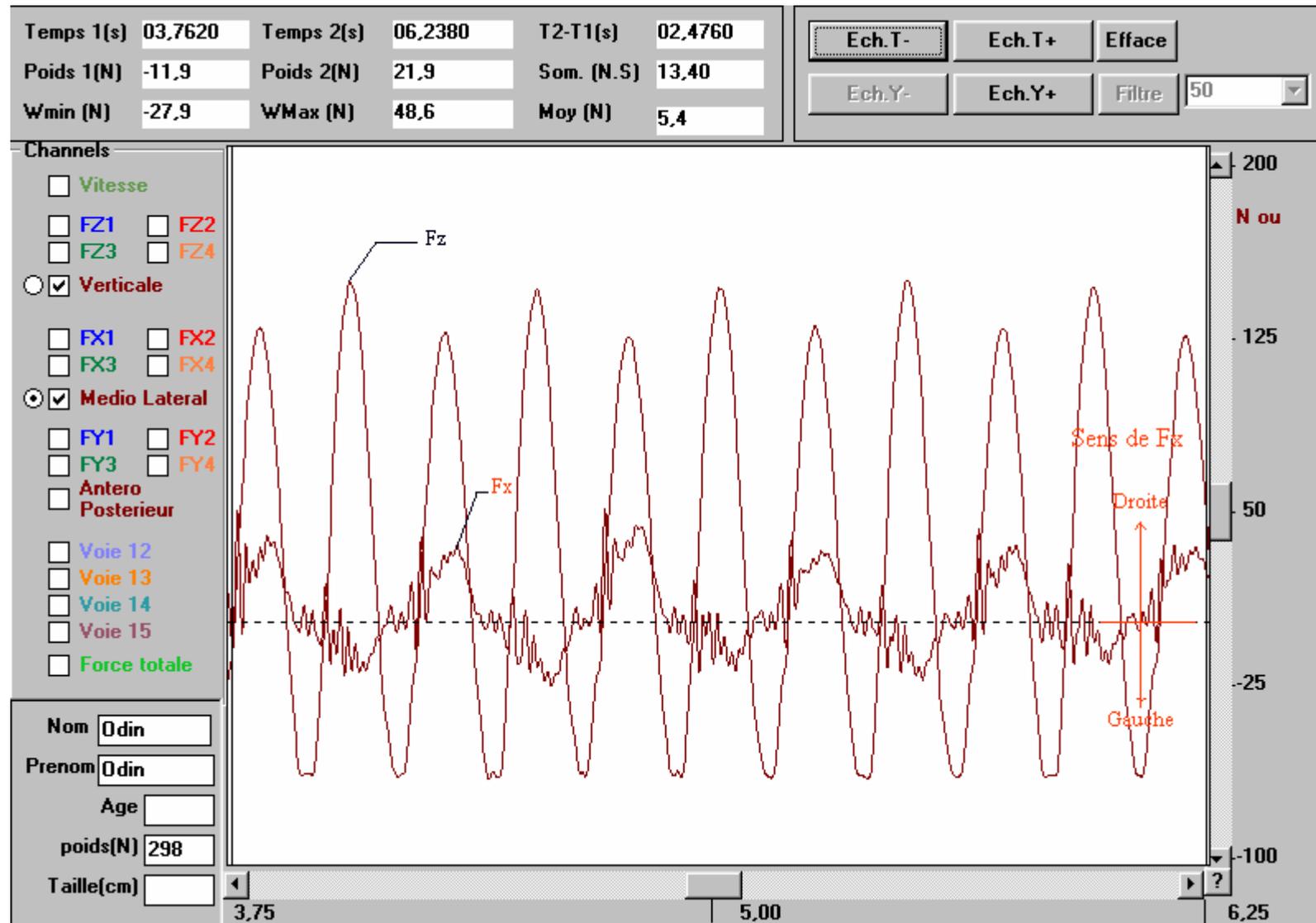


Figure 16 : Comparaison de la force médio-latérale F_x et de la force verticale F_z mesurée par les capteurs à l'avant du tapis

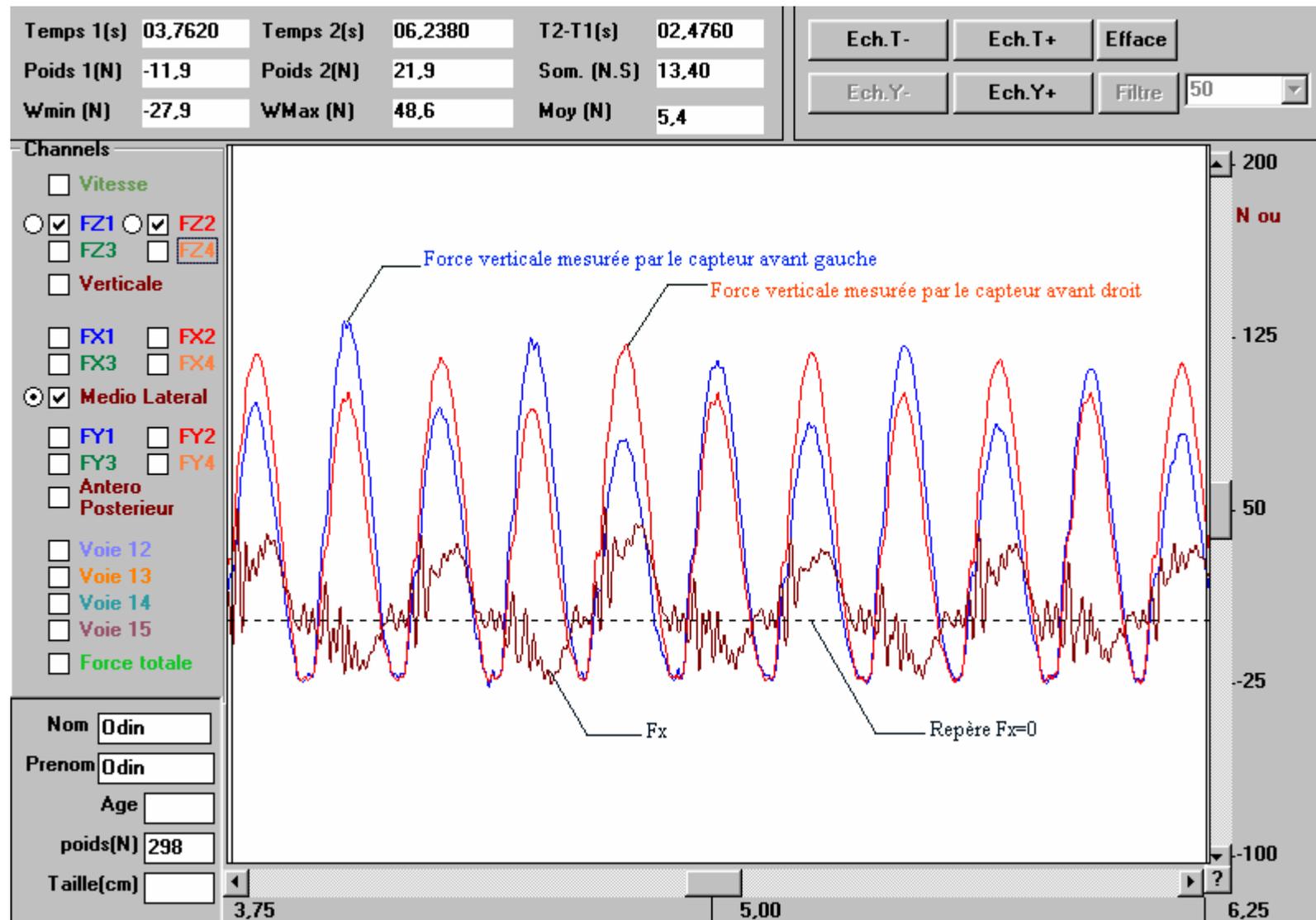
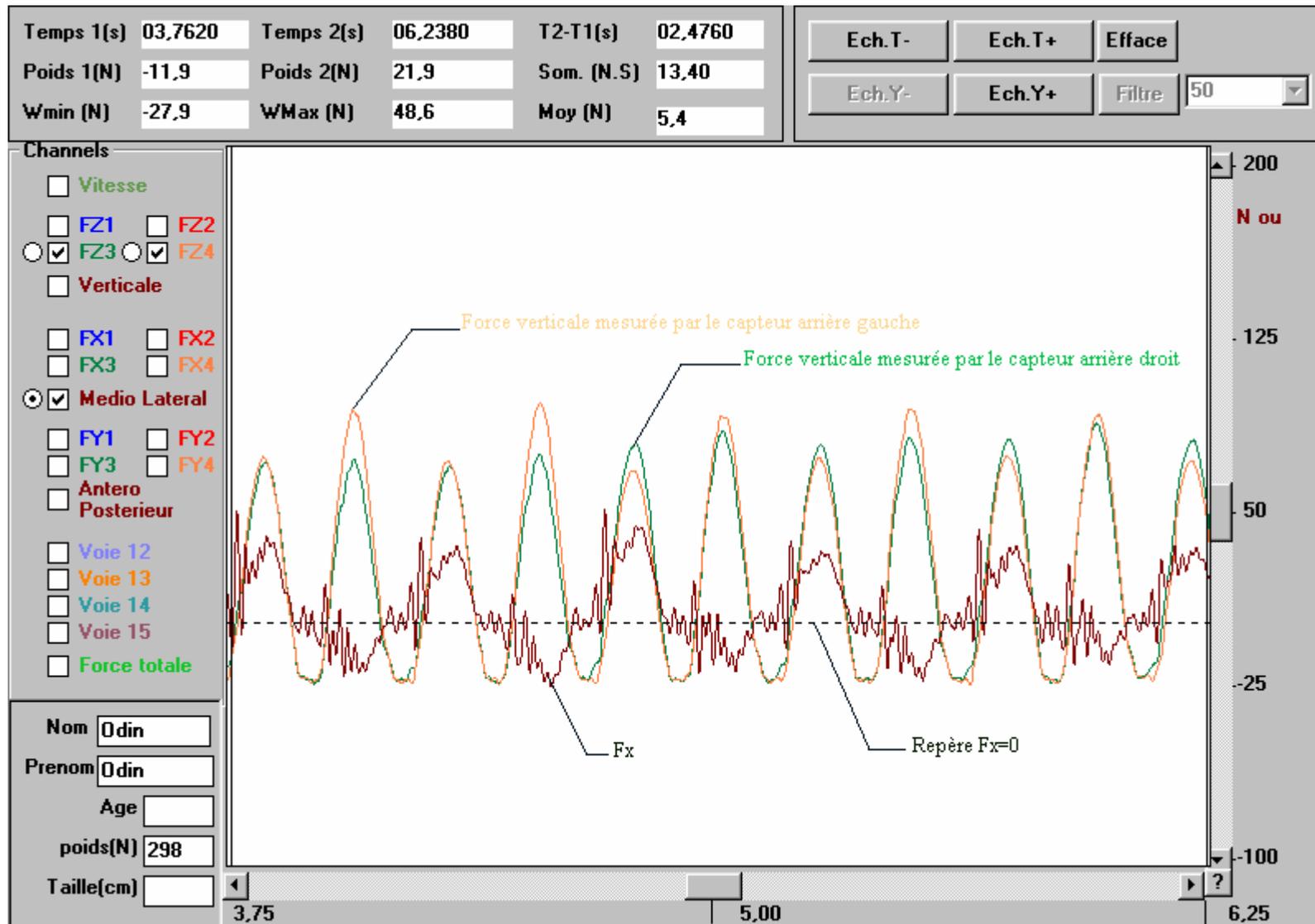


Figure 17 : Comparaison de la force médio-latérale F_x et de la force verticale F_z mesurée par les capteurs à l'arrière du tapis



- Force antéro-postérieure F_y

Pour la force antéro-postérieure (voir figure), nous avons eu également une succession de sinusoides, de fréquence identique à celle de la force verticale. Pour chaque période de la force verticale, nous avons eu une phase positive, puis un passage par zéro synchrone par rapport au pic de force verticale, et enfin une phase négative. Nous avons donc eu une phase de **freinage** maximum au poser, puis une phase de **propulsion** maximale. Le passage par zéro de la force antéro-postérieure a correspondu au moment de l'appui bipodal maximum.

Nous avons également retrouvé un **net pic** à l'impact (voir figure), conformément à la bibliographie. Ce pic n'ayant toujours pas été clairement explicité, il a perturbé l'analyse de F_y . Ici, son amplitude importante a rendu l'étude de la force antéro-postérieure F_y difficile.

En s'intéressant aux **amplitudes** de ces différentes courbes, nous avons remarqué que dans tous les cas, la force verticale a eu l'amplitude maximale, puis la force antéro-postérieure et enfin la force médio-latérale. D'ailleurs, pour cette dernière, l'amplitude a été particulièrement faible.

Figure 18 : Evolution de la force verticale Fz et de la force antéro-postérieure Fy

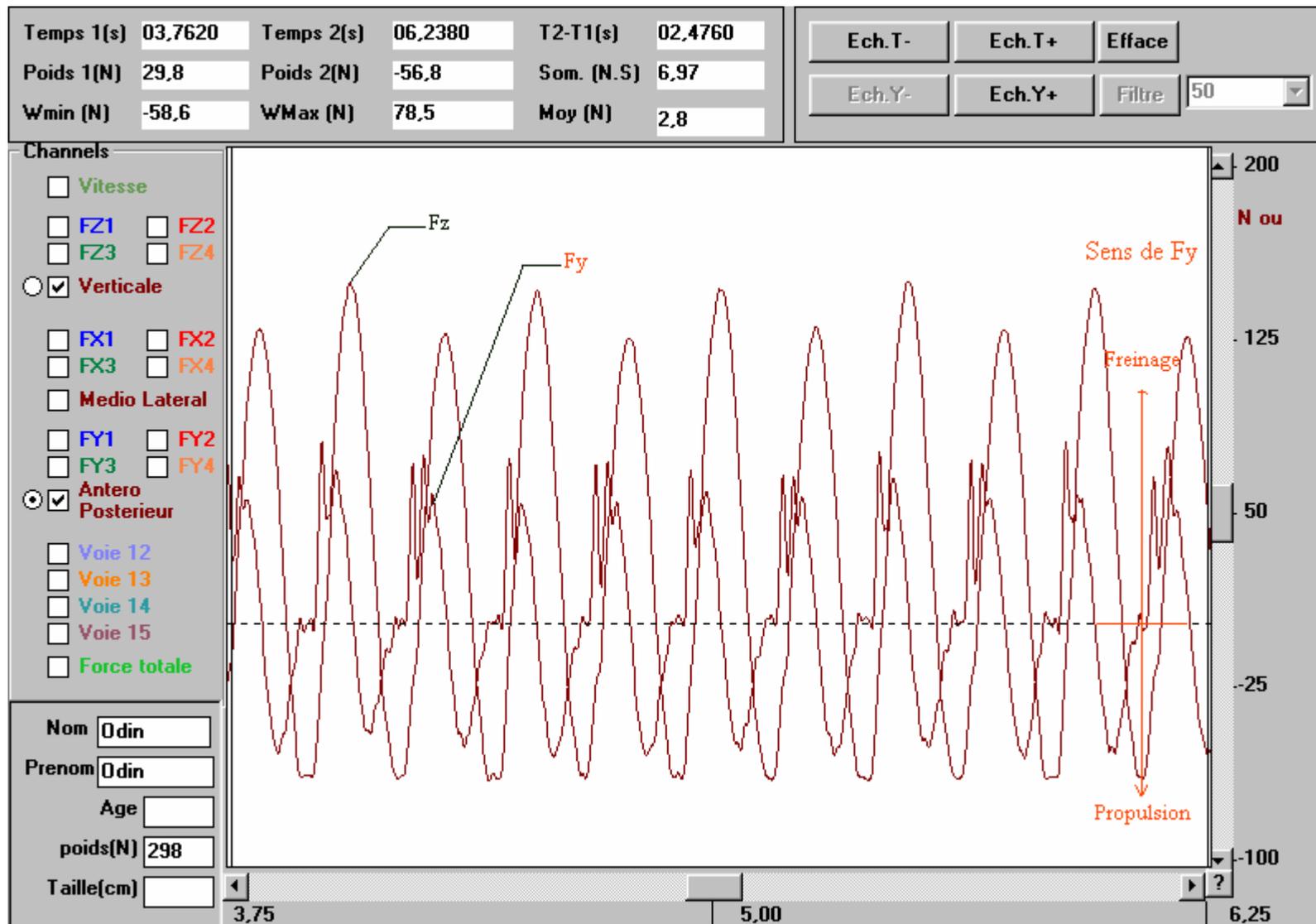
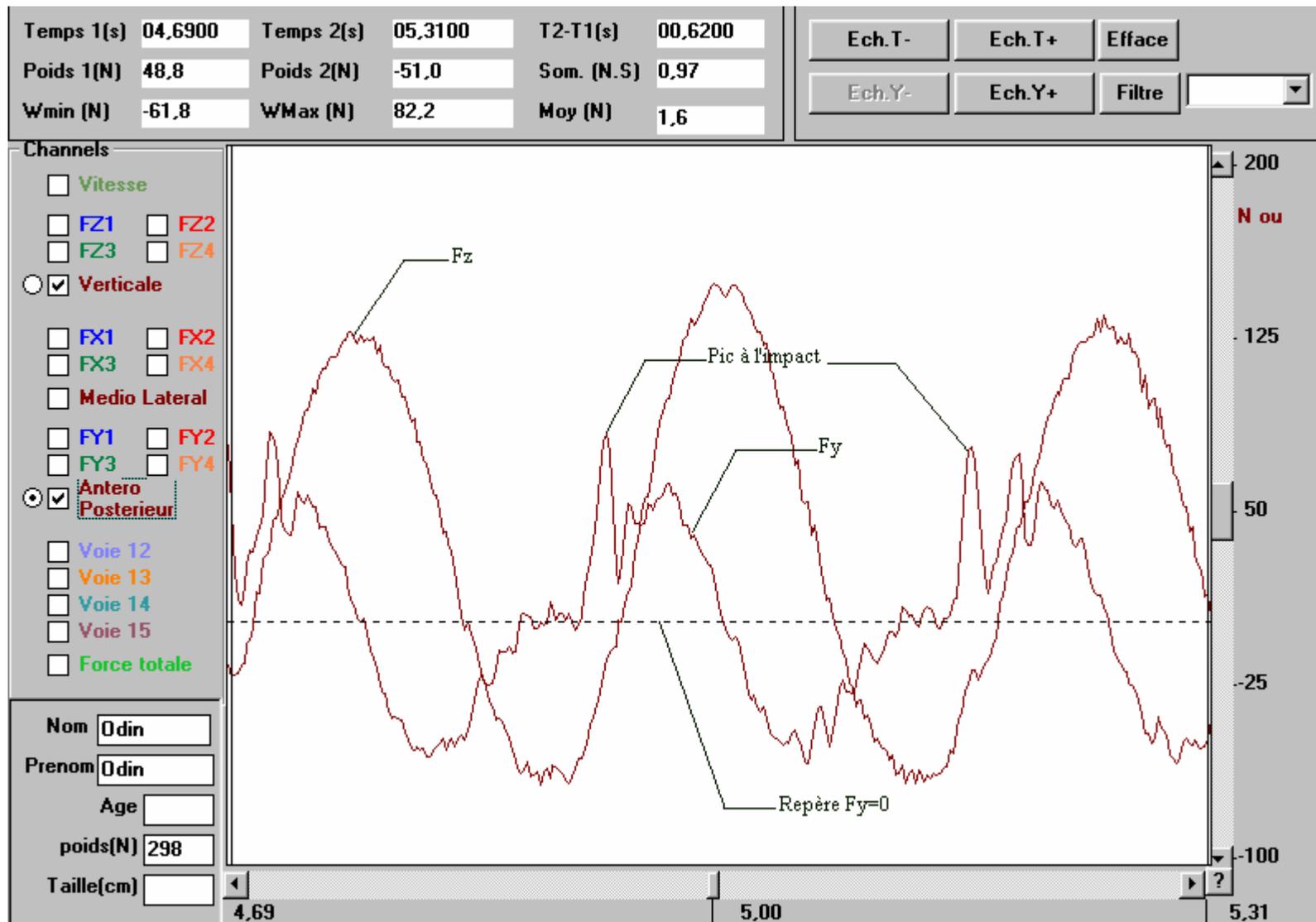


Figure 19 : Evolution de Fy, mise en évidence d'un pic à l'impact (données non filtrées)



B. Analyse quantitative et statistique

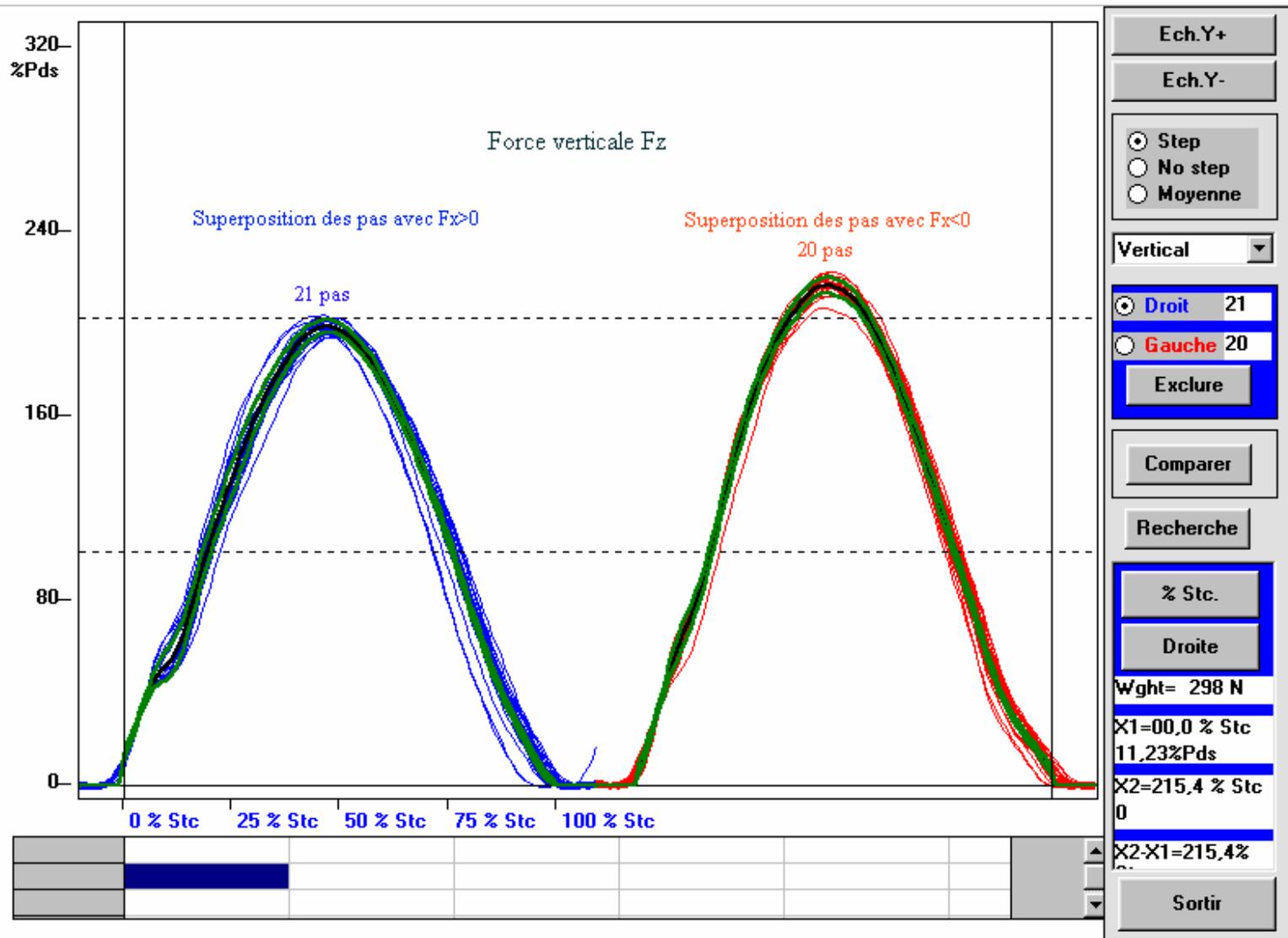
Le logiciel Adirun a fourni pour chaque tracé une interface d'analyse automatique (voir figure). Nous avons alors obtenu une superposition pour les appuis où la force médio-latérale a été positive et séparément pour ceux où cette même force a été négative, soit respectivement pour les pas « Antérieur droit-Postérieur gauche » et « Antérieur gauche-Postérieur droit ».

Chaque enregistrement a comporté entre 19 et 23 pas, suivant le format et le confort de l'animal. Pour chacune des deux courbes, nous nous intéressons aux valeurs moyennes et à l'écart-type calculé sur l'ensemble des pas superposés. Nous avons vu d'emblée que concernant la force verticale, l'écart-type a été maximal au pic. Nous avons éliminé les foulées atypiques de chaque enregistrement, nous avons donc obtenu un écart-type pour le pic de Fz de moins de 6,0 N. Pour chacune des séquences, nous avons calculé les variables de statistiques descriptives classiques. Nous avons alors pu estimer une séquence moyenne pour **un seul chien** (voir tableau)

Tableau I : Tableau de statistiques descriptives pour un animal

Variable	Tz	Str	Tc	Tv	PFz	IFz
Moyenne	19,98	474,14	42,51	7,47	190,50	22,29
Ecart-type σ	0,69	7,66	0,67	0,78	4,00	0,53
Coefficient de variation intra-chien	3,46 %	1,61 %	1,57 %	11,77 %	2,13 %	2,37 %
Intervalle de confiance à 5% maximal	$\pm 2,50$	$\pm 9,00$	$\pm 3,50$	$\pm 5,00$	$\pm 2,00$	$\pm 1,80$

Figure 20 : Interface d'analyse, superposition des différents pas



Nous pouvons refaire le même calcul, mais cette fois sur l'ensemble des séquences et pour **tous les animaux**. Nous avons alors obtenu le tableau suivant.

Tableau II : Tableau de statistiques descriptives pour l'ensemble des sujets

Variable	Tz	Str	Tc	Tv	PF
----------	----	-----	----	----	----

nous n'avons **pas retrouvé de différence significative entre le second et le troisième jour**, pour aucune des variables étudiées.

La contribution de la variance par chien à la variation globale est apparue significative et largement prédominante dans tous les cas. Nous pouvons alors mesurer la variance attribuable au chien et la variance résiduelle attribuable aux répétitions. Nous pouvons alors calculer un rapport dit coefficient intra-classe qui évalue l'intérêt de la mesure. S'il est proche de 100%, le test discrimine bien les chiens. Nous avons obtenu le tableau suivant.

Tableau III : Contribution du facteur "Chien" dans la variation totale

Variable	Tz	Str	Tc	Tv	PFz	IFz
Chien	2,0271	362,01	3,2896	3,2682	136,40	0,5425
Résiduelle	0,6007	49,960	0,7693	1,2518	78,190	0,9370
Coefficient intra-classe	77 %	88 %	81 %	72 %	64 %	37 %

Nous avons également noté qu'il était possible de distinguer des **groupes de chiens** significativement différents pour chaque variable. Chaque chien a été différent de tous les autres pour au moins une variable.

IV. Discussion

A. Discussion du protocole expérimental

- Tapis roulant et vitesse constante

Nous avons dit qu'un des intérêts du tapis roulant était d'analyser le mouvement à vitesse constante. Or, nous pouvons dire que cette vitesse est uniquement **théoriquement constante** : lors des manipulations, le chien aura nécessairement des mouvements dans la direction du défilement de la bande qui se traduiront par une modification de la vitesse et de l'accélération.

Néanmoins, si nous limitons ces mouvements par un système de contention adapté et si nous suivons les conseils énoncés dans la littérature, notamment respecter la phase d'accommodation rapide, nous pouvons espérer n'observer que des mouvements de faible amplitude qui ne perturberont pas les mesures. Ce fut le cas dans notre étude.

- Tapis roulant et vitesse imposée

En outre, la vitesse de défilement de la bande correspond en réalité à une **vitesse imposée** pour le chien. En temps normal, lors d'analyse de mouvement, le chien est tenu en laisse et laissé libre d'évoluer à sa vitesse de confort, dans la limite d'une allure définie (pas, trot, galop) et d'une plage de vitesses prédéterminée. Ici, l'animal a été contraint de suivre le défilement de la bande et d'avancer à une vitesse qui a pu ne pas lui être familière. Cette question pose le problème de la variabilité des mesures : comment l'animal va-t-il s'adapter à l'allure demandée si celle-ci est atypique ? Le chien va-t-il manifester des foulées toutes instables, reflétant son manque d'aisance et d'habitude ?

D'autre part, cette problématique est également à relier avec le **format** du chien, même au sein d'une même race : nous pouvons supposer qu'un chien plus grand s'adaptera plus facilement à une vitesse élevée qu'un chien plus petit, l'inverse étant aussi probablement vrai. Le cycle de marche sera donc plus variable à vitesse imposée qu'à vitesse choisie, et cette variabilité dépendra également du format de l'animal par rapport à la vitesse.

- Conséquences

Nous pouvons alors nous interroger sur la **vitesse sélectionnée** pour l'analyse : cette vitesse doit permettre à tous les chiens, quelle que soit leur conformation d'évoluer le mieux possible, soit de la manière la plus constante possible. Lors des manipulations, un nombre conséquent d'animaux a évolué à une allure atypique pour la race.

Enfin, il faut également signaler l'importance de cette notion de vitesse imposée pour les études à venir, études de **cas pathologiques** par exemple. Pour un même chien, l'allure de confort sera sûrement modifiée par l'existence d'une boiterie et l'efficacité de son traitement médical ou chirurgical. L'animal montrera alors des changements plus ou moins flagrants dans la constance de sa locomotion.

Nous pouvons donc conclure sur cette problématique de la vitesse que des analyses à vitesse constante permettent d'éviter la variabilité liée à la vitesse mais conséquemment apparaît une nouvelle source de variabilité : l'aisance de l'animal (fonction de la vitesse elle-même et des interactions « vitesse-conformation » et « vitesse-intégrité de la fonction locomotrice »). Néanmoins, il faut rappeler que l'ensemble des études menées jusqu'ici ont mentionné ce problème et que l'ensemble des auteurs s'accorde à dire qu'il est souhaitable de réduire au maximum les variations de la vitesse et les plages de vitesse acceptées, et ce quel que soit le but de l'étude : étude de la locomotion normale ou anormale.

B. Discussion de l'analyse qualitative.

- Allure des courbes

Tout d'abord, nous avons remarqué d'emblée que **l'allure des courbes** a été tout à fait conforme à celles précédemment décrites dans la littérature. Nous avons exactement retrouvé les mêmes phases et le même synchronisme pour les trois forces. Nous avons donc pu comparer les valeurs particulières relevées.

- Particularités de la force médio-latérale F_x mesurée

Nous avons également noté une grande **stabilité de l'allure de la courbe de F_x** . Cette force a été jusqu'ici très peu étudiée, mais en reprenant les quelques références disponibles, nous avons remarqué que les différents auteurs ont souvent retrouvé une grande variabilité de cette force entre les séances et les animaux, non seulement dans son amplitude, mais aussi dans son sens. Nous avons retrouvé ici les fluctuations d'amplitude. Mais le sens est resté constant pour chaque pas tout au long des séances sur tous les animaux.

Les variations répertoriées dans la littérature peuvent être imputées à la répétition des mesures et à l'analyse distincte et non successive de chacun des membres. Ici, le protocole utilisé, permettant d'analyser chaque pas dans son ensemble a montré une grande constance des oscillations de cette force, même si l'amplitude varie.

De plus, nous avons supposé que les pas pour lesquels F_x a été positive ont correspondu aux pas « Antérieur droit-Postérieur gauche », et ceux où elle a été négative aux pas « Antérieur gauche-Postérieur droit ». L'analyse vidéo et la comparaison des mesures capteurs par capteurs ont apporté un début de confirmation. Cette supposition n'est pas en désaccord avec les quelques références connues [97]. En effet, la plupart du temps, la force est dirigée vers le côté ipsilatéral au membre posé et l'amplitude de F_x est supérieure pour l'antérieur. Cela explique que le différentiel entre les capteurs droits et gauches soit différent pour les capteurs avants et arrières : la mesure de la force médio-latérale F_x par les capteurs arrières a été influencée de manière non négligeable par les antérieurs ; a contrario, la mesure de la force médio-latérale par les capteurs avants a été peu influencée par le poser des postérieurs. Conformément à la bibliographie, le **membre antérieur a semblé « imposer »** le sens de F_x .

- Particularités de la F_y mesurée

Concernant F_y , nous avons noté l'importance du **pic à l'impact** de F_y . Ce pic a déjà été répertorié [28, 29, 97], et son explication reste floue. Ici, son amplitude importante a laissé supposer qu'il a pu perturber la mesure de la force de freinage suivante et de la force de propulsion précédente.

C. Discussion de l'analyse numérique de F_z

- Limites de l'analyse

La force verticale a été beaucoup décrite jusqu'ici. Néanmoins, la vitesse utilisée ici, du fait du trot atypique à 8 km/h, a été plus élevée que celles classiquement utilisées ; nous disposons donc de peu de références. De plus, nous avons ici considéré deux appuis concomitants, ce qui rend la comparaison difficile. Nous ajouterons également que nous avons utilisé des Bergers Belges Malinois, race peu utilisée en analyse biomécanique, contrairement au Greyhound, dont le faible effectif en France limite son utilisation pratique. Nous avons donc comparé nos résultats avec ceux d'animaux de **format similaire, à vitesse comparable**.

- Comparaison avec les références disponibles

L'ensemble des résultats a semblé **en accord** avec la littérature, aussi bien pour le temps de contact, que pour la date du pic de Fz. Concernant l'amplitude et l'aire sous la courbe, nous avons remarqué que la somme des valeurs des deux membres retrouvées dans la littérature a semblé proche de nos résultats : pour l'amplitude maximale, de l'ordre de 120 %Pds pour les antérieurs et 90% Pds pour les postérieurs ; pour l'aire sous la courbe, de l'ordre de 14 %Pds·s pour les antérieurs et 9 %Pds·s pour les postérieurs, d'après des études réalisées à vitesse légèrement supérieure {2,7-3,0 m/s} soit {9,7-10,8 km/h} [73, 92].

Nous avons surtout remarqué que **l'intervalle de confiance et le coefficient de variation** fournis ici ont été nettement inférieurs à ceux énoncés dans la littérature. Classiquement, pour le coefficient de variation **intra-chien**, nous avons retrouvé des valeurs de l'ordre de, pour PFz 5%, pour IFz 4% [60, 98, 99, 102]. Nous avons obtenu ici 2,13 % et 2,37 % pour PFz et IFz respectivement. La mesure de foulées consécutives et la stabilisation de la vitesse a donc semblé permettre une meilleure répétabilité des mesures et limiter la variabilité pour un même animal. Cette affirmation est importante, notamment du fait des variations potentielles et des limites, explicitées précédemment, liées à l'imposition de la vitesse

- Analyse des différences entre nos manipulations et la littérature

Les valeurs observées ont donc semblé similaires aux références. Nous pouvons néanmoins facilement expliquer les faibles différences observées. Il est acquis que la durée de contact est plus faible pour les postérieurs que pour les antérieurs. D'autre part, il n'est pas certain que l'initiation, c'est-à-dire, l'impact soit parfaitement synchrone pour les deux membres. Nous ne pouvons donc **pas considérer la parabole obtenue comme la simple somme** de deux paraboles en phase, et de période identique. L'analyse vidéo a apporté un début de réponse, mais des études futures seront nécessaires pour préciser la contribution de chacun des membres à un instant donné t.

Pour conclure sur l'analyse des trois forces (F_x , F_y , F_z) les résultats obtenus ont semblé conformes à la littérature tant sur l'allure des courbes que sur les valeurs particulières relevées. De plus, la variabilité a été moindre, notamment pour F_x et F_z par rapport à ce qui est usuellement décrit. Certaines questions, comme le pic à l'impact et la correspondance exacte entre les valeurs relevées et les instants précis de la foulée, restent à explorer.

D. Discussion de la variation

- Variabilité inter-individuelle

Pour toutes les variables étudiées, excepté le temps de vol, le coefficient de variation entre les animaux a été **plus faible** que ceux obtenus au cours des études classiques avec une plate-forme de marche. Nous avons obtenu, par exemple, 7,49 % et 5,46 % pour PFz et IFz respectivement. La littérature fournit des valeurs de l'ordre de 8,5 à 10 % pour PFz et de l'ordre de 7,5 à 11 % pour IFz [58, 97, 100]. La variabilité inter-individuelle des mesures a donc été plus faible avec un tapis roulant. Le protocole a donc semblé plus performant pour ce critère.

Cependant, il faut mentionner que nous nous sommes limités à l'étude de F_z , qui est couramment décrite comme la force la plus reproductible des trois forces mesurables.

En outre, nous pouvons toujours distinguer différents groupes d'animaux pour chaque variable. Nous avons eu des différences significatives entre chaque animal pour au moins une variable. Nous pouvons donc penser que l'outil a normalisé les différents paramètres en permettant de fixer plus de facteurs, mais n'a pas gommé les différences présentes.

- Variation
 - Séquence

Concernant la variation, il n'a **pas été noté d'influence de la séquence**. Il n'y a pas eu de différence significative, même entre la première et la dernière séquence. La locomotion a donc semblé rester stable au cours d'une même séance de mesure.

- Jour

Nous avons noté une **influence du facteur « jour »** dans la variation totale. Les variations journalières ont déjà été décrites comme non négligeables [100], notre résultat a confirmé cette variation. Néanmoins, le facteur « jour » a regroupé en réalité deux paramètres : l'un intrinsèque au sujet, correspondant aux variations réelles, l'autre extrinsèque, correspondant aux interactions avec l'outil d'analyse, c'est-à-dire à l'habitation à la locomotion sur tapis roulant.

Cette affirmation laisse penser que le protocole de mesure a **majoré** l'influence des variations journalières en combinant deux types de variation différents.

Pourtant, nous avons pu noter que la différence significative entre le jour 1 et le jour 2, n'était plus présente entre les jours 2 et 3. Nous pouvons donc penser que le sujet a été habitué, au moins en partie, à l'évolution sur tapis roulant dès le 2^{ème} jour. Cependant, nous ne pouvons rien dire concernant la **suite de l'accommodation** : les valeurs vont-elles se stabiliser et tendre vers une asymptote ou évoluer encore après quelques jours ?

Nous pouvons également nous interroger sur la **durée, la persistance** de cette habitation : dure-t-elle une semaine, un mois ? Une même habitation sera-t-elle nécessaire si le même chien est étudié d'ici quelques semaines. Cette question est particulièrement importante pour toutes les études portant sur l'efficacité et le suivi de traitement médical ou chirurgical.

- Chien

Néanmoins, la majeure partie de la variation est restée **imputable au chien** : de 64 à 88 % selon la variable concernée. Pour IFz seulement, nous avons obtenu un coefficient faible (37 %). Cela est à relier avec des coefficients de variation intra- et inter-chien faibles et donc une grande homogénéité entre animaux. Conséquemment, le facteur « chien » dans la variation de IFz a eu une influence moins prédominante par rapport aux autres facteurs, comparée à cette même influence dans la variation des autres paramètres.

L'influence réelle du facteur « jour » reste donc à étudier, et ce sur une période plus longue que celle utilisée ici, mais nous pouvons tout de même affirmer que le test utilisé a discriminé les animaux de manière tout à fait convenable.

Conclusion du second chapitre

L'analyse sur tapis roulant est possible dans l'optique d'étude biodynamique. Cependant, il est indispensable de garder en mémoire que la locomotion étudiée diffère légèrement de la locomotion habituelle du chien.

Cet outil permet de fixer certains paramètres (vitesse, champ cinématographique) mais il apparaît une nouvelle source de variabilité : l'aisance de l'animal, aisance qui évolue au fur et à mesure des séances d'analyse.

Ainsi, les résultats de cette étude permettent une nouvelle approche de l'analyse cinétique canine. Les mesures concordent avec les références actuelles et elles semblent nettement moins variables pour un même chien et sur l'ensemble des chiens étudiés. L'analyse numérique de la force verticale a montré des coefficients de variation intra-chien de 2,13% pour PFz et de 2,37% pour IFz, ce qui est environ deux fois moindre que ce qui est habituellement décrit. Les coefficients de variation inter-chien ont été de 7,49% pour PFz et de 5,46% pour IFz, ce qui est inférieur aux valeurs classiquement retrouvées.

Le moment d'analyse au cours d'une même séance n'a pas semblé influé sur les mesures. Les variations journalières ont eu une influence, bien que le jour 2 ne soit pas significativement différent du jour 3. Toutefois, la majeure partie de la variation reste imputable au chien : de 64 à 88% de la variation selon les variables. Une étude sur plusieurs jours reste cependant nécessaire, afin d'explorer l'évolution dans le temps de l'accommodation des chiens.

Chapitre 3

APPLICATION DE L'ANALYSE BIOMECANIQUE
SUR TAPIS ROULANT A L'ETUDE DE CHIENS
ATTEINTS D'UNE MYOPATHIE DYSTROPHIQUE

La synthèse bibliographique effectuée a montré l'intérêt de l'analyse biomécanique pour la quantification d'atteinte locomotrice. De plus, l'analyse biodynamique présente l'avantage d'étudier le mouvement dans des conditions physiologiques et donc de constituer un test fonctionnel de l'appareil locomoteur.

L'étude réalisée sur des chiens sains a montré l'intérêt de l'analyse sur tapis roulant. La variation a semblé moindre comparée aux protocoles classiques, bien que des études complémentaires soient nécessaires. Le système utilisé mesurait les paramètres cinétiques. Les avantages seront probablement similaires pour une analyse cinématique.

En conséquence, l'analyse biodynamique constitue un outil de choix dans l'étude de cas pathologiques. L'étude présentée dans cette troisième partie se propose d'analyser la locomotion de chiens atteints d'une myopathie dystrophique à l'aide d'un système de mesure de cinématique.

I. Présentation de l'affection étudiée : la Myopathie Dystrophique du Golden Retriever (GRMD)

Le terme de myopathie est un terme très général. Il fait référence à une atteinte du **muscle strié** qui n'est pas lié à une dénervation. Il regroupe toutes les atteintes du muscle : tumorales, inflammatoires, métaboliques, nutritionnelles, toxiques, héréditaires et congénitales. Ce sont des affections rares dans l'espèce canine.

Nous nous intéressons ici uniquement aux myopathies dystrophiques. Un processus dystrophique désigne un ensemble de remaniement des cellules musculaires, dans lesquels la **nécrose est insuffisamment compensée par la régénération**. Le terme « dystrophique » a été utilisé initialement pour nommer de nombreuses affections musculaires dont la pathogénie était inconnue. Aujourd'hui, il détermine des maladies héréditaires dont la principale chez le chien est la myopathie dystrophique du Golden Retriever.

A. La dystrophie musculaire du Golden Retriever

Les véritables dystrophies musculaires sont rares chez le chien. Ce sont des maladies héréditaires découvertes initialement en 1958 par Meier [109]. La dystrophie musculaire du Golden Retriever (GRMD) a ensuite clairement été identifiée par Valentine et coll. en 1986 [118] et par Kornegay et coll. en 1988 [62]. Elle est également appelée « Canine X-linked Muscular Dystrophy » (CXMD) en raison du processus génétique en cause.

1) Aspects génétiques

a) Au niveau du chromosome

- Gène incriminé

Le détermination du mode de transmission de l'anomalie a été l'une des premières victoires de la génétique inverse (c'est-à-dire que le gène a d'abord été localisé puis isolé et cloné puis dans un second temps, la protéine fabriquée est déterminée). Il s'agit d'une affection héréditaire, transmise sur un **mode récessif lié au chromosome X**.

Le gène est situé plus précisément sur le bras court du chromosome X, au locus Xp21 [81].

- Transmission

Dans le cadre naturel, seuls les mâles sont atteints. Cependant, les croisements consanguins, dans un but de création de lignée GRMD, ont produit des femelles homozygotes, également atteintes.

Chez le chien, la maladie a été initialement mise en évidence chez des **Golden Retriever**. La mutation a alors pu être clonée et des colonies de chiens atteints ont pu être développées. Depuis, de nombreuses autres races se sont révélées touchées par cette même mutation : Rottweiler, Irish terriers, Samoyède [120], Groenendael, Schnauzer nain [17].

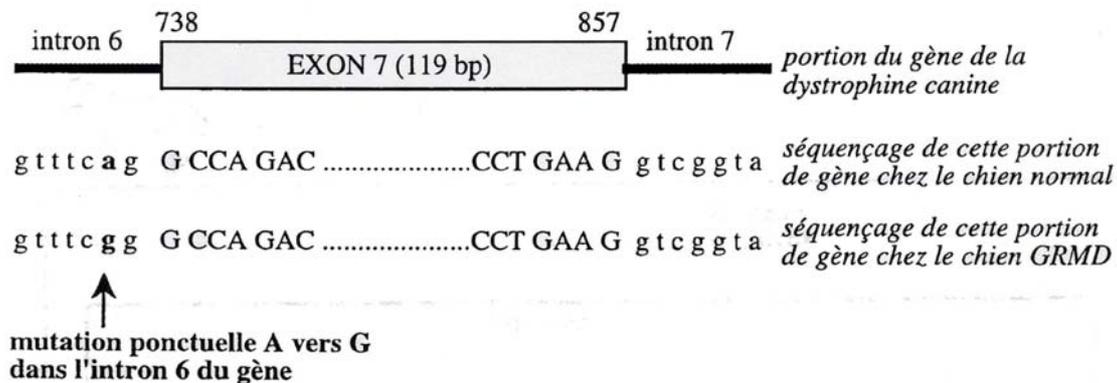
b) Au niveau de l'ADN

Sur le plan moléculaire, le gène atteint code normalement pour une protéine : la dystrophine. Les chiens GRMD présentent une mutation ponctuelle (G vers A) sur un site d'épissage 3' de l'intron 6 du gène. La mutation est de type non-sens, elle provoque la formation d'un codon-stop dans l'exon 8 N-terminal (voir figure). L'ARN messager produit est tronqué. Le transcrit alors produit est présent en quantité très faible. On suppose une faible transcription de cet ARN ou une stabilité très faible une fois transcrit [83].

Il en résulte l'absence de **dystrophine** ou la production d'une dystrophine anormale, tronquée de 390 kD.

Figure 21 : Mutation génétique à l'origine de la myopathie dystrophique du Golden Retriever

D'après [81]



c) Au niveau de la protéine

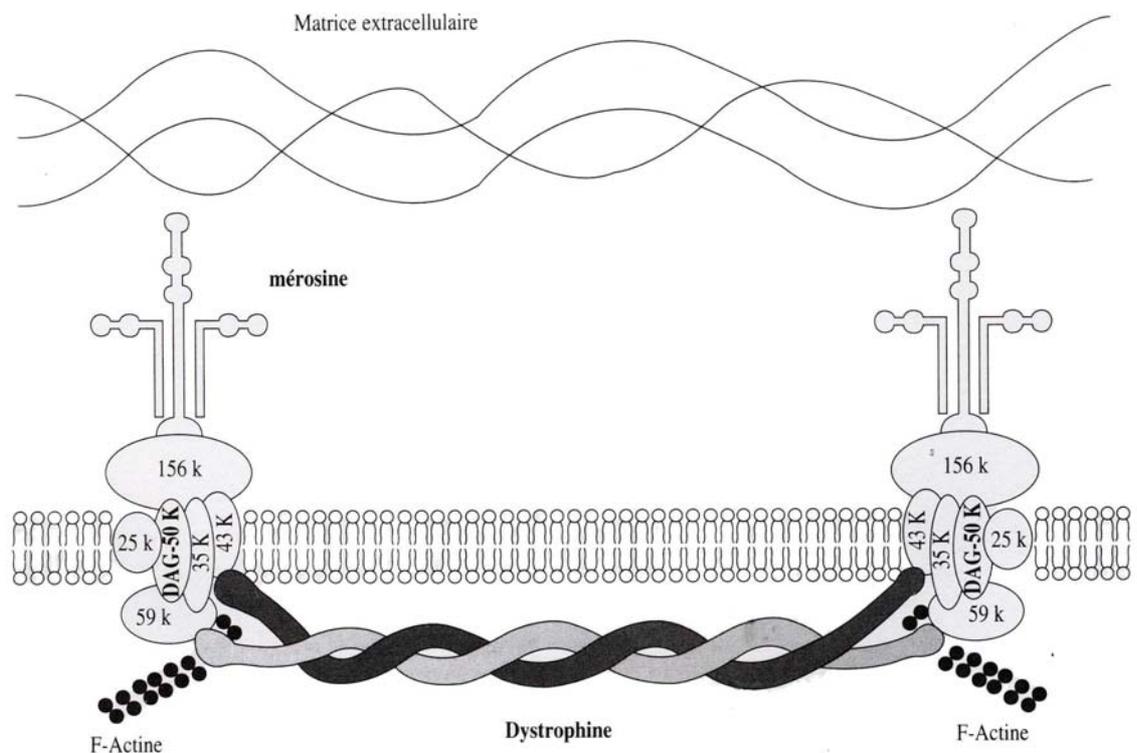
- Structure

La dystrophine doit son nom au fait que son absence est caractéristique d'une affection héréditaire de l'enfant : la **dystrophie musculaire de Duchenne** (DMD). Isolée en 1987, il s'agit d'une protéine de 427 kD composée de 3685 acides aminés. Elle est située en position **subsarcolemmale** dans les cellules des tissus striés squelettiques, striés cardiaques, mais également dans les fibres musculaires lisses et dans certains neurones [81].

Elle a une structure allongée et articulée. Elle est liée à la membrane plasmique par l'intermédiaire d'un complexe de protéines actuellement divisé en trois sous-groupes [81] : le sous-groupe des dystroglycanes, le sous-groupe des sarcoglycanes ; le sous-groupe cytoplasmique (syntrophines et alpha-dystrobrevine). L'ensemble de ces sous-groupes est appelé par simplification le complexe protéique associé à la dystrophine. (voir figure)

Figure 22 : Situation de la protéine Dystrophine dans la cellule musculaire

D'après [17]



- Fonction supposée

La structure de la protéine, son mode d'expression, ses associations moléculaires, ainsi que ses isoformes et ses protéines homologues sont de mieux en mieux connus. Cependant, le rôle précis de la dystrophine n'a pas encore été élucidé.

Un rôle **structural** est parfois supposé du fait de sa position subsarcolemmale [37, 119]. Elle aurait alors un rôle dans le maintien de la stabilité membranaire et interviendrait en tant que protéine du cytosquelette musculaire.

Parfois, il est supposé un rôle **métabolique** [81], dans le métabolisme calcique ou dans la croissance en longueur des fibres musculaires. Toutefois, ces fonctions pourraient alors être secondaires à un premier rôle de structure et de stabilisation.

2) Phénotype lésionnel : aspects histologiques

Notons, en préambule qu'il existe une forme néonatale fulminante de l'affection. Nous décrirons ici uniquement la forme classique.

a) Atteinte du muscle strié squelettique

(i) Lésions macroscopiques

Les muscles touchés peuvent être de couleur et consistance normales, ou être pâles et fermes [81]. Les variations de taille sont l'anomalie principale, mais l'atteinte est variable selon les muscles [60]. La plupart des muscles sont atrophiés particulièrement les muscles du tronc et les muscles temporaux [119]. Le tissu musculaire régresse, avec diminution du poids et du diamètre des muscles [60].

Au contraire, certains muscles sont hypertrophiés [62, 119] : langue, musculature oesophagienne, et piliers du diaphragme.

Les muscles extra-oculaires semblent être les seuls muscles striés à être systématiquement intacts [119].

(ii) Lésions visibles en microscopie optique

L'évolution des lésions est très rapide : elle s'effectue en quelques semaines. Là encore l'atteinte est variable. Les muscles les plus sévèrement et les plus précocement (avant quatre semaines) atteints sont : la langue, le trapèze, le deltoïde, le supraépineux, le sartorius [119], l'extenseur radial du carpe, le tibial cranial et le diaphragme [81].

- Premières modifications

Au stade précoce, seules des fibres hyalines, hyperéosinophiles, de grande taille et arrondies, dispersées dans le muscle sont présentes [81].

- Aspect typique des fibres musculaires

En phase d'état, à partir de quelques semaines, l'hétérogénéité de la taille des fibres est marquée [109, 119]. Des fibres nécrotiques sont présentes en amas au sein du muscle, ces fibres sont envahies de macrophages. De petites fibres basophiles en cours de régénération sont présentes en petits îlots [38, 109, 119]. Des fibres hypertrophiées, arrondies, hyperéosinophiles au cytoplasme granuleux et/ou fragmenté correspondant à des fibres en dégénérescence sont présentes [119]. Les autres lésions cellulaires incluent la présence de fibres fragmentées (fissurées transversalement), et de fibres matures aux noyaux centraux [81, 119].

Avec l'âge apparaissent de rares fibres minéralisées : le nombre de fibres en cours de phagocytose augmente, ainsi que la quantité de tissu conjonctif endo- et périmysial et le nombre de fibres à noyaux centraux [38, 109, 119]. Une infiltration par du tissu adipeux peut également survenir, notamment dans les muscles temporaux, le diaphragme et le biceps fémoral [38, 119].

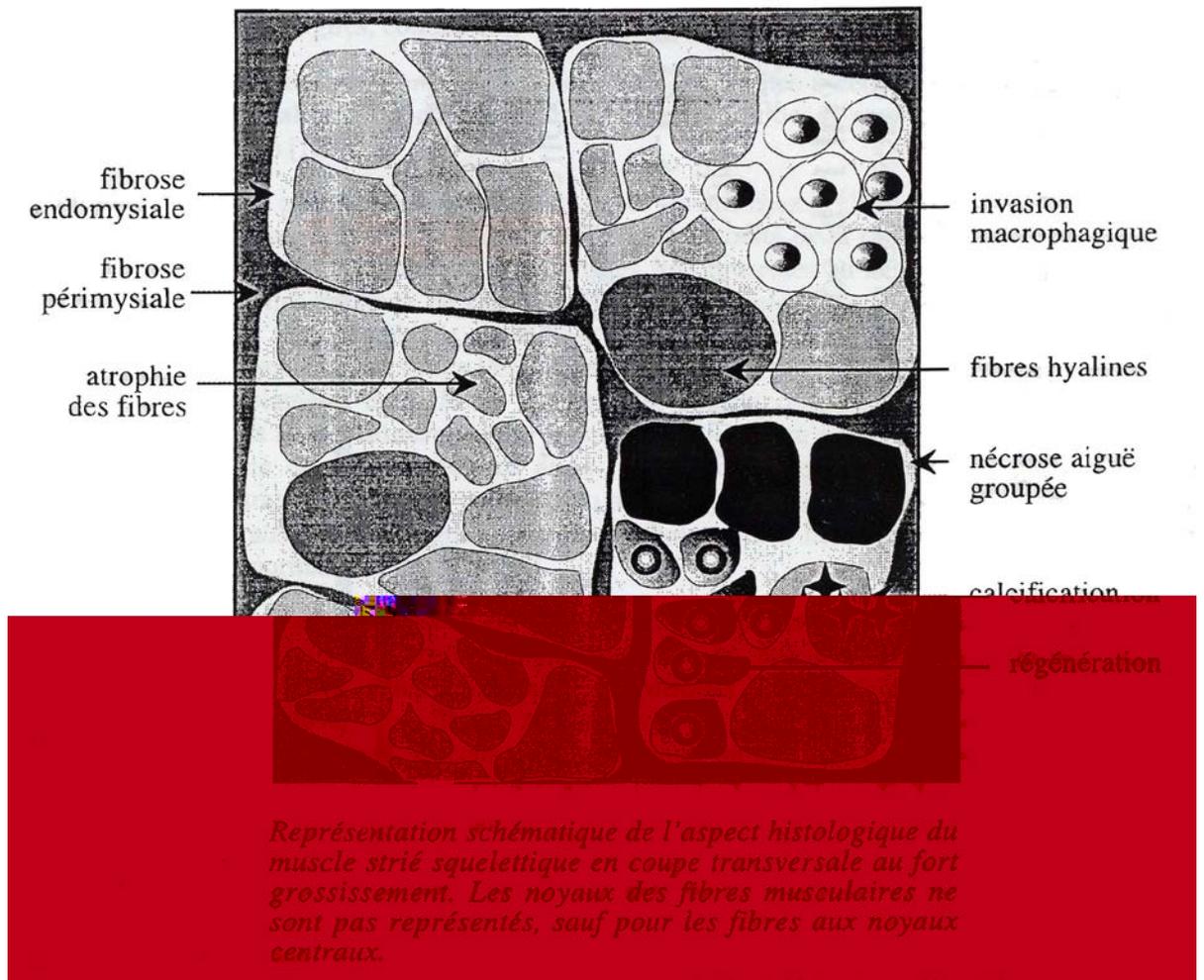
Les nerfs périphériques présentent un aspect histologique normal [81].

- Augmentation du calcium intra-cellulaire

A l'aide des colorations classiques (Von Kossa ou rouge d'Alizarine), il a été montré une augmentation marquée de la quantité de calcium dans les fibres dystrophiques, notamment en région sous-sarcolemmale [17]. Une telle augmentation n'est jamais retrouvée dans les fibres régénératives ou à noyau central. L'accumulation calcique intracellulaire est beaucoup plus importante lors de dystrophinopathie qu'au cours des autres affections musculaires canines (myosite des muscles masticateurs, polymyosite, dermatomyosite) [81] (voir figure).

Figure 23 : Lésions histologiques du muscle lors du développement de la myopathie dystrophique du Golden Retriever

D'après [81]



(iii) Lésions visibles en microscopie électronique à transmission

- Images de nécrose

L'utilisation du microscope électronique permet de mettre en évidence une hypercontraction des fibres. Cette hypercontraction est un phénomène précoce, suivi de la lyse des myofibrilles et de la nécrose totale de la fibre musculaire. Les fibres hypercontractées sont abondantes dans le muscle de chiens de trois mois. Elles sont caractérisées par un grand diamètre, une lyse des myofibrilles subsarcolemmales, un réticulum sarcoplasmique dilaté. Il se produit également une prolifération mitochondriale [119].

Le nombre de fibres dégénératives augmente avec l'âge. Elles présentent une désorganisation interne avec des vacuoles cytoplasmiques d'autophagie, une perte de l'architecture myofibrillaire et des zones multifocales d'interruption du sarcolemme appelées « delta lesions » [109].

L'invasion macrophagique, tardive, est visible dans les fibres totalement nécrotiques.

- Images de régénération

Les cellules satellites, au noyau hypertrophié clair et aux nombreux organites cytoplasmiques sont activées, signe de la régénération [119]. Les fibres aux noyaux centraux, de grand diamètre, les fibres minéralisées et la densification du tissu conjonctif endomysial, envahi de macrophages, sont évidentes chez les chiens plus âgés [109].

Les fibres nerveuses intramusculaires, myélinisées ou non, présentent un aspect ultrastructural normal [81].

Pour simplifier, ces lésions peuvent se résumer à des « **vagues** » de **nécrose** puis des « **vagues** » de **régénération** [119]. La régénération, lorsqu'elle devient insuffisante est suppléée par des phénomènes de **fibrose** et d'**infiltration graisseuse**.

(iv) Lésions détectables par enzymohistochimie

Cet examen permet de détecter une atteinte préférentielle de certains types de fibres musculaires.

Aucune atteinte préférentielle d'un type particulier de fibre n'a pu être démontrée. En revanche, un phénomène nommé « regroupement des fibres par type » [81] peut être observé. Des amas de fibres de type I ou de type II se retrouvent alors dans les muscles. Toutefois, une prédominance de fibres de type I peut être détectée en fin d'évolution dans certains muscles notamment le diaphragme, le biceps femoral, et le trapèze [62, 109, 119].

b) Atteinte du muscle strié cardiaque

Les lésions macroscopiques du muscle cardiaque sont rares. Il s'agit parfois de bandes pâles et fermes, sous épicrodiques, ou de petits foyers blanchâtres de minéralisation. La taille du cœur est normale [81].

Les lésions myocardiques histologiques sont observées après six mois, dans les muscles papillaires et la région sous-épicardique postéro-basale de la paroi ventriculaire gauche et la portion ventriculaire du septum interventriculaire [81].

3) Phénotype clinique

Comme précédemment, nous ne parlerons que de la forme classique.

Sur le plan général, on observe en premier lieu un **retard de croissance** plus ou moins important selon les individus. Ce retard serait lié à la demande accrue en métabolites nécessaires à la synthèse protéique dans les myofibres en régénération [81].

a) Signes locomoteurs

- Stade précoce

Les premiers signes de la maladie apparaissent généralement à l'âge de 6-8 semaines [38]. Ils regroupent une fatigabilité excessive et une faiblesse générale. Une amyotrophie généralisée, précoce, touche la musculature du tronc et les muscles temporaux.

Les **anomalies de posture** sont flagrantes avec abduction des coudes, adduction des jarrets, hyperextension des carpes et hyperflexion des tarses. La hanche est effondrée et les membres postérieurs sont ramenés sous le corps à l'arrêt.

La démarche est anormale : raide et maladroite, avec des foulées courtes et les coussinets traînant par terre [81]. La raideur des postérieurs est telle que le chien avance fréquemment les deux membres simultanément, qui donne une démarche caractéristique en « **sauts de lapin** » ou en anglais « bunny hopping » [62].

L'activité est diminuée, l'intolérance à l'effort est manifeste [17].

- Evolution

L'ensemble des symptômes s'aggrave progressivement ensuite et particulièrement entre trois et six mois [61]. L'amyotrophie augmente. Les groupes musculaires proximaux des membres, non atrophiés, se fibrosent, deviennent fermes à la palpation. Des contractures apparaissent et s'étendent aux différents groupes musculaires touchés [60, 61, 110]. La diminution des amplitudes articulaires est très importante au niveau de l'articulation de l'épaule et de la hanche.

La posture se déforme au fil du temps [120]. En quelques mois, la colonne vertébrale se courbe, une cyphose lombaire s'installe [81], les articulations carpaies et tarsales s'effondrent. L'animal devient totalement palmigrade et plantigrade. Le chien présente également une rotation externe des membres.

L'animal est cependant **toujours capable de marcher**. Il n'a jamais été répertorié de perte totale de la fonction locomotrice.

Photographie 3 : Chien atteint de la myopathie dystrophique du Golden Retriever



- Examens complémentaires
 - Propriétés mécaniques du muscle in-situ

Les propriétés mécaniques du muscle sont également modifiées : la tension tétanique diminue, les temps de contraction et de relaxation sont allongés, et il apparaît une activité électrique spontanée [60]. Il existe une corrélation entre les changements de cinétique du

muscle et l'atteinte clinique, mais les caractéristiques exactes de cette corrélation restent obscures [60].

L'activité électrique spontanée se traduit par des anomalies détectées lors de l'examen électromyographique. Il s'agit de décharges de haute fréquence de type myotonique [62, 109]

- Examen biochimique

Sur le plan biochimique, le taux de **créatine kinase sérique** augmente de manière très importante [62]. Ce taux est très élevé dès la naissance, il augmente progressivement pour déterminer un pic aux alentours de 6-8 semaines, puis diminue. A tout âge, les valeurs sont très élevées, de l'ordre 10 000 à 30 000 UI/L [17] soit 100 à 300 fois les valeurs usuelles.

Cette description générale admet cependant des variations importantes. La maladie présente une hétérogénéité clinique importante dans la date d'apparition et la vitesse d'évolution des symptômes [38, 61]. Ces variations sont retrouvées même entre des animaux issus d'une même portée [109].

De plus, les symptômes varient en fonction du format de l'animal : les signes précoces sont plus sévères chez les chiens de grande taille (type Retriever) que chez ceux de petit format (croisés Beagle). Ils varient également suivant le sexe du sujet atteint [109, 110].

- b) Autres appareils touchés

- (i) *Signes digestifs*

L'ouverture buccale est réduite dès les premières semaines [17]. L'atteinte du pharynx et l'hypertrophie de la base de la langue entraînent une **dysphagie** (une difficulté de préhension et de mastication des aliments), un ptyalisme et des régurgitations [17]. L'hypertrophie de la musculature oesophagienne [119] majore les difficultés de prise alimentaire [17].

La dysphagie peut également augmenter le retard de croissance par défaut d'apport de nutriments. Ainsi, la perte de poids serait plutôt secondaire à la dysphagie, à la compétition avec les sujets normaux de la fratrie et également à une demande accrue due au turn-over protéique important lié à la régénération musculaire [109].

(ii) Signes respiratoires

L'insuffisance respiratoire est présente dès les premiers mois, et se manifeste sous la forme de polypnée et de respiration abdominale. Le diaphragme est déplacé caudalement, et le périmètre thoracique est diminué [119].

La dysphagie, l'atteinte du larynx et de l'œsophage provoquent des fausses déglutitions fréquentes. Les troubles respiratoires sont ainsi aggravés par le développement de pneumonies par fausse déglutition [119].

(iii) Signes cardiaques

Longtemps normale, la fonction cardiaque peut rapidement et brutalement décliner chez certains chiens âgés occasionnant une insuffisance cardiaque congestive terminale par hypocontractilité cardiaque [81].

De manière inconstante, il est possible d'observer des modifications électrocardiographiques typiques : arythmies ventriculaires fréquentes, augmentation du rapport Q/R et diminution des intervalles P-R [120].

La mort ne survient pas nécessairement en raison de l'atteinte musculaire en elle-même. Les muscles respiratoires assurent constamment une ventilation adéquate. Souvent les animaux décèdent des complications respiratoires dues aux pneumonies par fausse déglutition.

L'insuffisance cardiaque peut également provoquer la mort des chiens, par développement d'une cardiomyopathie particulière, pouvant entraîner une hypocontractilité létale [81].

- Femelles porteuses

Il faut noter que les femelles saines et porteuses du gène muté ont un **phénotype intermédiaire**. Elles n'ont pas de handicap flagrant mais ont des capacités diminuées [37]. Cette différence pourrait être reliée à l'inactivation aléatoire du chromosome X et donc à l'expression mosaïque de la dystrophine, présente dans certaines cellules chez ces animaux porteurs [37].

Au final, les animaux ont donc une atteinte locomotrice marquée, avec une posture et une démarche caractéristique. Il n'y a jamais perte des fonctions ambulateurs, et la mort survient par atteinte des fonctions respiratoires ou cardiaques.

La myopathie dystrophique du Golden Retriever est rare dans l'espèce canine. L'intérêt principal de l'étude de cette affection est qu'elle constitue le **modèle** d'une affection humaine, la myopathie de Duchenne.

B. Myopathies similaires dans d'autres espèces

1) Dystrophie Musculaire de Duchenne (DMD)

Il s'agit d'une maladie héréditaire invalidante de l'enfant, invariablement fatale, caractérisée par une dégénérescence lente et progressive du muscle. Les premiers cas ont été décrits par Meryon en 1852 et **Duchenne en 1868** [81, 109].

Il se produit une dégénérescence progressive des fibres musculaires qui se nécrosent, avec parfois des foyers de régénération entourés d'un tissu fibreux qui devient envahissant.

- Génétique

L'anomalie se transmet sur le mode récessif lié au X. Le gène incriminé est le gène de la dystrophine. Les sujets atteints n'expriment pas la dystrophine. Le gène isolé en 1987 en premier lieu chez l'homme est identique à celui retrouvé chez le chien [81].

Cette affection est fréquente, elle touchait **1 garçon sur 3 300** en 1991 ce qui en fait la seconde anomalie liée à une mutation génétique.

- Manifestations cliniques

Les premiers signes peuvent être détectés **avant deux ans** : anomalie de posture, de démarche et du relevé. Le diagnostic se fait en général entre 3 et 6 ans. Certains groupes musculaires sont hypertrophiés précocement, notamment les muscles du mollet. En effet, ces muscles subissent une infiltration par du tissu fibro-adipeux ce qui se traduit par une « pseudo-hypertrophie ». Une amyotrophie et une faiblesse précoces sont perceptibles dans les muscles biceps, triceps, extenseurs de la hanche et vaste médial, pectoral, brachioradial et

droit du fémur [81]. Les muscles les plus atteints sont les muscles des ceintures thoraciques et pelviennes [119].

Le signe de Gower est caractéristique avant cinq ans : les enfants utilisent systématiquement les membres supérieurs en appui lors du relevé à partir de la position accroupie.

Des contractures apparaissent et s'étendent aux différents membres. En moyenne à neuf ans et demie et **toujours avant douze ans**, les enfants touchés sont contraints de vivre en **fauteuil roulant**. Les années suivantes, une cyphose lombaire s'installe [81].

La mort survient à la **fin de l'adolescence**, rarement après 20 ans. Elle se produit par insuffisance respiratoire, par atteinte des muscles inspiratoires et expiratoires.

2) Dystrophie Musculaire liée au X (mdx) chez la souris

Cette affection est issue d'une découverte fortuite en 1983 à la suite d'une mutation spontanée survenue dans une lignée C57BL/10 [31]. Les sujets mutants présentaient un niveau élevé de créatine kinase sérique. Ils étaient fertiles et viables, ce qui permis le développement de la colonie [31].

Dès le stade post-natal de 15 jours, il se produit une nécrose des fibres musculaires.

De nombreux foyers de fibres musculaires en régénération avec le noyau restant centralisé apparaissent ensuite. La régénération est importante et telle qu'il n'y a pas de perte de fibres. A la fin de la croissance, les fibres sont substituées par des fibres régénérées à noyau central [53].

Le muscle régénère mais ne fibrose pas. La **dégénérescence n'est pas évolutive**.

Il n'y a jamais de perte de fonction [117]. Les sujets présentent simplement une diminution de la fertilité (moins de portée), de la fécondité (moins de petits) et une augmentation de la mortalité néonatale.

C. Comparaison des modèles animaux pour l'étude de la myopathie de Duchenne

- Souris mdx

Les souris mdx ont été le **premier modèle proposé chronologiquement**. La localisation du gène est identique, la protéine absente également. Une dégénérescence se produit, mais celle-ci est non évolutive, la régénération prédomine et il n'y a jamais de perte de fonction.

Les mutants présentent peu de faiblesse musculaire [38], simplement une légère diminution de l'endurance. Au final, ils mènent une vie quasiment normale [109].

- Chiens GRMD

Les chiens GRMD constituent un **modèle plus complet** sur les plans génétique, biochimique et clinique. Seule la préservation de la capacité de marche diffère. Cependant, chez l'homme, l'incapacité à se tenir debout est surtout liée aux difficultés d'équilibration du haut du corps, plus qu'à faiblesse ou aux contractures musculaires. Les quadrupèdes n'ont pas ce problème d'équilibration, la capacité de marche est préservée et les inconvénients de la station immobile sont évités [109]. Le modèle canin est intéressant dans au moins deux optiques. D'une part, il améliore la compréhension de la pathogénie des myopathies dystrophiques. La grande variabilité phénotypique de l'affection laisse supposer l'intervention d'un grand nombre de facteurs différents de la simple mutation génétique. D'autre part, il permet la mise au point de thérapies. L'expression clinique sur le système locomoteur et cardio-vasculaire ainsi que les lésions histologiques sont très similaires chez l'homme et chez le chien. De plus, les muscles de chien ont une taille comparable à ceux des enfants atteints de la myopathie de Duchenne. Des études de faisabilité et d'évaluation d'efficacité sont donc faisables et transposables à l'aide de ce modèle.

Tableau IV : Tableau de comparaison des différentes myopathies de l'homme, du chien et de la souris

D'après [120] + : Présent NS : Non sens
 - : Absent ± : Parfois observé
 ? : Non résolu

	DMD (homme)	GRMD (chien)	XMD (souris)
<u>Transmission</u>			
Liaison au X	+	+	+
<u>Génétique Moléculaire</u>			
Absence de dystrophine	+	+	+
<u>Caractéristiques cliniques</u>			
Apparition précoce	+	+	+
Forme néonatale	?	+	?
Faiblesse	+	+	-
Amyotrophie	+	+	-
Démarche anormale	+	+	-
Progressive	+	+	-
Déformation du squelette	+	+	-
Incapacité à marcher	+	-	-
Mort précoce	+	±	-
Insuffisance cardiaque	+	±	-
Porteurs cliniquement sains	+	+	NS
<u>Caractéristiques clinico-pathologiques</u>			
Elevation marquée du taux de CK	+	+	+
Augmentation pré-clinique du taux de CK	+	+	NS
Diminution du taux de CK avec l'âge	+	+	+
EMG : décharges complexes répétitives	±	+	-
ECG : changements caractéristiques	+	+	-
Hypomotilité ventriculaire	+	+	-
<u>Caractéristiques morphologiques</u>			
Fibres Hypercontractées	+	+	-
Nécrose, régénération	+	+	±
Fibrose	+	+	-
Infiltration graisseuse	+	±	-
« Delta lesions »	+	+	-
Dilatation du réticulum sarcoplasmique	+	+	-
Augmentation du calcium intracellulaire	+	+	-
Fibres « normales » positives au Ca ²⁺	+	+	-
Nécrose focale et régénération chez les porteurs	+	+	-

Au final, le modèle canin est plus complet et plus proche de la maladie humaine. Le format des animaux est de plus comparable à celui des enfants touchés par la myopathie de Duchenne. Toutefois, les chiens GRMD présentent l'inconvénient d'être à un prix très élevé. L'élevage d'animaux est difficile pour deux raisons principales. Premièrement, il est peu prolifique, du fait d'un faible nombre de portées par chienne et par an associé à une mortalité importante. Deuxièmement, il est évidemment ardu d'assurer l'entretien d'animaux de grande taille, malades, faibles, insuffisants cardiaques et respiratoires.

Il ne faut pas éluder le modèle murin qui reproduit parfaitement les caractéristiques histologiques de la maladie et présente certains avantages pratiques. En effet, les souris sont plus faciles à élever : la fécondité est supérieure, l'intervalle entre génération plus court, mais aussi la petite taille des animaux est intéressante.

II. Présentation et objectifs du travail

- Evaluation du déficit locomoteur

La revue bibliographique précédente a souligné l'intérêt de l'étude de chiens GRMD. Il a également été mentionné que **l'atteinte était très variable** d'un animal à l'autre. Il serait alors souhaitable de disposer d'un moyen objectif de déterminer l'atteinte clinique des animaux touchés. Il serait alors possible d'évaluer quantitativement les animaux et de grader les différentes atteintes.

L'intérêt d'une telle classification serait une meilleure compréhension de l'évolution clinique de la maladie, et par suite une meilleure évaluation des traitements palliatifs ou curatifs qui peuvent être testés sur ces modèles animaux.

- Systèmes d'analyse proposés

L'amplitude articulaire de l'articulation tarsienne a été mesurée [61]. Cette amplitude est nettement inférieure pour les sujets atteints et diminue au cours du temps. Une atteinte préférentielle des extenseurs entraîne une hyperflexion du tarse. Cependant, cette étude a été effectuée sur des sujets anesthésiés à l'aide d'une méthode invasive et il s'agit d'une mesure statique.

Un appareil de type **ergomètre** a été mis au point pour mesurer la flexion et l'extension de la cheville chez la souris [7] : le protocole fait intervenir des souris

anesthésiées, et le muscle est stimulé électriquement. Cette méthode n'a pas été à ce jour utilisée pour étudier des souris mutantes.

- Solution envisagée

A la connaissance de l'auteur, la biodynamique n'a encore jamais été utilisée dans l'étude de cette myopathie. Notre étude se propose d'étudier des chiens GRMD à l'aide d'une **méthode cinématique** d'évaluation du mouvement du membre postérieur droit. Les animaux évolueront sur un tapis roulant, dans un champ cinématographique fixe, ce qui permet d'étudier des foulées successives.

III. Matériel et méthode

Le principe de l'étude est de comparer la locomotion de chiens atteints de myopathie dystrophique avec des apparentés cliniquement sains et génétiquement non porteurs.

A. Chiens

Les chiens sont au nombre de **6** Golden Retriever mâles, âgés, au début de l'étude, de 3 ½ mois pour trois d'entre eux et de 6 mois pour les trois autres. Ces chiens ont été élevés dans les mêmes conditions en chenil et ont reçu une alimentation adaptée à leur croissance. Leurs conditions d'entretien ont été tout à fait comparables. Les animaux ont été suivis médicalement régulièrement au chenil et leur état physiologique ainsi que leur locomotion ont été contrôlés au cours des sorties et des manipulations.

Ces chiens sont issus de **deux fratries** différentes. Chaque fratrie a apporté trois chiens, 1 sain et 2 malades. Les chiens étudiés ont donc constitué deux lots qui seront étudiés distinctement : lot 1 (chiens âgés de 6 mois) et lot 2 (chiens âgés de 3 ½ mois).

Le caractère malade des chiens a été détecté par une **méthode d'analyse génétique**. Elle consiste en une extraction d'ADN de tissu sanguin ou musculaire, puis d'une amplification par PCR (Polymerase Chain Reaction), et enfin association de trois techniques de mise en évidence : séquençage de l'ADN, digestion par l'enzyme de restriction Stu I et migration des produits sur gel d'agarose, digestion par l'enzyme de restriction SAU 961 et

migration des produits sur gel d'agarose. L'association de ces trois méthodes permet une identification certaine des sujets atteints, des sujets porteurs, et des sujets indemnes.

Etant donné l'expression très variable de la maladie, il a été très difficile de débiter l'étude avec un même stade d'atteinte pour chaque animal. Cependant, **chacun des lots pris séparément**, le niveau d'atteinte des chiens malades a été comparable : ainsi dans le lot 1, nous avons noté dès le début de l'étude, une atteinte importante avec amyotrophie, difficultés d'extension du cou, « bunny hopping » fréquent, et nombreuses contractures ; dans le lot 2, l'atteinte a été moins prononcée, au début de l'étude, nous n'avons pas remarqué de particularité dans la démarche, seul un net retard de croissance a différencié les sujets malades du sujet sain.

Dans chacun des lots, le sujet indemne d'anomalie génétique, était cliniquement sain. Ils n'ont présenté aucune anomalie locomotrice et ont été gradés au stade 0 sur l'échelle de boiterie de Sumner-Smith [112]. Leur historique médical est également contrôlé et ils n'ont aucun antécédent de problèmes orthopédiques.

Enfin, aucun d'entre eux n'avait évolué sur tapis roulant avant le commencement de l'étude.

B. Matériel spécifique

- Tapis roulant

Nous avons utilisé un tapis roulant simple bande. Les dimensions de la surface d'évolution étaient de 2,2 m de longueur et 0,50 m de largeur. La vitesse de défilement de la bande a été contrôlée à l'aide d'un pupitre de commande qui a permis une précision de l'ordre du dixième de km/h. Les vitesses possibles allaient de 0 à 25 km/h.

La longueur, sa vitesse de défilement et la commande de cette même vitesse du tapis sont des paramètres essentiels : ils ont permis à l'animal de s'habituer à la locomotion sur tapis roulant. L'animal a ainsi pu s'entraîner progressivement lors des séances successives et stabiliser sa locomotion au cours d'une même séance sans sortir de la surface d'évolution. Cela a permis alors de rassurer l'animal et d'éviter des manifestations de peur : échappement latéral, animal qui s'assied...

Le revêtement de la bande de défilement a aussi été adéquat. Il a permis une évolution aisée de tous les animaux, sans protection particulière pour les coussinets et n'a pas gêné la locomotion.

- Système d'analyse cinématique

Les animaux ont été étudiés à l'aide d'une **caméra vidéo analogique** à fréquence d'obturation 500 Hz, placée perpendiculairement à l'axe du tapis à 57 cm du centre du tapis roulant, donc de la zone d'évolution la plus fréquente des chiens. Cette caméra était reliée à un ordinateur personnel IBM-compatible, par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition et de numérisation d'images CYCLOPE® elle-même reliée à un magnétoscope VHS.

Le champ cinématographique a été éclairé à l'aide de trois ampoules halogènes de 100Watts chacune.

Les trajets osseux ont été repérés à l'aide de marqueurs. Nous avons utilisé des disques de 28 mm de diamètre en mousse noire afin d'obtenir un contraste maximum entre l'animal et les marqueurs.

Nous avons utilisé un système de traitement d'image développé par Guillaume G., Pia J. et Tafani J.P. en 1999, mis à disposition du laboratoire par APCIS SA (94700 Maisons-Alfort). Ce système a permis l'examen quantitatif des trajets des segments de membres, par seuillage, extraction de contour des barycentres de trois marqueurs cutanés fixés au centre des articulations de la hanche, du genou et de la cheville des chiens, par projection sur le plan passant par l'axe de l'animal.

C. Déroulement des manipulations

Il s'agissait de faire évoluer les chiens sur un tapis roulant afin d'étudier la marche avec un champ cinématographique fixe, ce qui a permis d'augmenter le nombre de foulées pris en compte.

Chaque lot de chien a été étudié séparément.

- Etape préliminaire

Avant toute manipulation, les animaux ont été sociabilisés et habitués aux manipulateurs, au laboratoire, à l'environnement et à la marche sur tapis roulant. Ce premier **entraînement** a requis au minimum trois séances avant de permettre des mesures.

Une fois que chaque animal a été capable d'évoluer sur le tapis roulant, nous avons procédé aux enregistrements vidéo proprement dits.

- Préparation d'une séance d'enregistrement

Premièrement, les marqueurs ont été placés sur le membre droit de l'animal à l'aide de ruban adhésif blanc double face. Les marqueurs ont systématiquement été placés par la même personne. Le marqueur représentant la **hanche** a été placé sur le grand trochanter, celui représentant le **genou** a été placé sur la lèvre latérale de la trochlée, celui représentant la **cheville** a été placé sur la malléole latérale.

Ensuite, l'animal a été mesuré au niveau du garrot. La hauteur mesurée a été ensuite reportée sur le système d'acquisition informatique afin de fournir une calibration pour la série de mesure à venir.

Photographie 4 : Chien GRMD équipé à l'aide de trois marqueurs articulaires



- Séance classique

L'animal a été placé au centre de la surface utile et a été motivé par la présence du manipulateur à l'avant du tapis. Ainsi l'animal a avancé par un mouvement rectiligne, de direction constante, tout en restant dans le champ cinématographique.

Une fois le tapis en marche, nous avons attendu de constater visuellement que le chien évoluait à **allure stable**. Cette durée d'observation a été très variable et a été fortement influencée par l'état clinique du chien.

L'enregistrement des images s'est effectué à **1,5 km/h** soit 0,40 m/s. Il s'agissait de la vitesse minimale stabilisée pouvant être fournie par le pupitre de commande. A cette vitesse, tous les animaux ont évolué au **pas**.

L'animal a été filmé par le coté **droit**, seul le membre postérieur a été étudié. Le chien a été analysé dans un espace en **2 dimensions**.

- Enregistrement

Nous avons procédé à l'enregistrement d'une série d'images au cours d'une séquence de **30 secondes**. Le logiciel a analysé une image vidéo sur deux, sur la séquence de 30 secondes, soit environ 390 sur un total de 780 possibles. Le système d'analyse a fourni un décompte du nombre d'images prises en compte. Une image correcte a été définie comme une image sur laquelle les trois marqueurs ont été visibles et analysés par le système. Nous avons défini un seuil d'acceptabilité des séquences : nous n'avons pris en compte que les séquences pour lesquelles le nombre d'images correctes était supérieur à 50.

Les enregistrements ont été réalisés régulièrement, avec un minimum de deux fois par mois. Cependant, la fréquence des enregistrements a varié également en fonction de l'état clinique des animaux malades.

D. Données utilisées

- Principe général, repère utilisé

Les trois marqueurs ont été placés sur le membre postérieur, sur les projections des articulations au niveau cutané.

Nous avons assimilé la position des marqueurs à la **position des centres articulaires**. Le marqueur situé sur l'articulation de la hanche a fourni le centre d'un repère orthonormé plan. L'enregistrement a été effectué sur chaque foulée, une moyenne arithmétique et un écart-type ont été calculés en plus des valeurs extrêmes.

- Hauteurs et angles

Pour la hanche, nous avons mesuré la hauteur : hauteur moyenne (**H.moy**) et écart-type, hauteur minimale (**H.min**) et hauteur maximale (**H.max**). Pour les articulations distales (genou et cheville) nous avons mesuré d'autres paramètres. Lorsque l'articulation était en avant, nous avons mesuré l'angle par rapport à l'horizontale dans le sens direct, angle moyen (**A.av.moy**) et écart-type, angle minimum (**A.av.min**) et angle maximum (**A.av.max**),

ainsi que la hauteur moyenne (**H.av**). Lorsque l'articulation était en arrière, nous avons mesuré de même l'angle (**A.ar.moy**, **A.ar.min**, **A.ar.max**) par rapport à l'horizontale, toujours dans le sens direct, l'angle était alors obtus. Nous avons également mesuré la hauteur moyenne (**H.ar**)

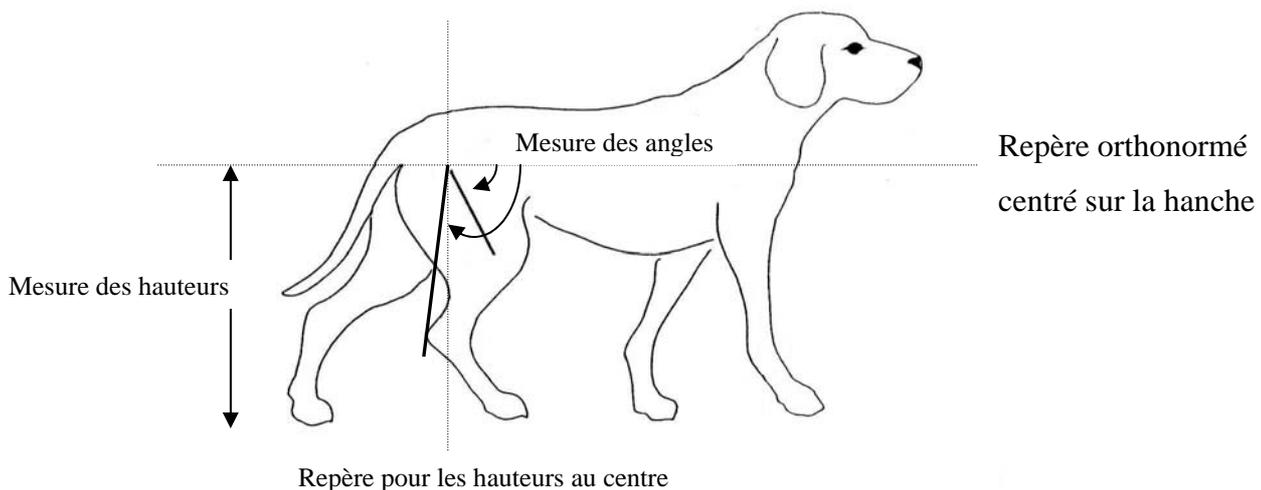
En ôtant l'angle minimum en avant et l'angle maximal en arrière, nous avons obtenu l'amplitude maximale (**Ampl.max**). En comparant les deux angles moyens, nous avons obtenu l'amplitude moyenne (**Ampl.moy**).

Nous avons également mesuré la hauteur. Nous avons assimilé la hauteur pour laquelle l'angle était de 90° comme étant la hauteur au centre. A partir de cette dénomination, nous avons pu calculer une hauteur moyenne (**H.moy**) et un écart-type, ainsi qu'une hauteur maximale (**H.max**) et minimale (**H.min**).

L'ensemble de ces paramètres : angle en avant, angle en arrière, hauteur en avant, hauteur en arrière, hauteur au centre ont été retrouvées aussi bien pour le genou que pour la cheville.

Toutes les hauteurs ont été rapportées à la hauteur mesurée au garrot (**H**), afin de normaliser les paramètres et de pouvoir comparer les animaux.

Figure 24 : Représentation des données utilisées pour l'analyse cinématique



E. Analyse des données

Chaque lot a été traité séparément. L'interprétation a été **uniquement qualitative**. Nous avons procédé à la mise en forme des données sous forme de tableaux et graphiques. Nous avons alors analysé l'évolution des différents paramètres, en prenant en compte les différents facteurs de variation : variation inter-individuelle, variation journalière, variation liée à la croissance de l'animal, variation liée à l'évolution et à l'expression de la maladie, variation résiduelle.

IV. Résultats obtenus

A. Réalisation de l'expérience

La réalisation pratique des manipulations s'est avérée difficile.

- Apprentissage

L'apprentissage de la locomotion sur tapis roulant a été **très variable** d'un chien à l'autre. La vitesse d'apprentissage a notamment été très dépendante du degré de sociabilisation. Le commencement des manipulations a du être différé pour un chien dans chaque lot.

- Déficit locomoteur très hétérogène

Les animaux malades étaient atteints de manière très différente. Cela induit que le potentiel locomoteur était atteint différemment, au départ, et au cours des manipulations, l'évolution ayant été variable pour chaque animal. Cela s'est traduit par une grande **irrégularité des enregistrements**.

En effet, un même animal, capable d'évoluer de manière satisfaisante sur la machine, n'a pas toujours fourni un nombre d'images suffisantes dès le premier enregistrement. Il n'a pas toujours été possible de réitérer les enregistrements jusqu'à obtention d'un nombre satisfaisant d'images. La fatigabilité extrême des animaux atteints a limité grandement la durée des manipulations et le nombre d'essais réalisables.

De plus, de la même façon, il n'a pas toujours été possible d'attendre une allure visuellement stable pour commencer les enregistrements. Dans la majeure partie des séances,

les enregistrements ont été effectués dès que l'animal évoluait dans le champ cinématographique. Dans la même optique, l'arrêt des séries d'enregistrement a été fonction de la progression de la maladie chez les sujets atteints.

Au final, la conséquence de ces deux éléments (apprentissage et difficulté locomotrice) a été que la collecte finale des données a montré un certain nombre de mesures manquantes, ainsi qu'une durée totale d'analyse différente pour chacun des lots. D'autre part, l'autre conséquence a été la variation de la fréquence des enregistrements.

Cependant, l'intervalle maximal entre deux enregistrements a été de 14 jours. Finalement, **seul quatre animaux** (deux sains, deux atteints) ont fourni un nombre d'enregistrements suffisant. Dans un lot, la durée d'analyse a été de 5 mois avec 19 mesures pour le chien sain, 15 pour le chien atteint, dans l'autre lot, elle a été de 2 mois avec 9 mesures pour chacun des deux chiens.

B. Données visuelles

L'évolution de la locomotion pour chacun des chiens a été visuellement détectable. Ainsi, nous avons pu noter au cours des différentes semaines, l'augmentation de la raideur de la démarche, l'apparition et le développement important de contractures musculaires, l'utilisation de plus en plus fréquente du « bunny hopping » pour accélérer. D'autre part, nous avons aussi observé plus précisément l'évolution de la posture statique. Nous avons noté l'apparition et l'augmentation de la plantigradie et de la palmigradie, une ventroflexion du cou de plus en plus importante, un affaissement du train postérieur avec diminution de la hauteur de la hanche, écart du membre postérieur par rapport à la verticale et avancée du membre vers l'avant. Enfin, nous avons aussi vu une amyotrophie de plus en plus importante.

Le chien du lot 1 était le sujet le plus atteint et a présenté très rapidement tous les symptômes majeurs de la myopathie. Le chien du lot 2 a été analysé plus précocement et a montré une expression plus tardive et plus lente de la maladie. Son atteinte aussi bien au début qu'à la fin du protocole a été moins importante que celle du chien du lot 1.

C. Données cinématiques

1) Hanche

Concernant les résultats des mesures proprement dites, intéressons nous à l'articulation de la hanche.

- Lot 1

Hauteurs moyennes et maximales

Dans le lot 1, les hauteurs moyennes et maximales ont été stables pour le chien sain: $0,81 < H.moy/H < 0,98$ avec 14 mesures sur 19 dans l'intervalle $\{0,85;0,95\}$; et aussi $0,88 < H.max/H < 1,37$ avec 10 mesures sur 19 dans l'intervalle $\{0,90;1,00\}$ et 15 dans l'intervalle $\{0,90;1,05\}$.

Pour le chien atteint, ces paramètres ont également été stables pendant les quatre premiers mois de l'analyse, puis ils diminuent dans le dernier mois: $0,78 < H.moy/H < 1,02$ et 6 mesures sur 11 dans l'intervalle $\{0,85;0,95\}$ et $0,88 < H.max/H < 1,76$ et 6 mesures sur 11 dans l'intervalle $\{0,85;1,00\}$ pour les quatre premiers mois, pour le dernier mois : $0,72 < H.moy/H < 0,76$ et $0,76 < H.max/H < 0,79$.

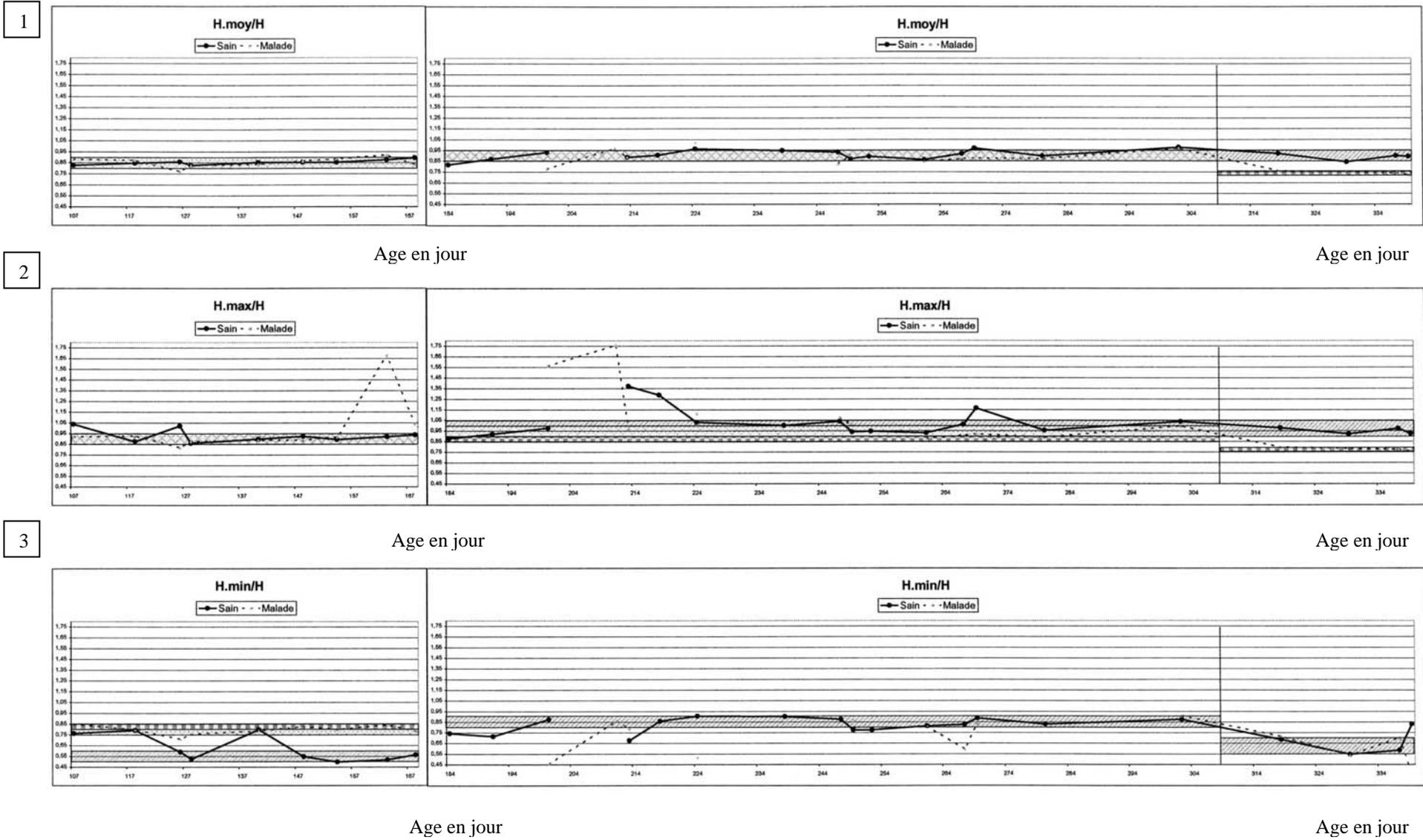
Hauteurs minimales

Les hauteurs minimales ont été plus variables. Pour le chien sain, nous avons trouvé une constance moindre du rapport dans les quatre premiers mois et une diminution dans le dernier mois: $0,67 < H.min/H < 0,90$ avec 8 mesures sur 15 dans l'intervalle $\{0,80;0,90\}$ pour les quatre premiers mois, puis $0,58 < H.min/H < 0,83$ et 3 mesures sur 4 dans l'intervalle $\{0,55;0,70\}$ dans le dernier mois.

Pour le chien atteint, le rapport a été encore moins stable que les autres rapports et nous avons observé une diminution semblable dans le dernier mois: $0,45 < H.min/H < 0,91$, et aucun intervalle précis n'a semblé se dégager des mesures dans les quatre premiers mois; puis dans le dernier mois, $0,36 < H.min/H < 0,71$.

-  Animal sain
-  Animal malade
-  Zone de recouvrement

Figure 25 : Evolution des paramètres de hauteurs moyenne (1) maximale (2) et moyenne (3) pour le marqueur de la hanche



✓ Lorsque nous avons comparé les deux animaux concernant la hauteur de hanche, nous avons remarqué que les rapports sont restés relativement constants, pour les deux chiens dans les quatre premiers mois. Dans le dernier mois, nous avons observé une diminution des rapports sur les hauteurs moyennes et maximales pour le chien malade. Il est apparu au cours de ce mois une différence de plus en plus importante entre le sujet sain et le sujet atteint.

- Lot 2

Hauteurs moyennes et maximales

Dans le lot 2, le rapport sur les hauteurs moyennes s'est révélé très constant pendant les deux mois d'analyse pour les deux animaux. Nous avons mesuré pour le chien sain: $0,83 < H.moy/H < 0,89$ avec 9 mesures sur 9 comprises dans l'intervalle $\{0,80;0,90\}$; pour le chien malade: $0,77 < H.moy/H < 0,92$ avec 7 mesures sur 9 comprises dans l'intervalle $\{0,80;0,90\}$.

Le rapport sur les hauteurs maximales a été stable, nous avons mesuré pour le chien sain: $0,86 < H.max/H < 1,04$ avec 7 mesures sur 9 comprises dans l'intervalle $\{0,85;0,95\}$. Pour le chien malade, nous avons mesuré: $0,82 < H.max/H < 1,68$ avec 6 mesures sur 9 comprises dans l'intervalle $\{0,85;0,95\}$.

Hauteurs minimales

Concernant les hauteurs minimales, pour le chien sain, le rapport a été moins constant. Nous avons mesuré: $0,52 < H.min/H < 0,80$ avec 6 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,50;0,60\}$ mais aussi les 3 mesures restantes dans l'intervalle $\{0,75;0,80\}$. Pour le chien malade, le rapport a été très stable : $0,71 < H.min/H < 0,85$ avec 7 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,75;0,85\}$.

✓ En comparant les deux sujets, nous avons observé que les rapports sont restés constants au cours des deux mois d'analyse. Nous n'avons pas observé de différence importante entre les deux sujets pour les paramètres de hauteur moyenne et de hauteur maximale. En revanche, nous avons observé une différence notable pour le rapport sur les hauteurs minimales, différence observée après la première semaine de mesure.

2) Genou

Concernant les positions de l'articulation du genou, nous avons obtenu les résultats suivants.

a) Hauteur

(i) *Hauteur en avant*

- Lot 1

La hauteur en avant a été rapportée à la hauteur mesurée. Dans le lot 1, le rapport a été constant au cours des cinq mois d'analyse pour le chien sain : $0,51 < H.av/H < 0,70$ avec 15 mesures sur 19 comprises dans l'intervalle $\{0,55 ; 0,65\}$.

Pour le chien malade, le rapport a été stable pour les quatre premiers mois : $0,49 < H.av/H < 0,63$ avec 8 mesures sur 11 dans l'intervalle $\{0,50 ; 0,60\}$; puis nous avons observé une diminution dans le derniers mois, avec $0,44 < H.av/H < 0,53$ et 3 mesures sur 4 dans l'intervalle $\{0,44 ; 0,46\}$.

En comparant les deux sujets, nous avons noté une différence, diminution du rapport pour le chien malade, qui est apparue au bout du quatrième mois d'analyse, avec augmentation de cette différence pendant le mois suivant.

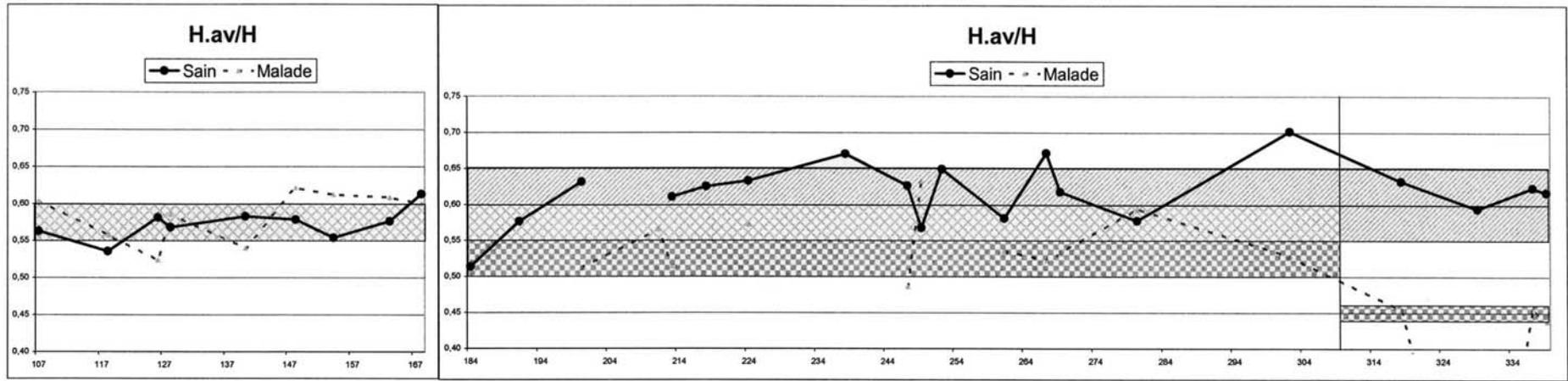
- Lot 2

Dans le lot 2, le rapport a été constant au cours des deux mois d'analyse pour le chien sain : $0,54 < H.av/H < 0,61$ avec 7 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,55 ; 0,60\}$. Pour le chien malade, le rapport a été variable : $0,52 < H.av/H < 0,62$ et une répartition plus espacée. Etant donné que nous avons obtenu une courbe stable et une courbe variable, la comparaison a été difficile.

-  Animal sain
-  Animal malade
-  Zone de recouvrement

Figure 26 : Evolution des paramètres de hauteurs en avant (1) en arrière (2) pour le marqueur du genou

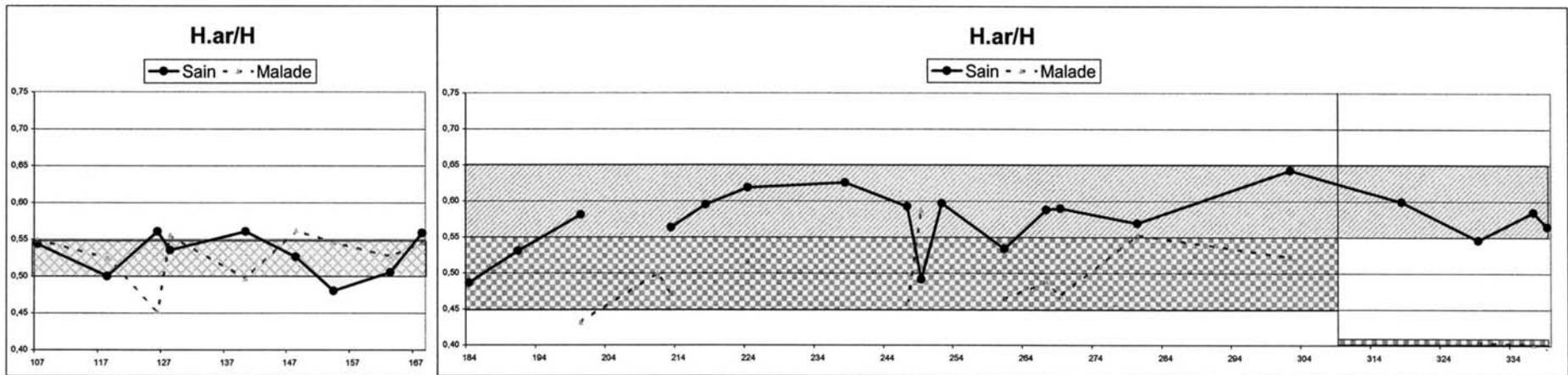
1



Age en jour

Age en jour

2



Age en jour

Age en jour

(ii) *Hauteur en arrière*

- Lot 1

Dans le lot 1, le rapport est resté stable pendant le temps de l'analyse pour le chien sain : $0,49 < H.ar/H < 0,64$ avec 12 mesures sur 19 dans l'intervalle $\{0,55 ; 0,60\}$ et 15 dans l'intervalle $\{0,55 ; 0,65\}$.

Pour le chien malade, nous avons noté une stabilité du rapport pendant les quatre premiers mois de l'analyse, avec $0,43 < H.ar/H < 0,59$ et 8 mesures sur 11 dans l'intervalle $\{0,45 ; 0,55\}$, puis nous avons observé une diminution pour le mois suivant avec $0,39 < H.ar/H < 0,40$.

La comparaison des deux courbes a montré une différence initialement présente, qui s'est accentuée à partir du quatrième mois d'analyse.

- Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien sain, le rapport est resté constant : $0,48 < H.ar/H < 0,56$ et 5 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,50 ; 0,55\}$. Pour le chien malade, le rapport est également resté stable : $0,45 < H.ar/H < 0,56$ et 6 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,50 ; 0,55\}$. Aucune différence n'a été relevée en comparant les deux courbes.

(iii) *Hauteur au centre*

- Hauteur moyenne au centre

Lot 1

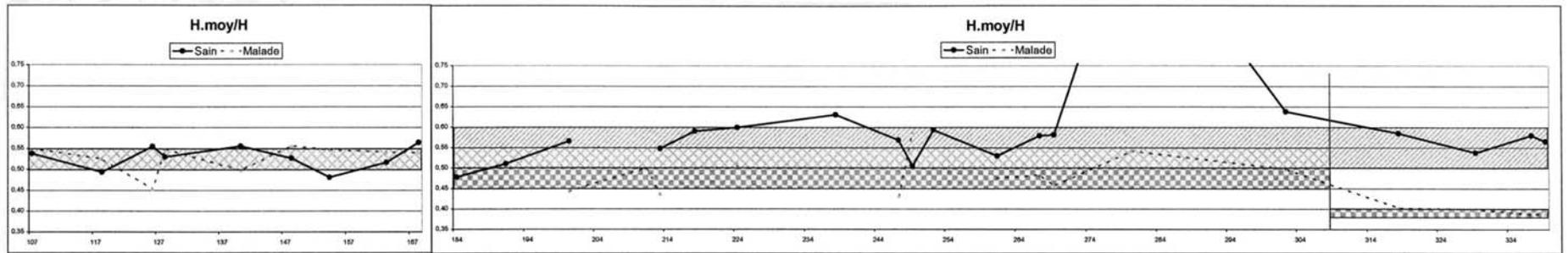
Dans le lot 1, pour le chien sain, nous avons noté une stabilité des mesures, malgré un résultat atypique : $0,48 < H.moy/H < 1,15$ avec 15 mesures sur 19 dans l'intervalle $\{0,50 ; 0,60\}$.

Pour le chien malade, nous avons observé une stabilité pendant les quatre premiers mois : $0,43 < H.moy/H < 0,59$ et 7 mesures sur 11 dans l'intervalle $\{0,45 ; 0,55\}$, puis nous avons vu une diminution pour le dernier mois avec $0,39 < H.moy/H < 0,40$.

-  Animal sain
-  Animal malade
-  Zone de recouvrement

Figure 27 : Evolution des paramètres de hauteurs au centre moyenne (1) maximale (2) et minimale (3) pour le marqueur du genou

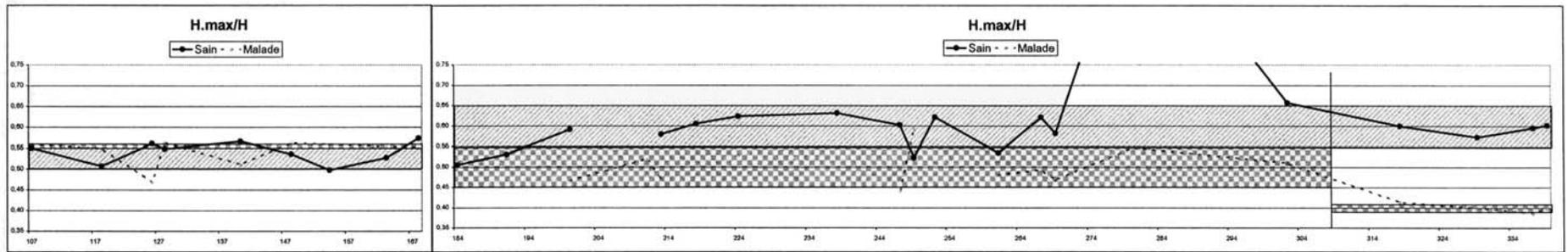
1



Age en jour

Age en jour

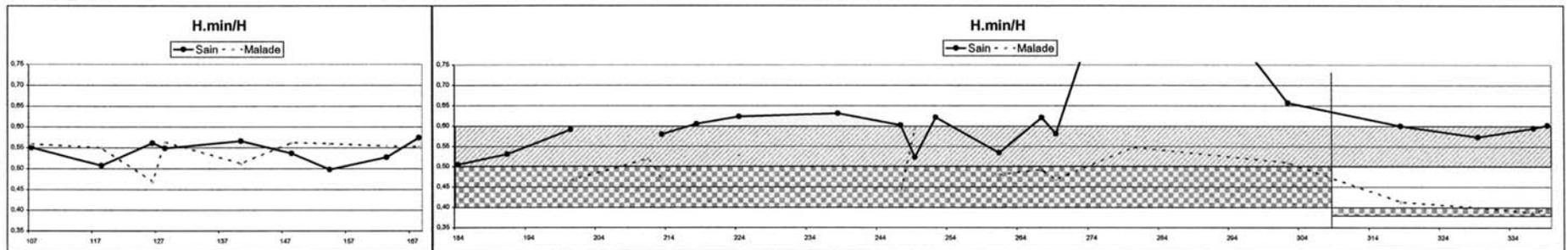
2



Age en jour

Age en jour

3



Age en jour

Age en jour

La comparaison des deux courbes a montré une différence initialement présente (hauteur plus faible pour le chien malade), différence qui s'accroît à partir du quatrième mois.

Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien sain, le rapport est resté constant : $0,48 < H_{\text{moy}}/H < 0,56$ et 5 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,50 ; 0,55\}$. Pour le chien malade, le rapport a également été stable : $0,45 < H_{\text{moy}}/H < 0,56$ et 7 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,50 ; 0,55\}$. Nous n'avons pas noté de différence en comparant les deux courbes.

- Hauteur maximale au centre

Lot 1

Dans le lot 1, nous avons observé des mesures constantes pendant tout le temps de l'analyse, malgré un résultat atypique : $0,50 < H_{\text{max}}/H < 1,15$ avec 13 mesures sur 19 dans l'intervalle $\{0,55 ; 0,65\}$.

Concernant le chien malade, le rapport a été stable pendant les quatre premiers mois : $0,44 < H_{\text{max}}/H < 0,59$ et 9 valeurs sur 11 dans l'intervalle $\{0,45 ; 0,55\}$, puis le rapport a diminué pendant le mois suivant avec $0,39 < H_{\text{max}}/H < 0,41$.

Les deux courbes ont montré une différence initiale entre les paramètres des deux chiens, cette différence s'accroissant dans le dernier mois d'analyse.

Lot 2

Dans le lot 2, le rapport concernant le chien sain est resté stable : $0,50 < H_{\text{max}}/H < 0,57$ et 6 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,50 ; 0,55\}$. Pour le chien malade, le rapport a été très constant avec $0,47 < H_{\text{max}}/H < 0,56$ et 7 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,55 ; 0,56\}$. Aucune différence n'a été relevée entre les deux courbes sur la période d'analyse.

- Hauteur minimale au centre

Lot 1

Dans le lot 1, pour le chien sain, les mesures se sont révélées stables, malgré quelques résultats atypiques : $0,20 < H.\min/H < 1,15$ et 12 mesures sur 19 dans l'intervalle $\{0,50 ; 0,60\}$.

Pour le chien malade, le rapport a été stable pendant les cinq premiers mois : $0,30 < H.\min/H < 0,56$ et 8 mesures sur 11 dans l'intervalle $\{0,40 ; 0,50\}$, puis le rapport a diminué pendant le mois suivant avec $0,37 < H.\min/H < 0,40$.

La comparaison des deux courbes montre une différence initiale, qui s'est accentuée pendant le dernier mois de manipulation.

Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien sain, le rapport a été stable pendant le temps de l'analyse : $0,45 < H.\min/H < 0,53$, aucun intervalle d'amplitude 0,05 n'a cependant pu être dégagé, malgré la stabilité des valeurs obtenues. Pour le chien malade, la même stabilité a été notée : $0,40 < H.\min/H < 0,54$, aucun intervalle n'a de nouveau pu être dégagé de l'ensemble des valeurs. De fait, aucune différence n'a été notée entre les deux courbes.

b) Angles

(i) Angle en avant

- Angle en avant moyen

Lot 1

Dans le lot 1, l'angle est resté stable pour le chien sain : $45,92 < A.\text{av.moy} < 60,36$ et 10 mesures sur 19 dans l'intervalle $\{50 ; 55\}$ et 15 sur 19 dans l'intervalle $\{50 ; 60\}$.

En revanche, pour le chien atteint, les valeurs obtenues ont été plus variables : $36,92 < A.\text{av.moy} < 71,10$, aucun intervalle restreint n'a semblé se détacher de l'ensemble des mesures, nous avons simplement retrouvé 9 mesures sur 15 dans l'intervalle $\{46 ; 56\}$. Nous avons également observé une légère augmentation au début de la période d'analyse.

En comparant les deux courbes, nous avons observé une légère différence initiale qui a tendu à se réduire, la comparaison étant difficile étant donnée la variabilité des valeurs pour le chien atteint.

Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien sain, l'angle en avant moyen est resté constant : $49,32 < A.av.moy < 66,76$ et 5 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{55 ; 60\}$ et 7 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{50 ; 60\}$. Cet angle a légèrement diminué à la fin du protocole.

Pour le chien malade, l'angle a diminué sur l'ensemble de la période d'étude : $61,17 < A.av.moy < 74,94$ pour le premier mois, puis $44,02 < A.av.moy < 56,11$ pour le second mois.

La comparaison des deux courbes a montré que l'angle pour le chien atteint a été supérieur à celui du chien sain en début d'analyse, ce rapport s'inversant progressivement au fur et à mesure du temps.

- Angle en avant maximal

Lot 1

Dans le lot 1, pour le chien sain, nous avons obtenu une courbe avec une variabilité supérieure : $48,39 < A.av.max < 66,65$ et 9 mesures sur 19 dans l'intervalle $\{55 ; 60\}$ et 13 sur 19 dans l'intervalle $\{55 ; 65\}$.

Pour le chien malade, l'angle a également montré une variabilité importante : $39,66 < A.av.max < 73,78$ avec cependant 8 valeurs sur 15 dans l'intervalle $\{50,60\}$. L'angle a augmenté sur la période d'analyse et les valeurs se sont stabilisées à la fin de l'étude.

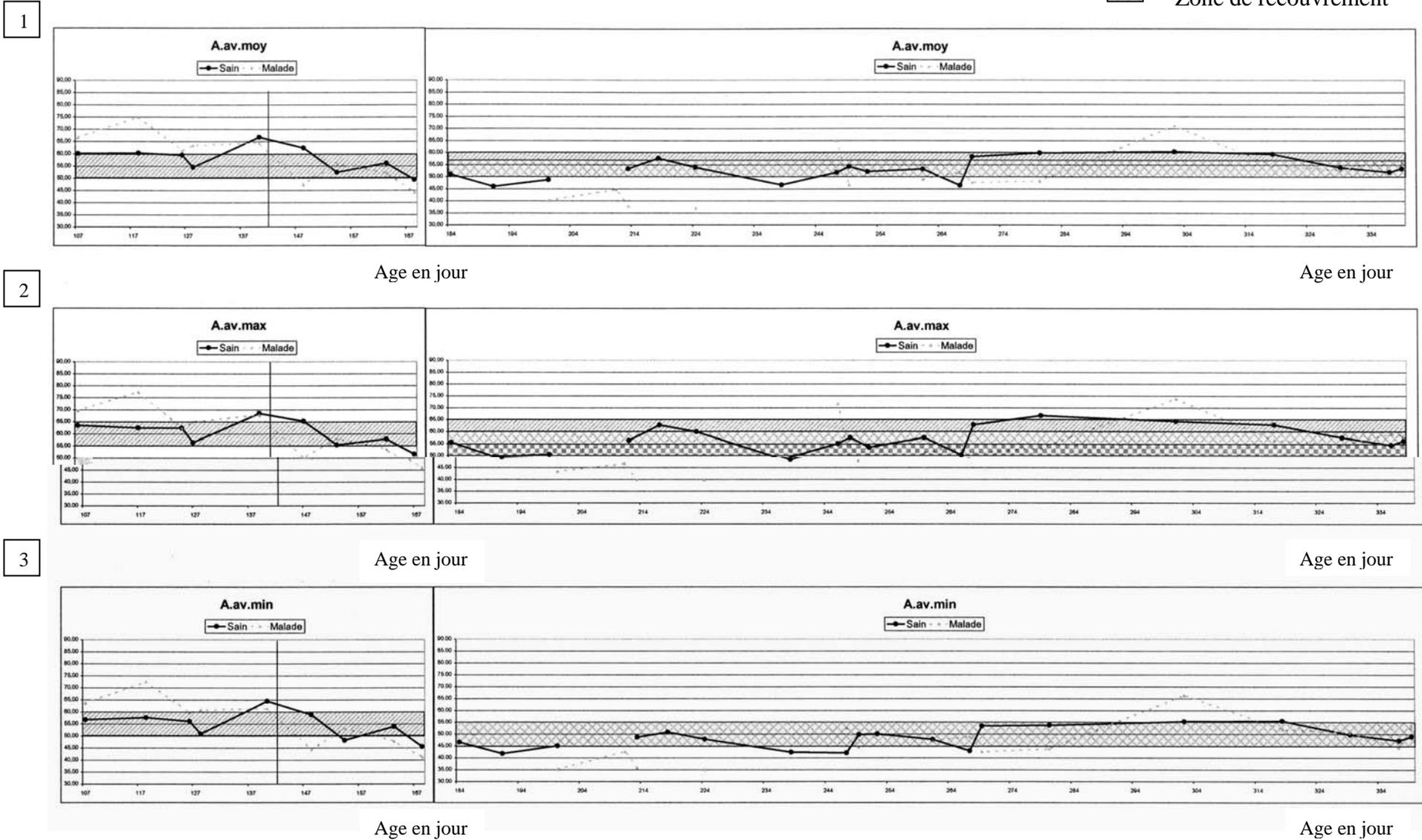
En comparant les deux courbes, nous avons noté une différence au début du protocole qui tend à se réduire en fin de protocole.

Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien sain, les mesures de l'angle ont été variables, avec $51,61 < A.av.max < 68,44$, pas d'intervalle restreint distinguable, mais simplement 7 mesures dans l'intervalle $\{55 ; 65\}$. L'angle a légèrement diminué au cours de l'analyse.

-  Animal sain
-  Animal malade
-  Zone de recouvrement

Figure 28 : Evolution des paramètres d'angles en avant moyen (1) maximal (2) et minimal (3) pour le marqueur du genou



Pour le chien atteint, l'angle a diminué de façon importante pendant l'analyse : $62,21 < A.av.max < 77,36$ pour le premier mois, puis $45,79 < A.av.max < 58,02$ pour le second mois.

En analysant les deux courbes simultanément, nous avons observé que l'angle pour le chien atteint était plus élevé en début d'expérience par rapport à celui du chien sain, cet angle devient plus faible en fin d'expérience pour le chien atteint par rapport à celui du chien sain.

- Angle en avant minimal

Lot 1

Dans le lot 1, pour le chien sain, l'angle est resté stable pendant la durée des manipulations : $41,78 < A.av.min < 55,44$ avec 10 valeurs sur 19 dans l'intervalle $\{45 ; 50\}$ et 15 valeurs sur 19 dans l'intervalle $\{45 ; 55\}$.

L'angle du chien malade a montré plus de variation, avec de surcroît une mesure atypique : $35,11 < A.av.min < 53,16$. Il n'a pas été possible de distinguer d'intervalle restreint, si ce n'est que nous avons retrouvé 8 valeurs sur 15 dans l'intervalle $\{44 ; 55\}$. L'angle a semblé augmenter au fil des manipulations, mais la variation importante des valeurs a tempéré cette possible augmentation.

La comparaison des deux courbes a été difficile, nous avons remarqué une légère différence au début des expériences, qui a disparu rapidement.

Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien sain, les valeurs ont été variables : $45,54 < A.av.min < 64,39$, aucun intervalle restreint n'a pu être mis en évidence, si ce n'est que 6 valeurs sur 9 ont été présentes dans l'intervalle $\{50 ; 60\}$. Les valeurs ont montré également une légère diminution au fur et à mesure des enregistrements.

Pour le chien atteint, les mesures ont diminué de manière importante durant le protocole : $59,56 < A.av.min < 72,51$ pendant le premier mois et $41,10 < A.av.min < 53,16$ pendant le mois suivant.

La comparaison des deux animaux a montré que l'angle pour le chien atteint a été supérieur en début d'expérience et inférieur en fin d'expérience.

(ii) Angle en arrière

- Angle en arrière moyen

Lot 1

Dans le lot 1, chez le chien sain, l'angle a été variable au cours des mesures : $70,99 < A.ar.moy < 100,89$, aucun intervalle restreint n'a été remarqué, cependant, 11 valeurs sur 19 se situent dans l'intervalle $\{80 ; 90\}$.

L'angle en arrière a été très variable tout au long des manipulations : $67,20 < A.ar.moy < 113,96$, nous n'avons pu distinguer d'intervalle que pour 2 ou 3 valeurs consécutives, néanmoins, l'angle a augmenté au fil des mesures.

La comparaison des deux courbes a montré une différence initiale rapidement compensée, cependant, les deux courbes étant très variables, la comparaison a été ardue.

Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien sain, les mesures ont montré une variabilité : $76,89 < A.ar.moy < 105,07$ et il n'a pas été possible de mettre en évidence d'intervalle restreint, toutefois, 6 mesures sur 9 sont comprises dans l'intervalle $\{85 ; 95\}$.

Chez le chien malade, l'angle a grandement diminué au cours de l'analyse : $97,41 < A.ar.moy < 106,70$ pour le premier mois et $72,87 < A.ar.moy < 82,17$ pour le mois suivant.

En comparant les deux courbes, l'angle pour le chien atteint s'est révélé être supérieur en début d'analyse et inférieur en fin, vis-à-vis de l'angle du chien sain.

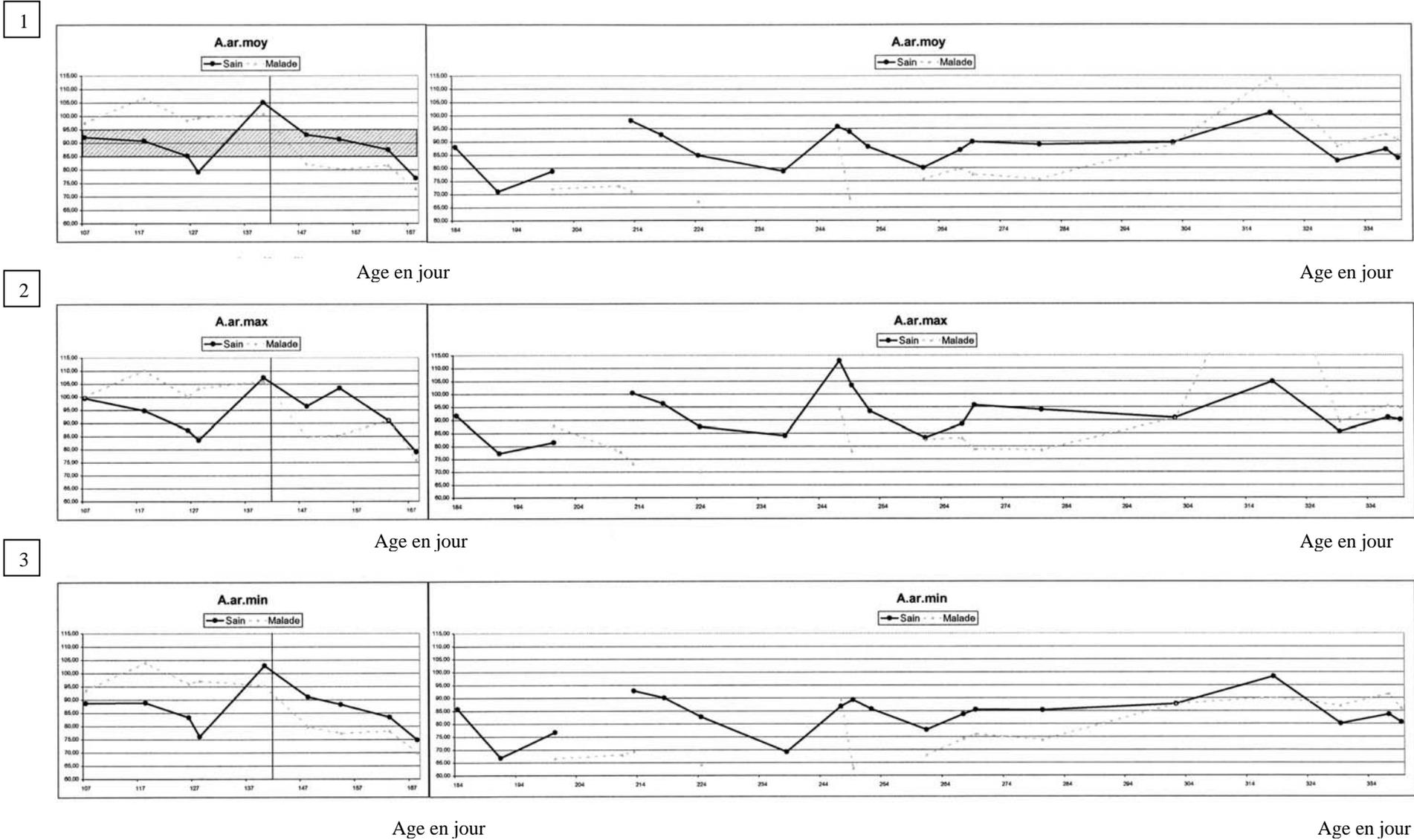
- Angle en arrière maximal

Lot 1

Dans le lot 1, chez le chien sain, les valeurs trouvées ont été très variables : $77,16 < A.ar.max < 112,84$, et aucun intervalle n'a pu être mis en évidence, la seule amplitude remarquable a été $\{83 ; 96\}$ qui comprend 12 valeurs sur 19.

-  Animal sain
-  Animal malade
-  Zone de recouvrement

Figure 29 : Evolution des paramètres d'angles en arrière moyen (1) maximal (2) et minimal (3) pour le marqueur du genou



Pour le chien atteint, l'angle mesuré a été également très variable, des intervalles précis ne pouvant être relevés que pour des séries de 2 ou 3 valeurs consécutives. Néanmoins, l'angle a semblé avoir augmenté au cours du protocole.

La comparaison des deux courbes a montré une différence initiale, différence comblée lors des mesures suivantes. Cependant, les valeurs étant très variables, la comparaison a été peu significative.

Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien sain, nous avons observé des mesures très divergentes : $78,90 < A.ar.max < 107,32$, et nous n'avons pas décelé d'intervalle contenant plus de deux mesures.

Pour le chien atteint, l'angle en arrière a diminué de manière conséquente : $99,97 < A.ar.max < 110,19$ pour le premier mois et $76,00 < A.ar.max < 91,10$ pour le mois suivant.

En comparant les courbes, il est apparu que l'angle pour le chien atteint est passé d'un niveau supérieur à celui du chien sain, à un niveau inférieur au fur et à mesure du temps.

- Angle arrière minimal

Lot 1

Dans le lot 1, pour le chien sain, nous avons vu des valeurs variables : $66,84 < A.ar.min < 98,22$ avec seulement 8 valeurs sur 19 contenues dans l'intervalle {85 ;90} et 13 valeurs sur 19 dans l'intervalle {80 ;90}.

Pour le chien ma

Pour le chien malade, l'angle a diminué pendant l'étude : $93,32 < A.ar.min < 104,00$ le premier mois et $69,75 < A.ar.min < 79,74$ le mois suivant.

En comparant les deux courbes, il est apparu une inversion du rapport entre les deux animaux : le chien atteint a présenté initialement un angle supérieur, qui est devenu inférieur.

(iii) Amplitude

- Amplitude moyenne

Lot 1

Dans le lot 1, pour le chien sain, les valeurs sont restées relativement constantes pendant l'analyse : $25,07 < \text{Ampl.moy} < 44,61$ et 11 valeurs sur 19 comprises dans l'intervalle $\{29 ; 36\}$ et 14 sur 19 dans l'intervalle $\{29 ; 40\}$.

Pour le chien malade, les mesures ont donné des résultats plus variables : $17,79 < \text{Ampl.moy} < 59,28$ avec aucun intervalle restreint remarquable, mais cependant 12 valeurs sur 15 comprises dans l'intervalle $\{25 ; 36\}$. Nous avons également noté une légère augmentation au 5^{ème} mois par rapport aux mois précédents : $26,77 < \text{Ampl.moy} < 29,90$ pour le 3^{ème} mois et $34,23 < \text{Ampl.moy} < 35,83$ pour le dernier mois.

En comparant les deux courbes, nous n'avons trouvé qu'une différence faible et constante entre les deux chiens, l'amplitude étant légèrement inférieure pour le chien malade, mais les résultats de cet animal ont été dispersés.

Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien sain, les valeurs mesurées ont été dispersées : $24,82 < \text{Ampl.moy} < 39,07$, aucun intervalle restreint n'est ressorti, cependant nous avons retrouvé 7 valeurs sur 9 dans l'intervalle $\{25 ; 32\}$.

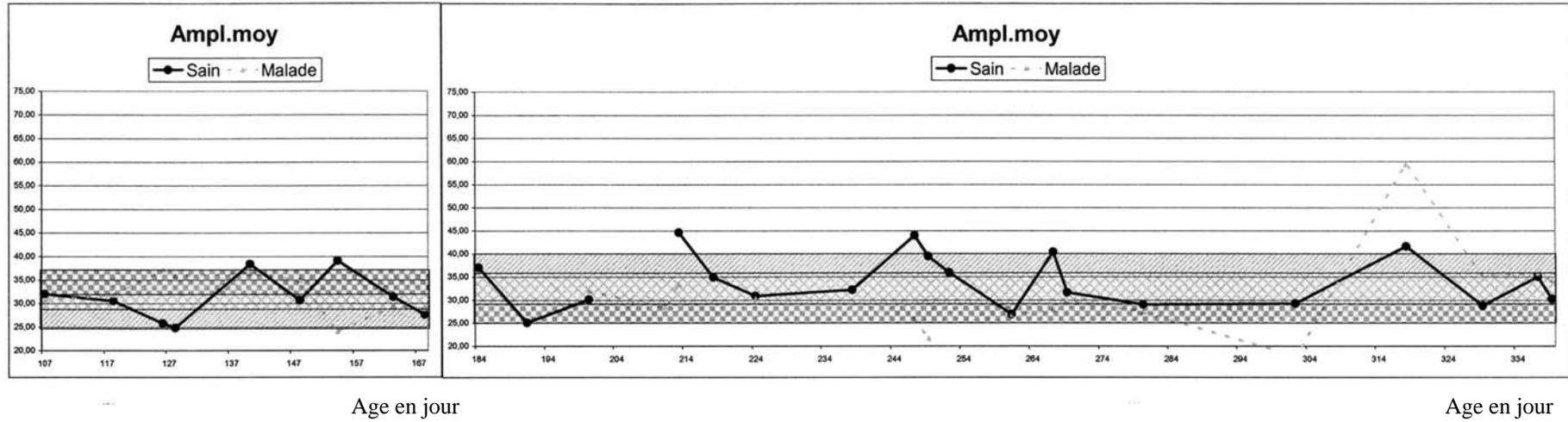
Pour le chien dystrophique, les résultats ont montré également une dispersion des mesures : $24,00 < \text{Ampl.moy} < 37,13$, aucun intervalle de faible amplitude n'a pu être mis en évidence, toutefois 8 valeurs sur 9 sont dans l'intervalle $\{29 ; 37\}$.

La comparaison a montré une légère différence entre les deux animaux, l'amplitude du chien malade étant légèrement supérieure.

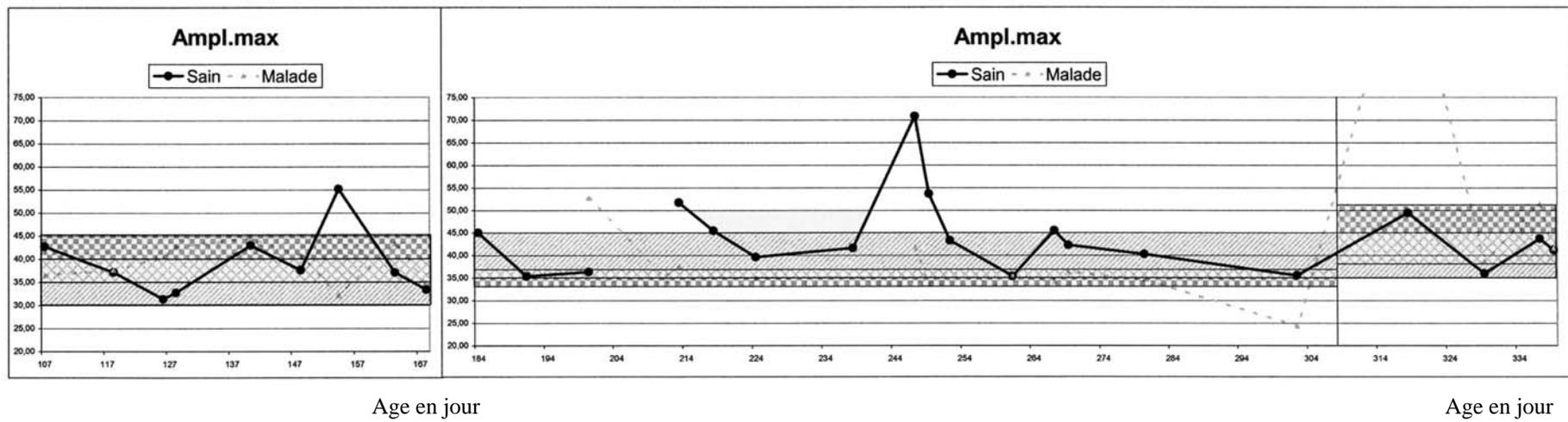
-  Animal sain
-  Animal malade
-  Zone de recouvrement

Figure 30 : Evolution des paramètres d'amplitudes moyennes (1) et maximales (2) pour le marqueur du genou

1



2



- Amplitude maximale

Lot 1

Dans le lot 1, pour le chien sain, les mesures ont été constantes : $35,36 < \text{Ampl.max} < 70,80$ et surtout 10 valeurs sur 19 dans l'intervalle {35 ;40} et 15 valeurs sur 19 dans l'intervalle {35 ;45}.

Pour le chien malade, les mesures ont également été stables pendant les quatre premiers mois : $24,33 < \text{Ampl.max} < 52,69$, mais surtout 8 mesures sur 11 dans l'intervalle {33 ;37}, l'amplitude a ensuite augmenté dans le dernier mois : $38,68 < \text{Ampl.max} < 109,20$ malgré un résultat atypique, nous avons noté cette augmentation et la présence de trois mesures dans l'intervalle {38 ;51}.

La comparaison des deux courbes a montré une faible différence au début d'expérience, différence qui s'est estompée dans le dernier mois.

Lot 2

Dans le lot 2, les résultats ont montré une dispersion importante : $31,31 < \text{Ampl.max} < 55,14$, aucun intervalle restreint n'est ressorti de l'expérience, nous n'avons pu que distinguer l'intervalle {30 ;40} qui a contenu 6 valeurs sur 9.

Pour le chien malade, la dispersion, également présente, a été moindre : $32,12 < \text{Ampl.max} < 44,58$, 5 valeurs sur 9 dans l'intervalle {40 ;45} et 8 valeurs sur 9 dans l'intervalle {35 ;45}.

La comparaison entre les deux courbes a été limitée du fait de la différence de dispersion, l'amplitude pour le chien malade a été légèrement supérieure.

3) Cheville

Nous devons en premier lieu préciser que lors d'une séance, les résultats du chien sain du lot 1 ont été très différents des autres et atypique. Une erreur due au matériel ou aux manipulations peut aisément être suspectée. Les mesures relevées lors de cette séance n'ont donc pas été prises en compte et le nombre total de mesures pour cette articulation n'est plus que de 18 pour cet animal.

a) Hauteur

(i) *Hauteur en avant*

- Lot 1

Dans le lot 1, pour le chien sain, les valeurs obtenues sont regroupées : $0,20 < H.av/H < 0,34$ avec 15 mesures sur 19 dans l'intervalle $\{0,20 ; 0,30\}$.

Pour le chien malade, les mesures ont également été constantes : $0,08 < H.av/H < 0,22$ et 10 mesures sur 15 dans l'intervalle $\{0,10 ; 0,20\}$.

Une différence constante a été mise en évidence entre les deux courbes, le chien sain ayant un rapport supérieur à celui du chien atteint.

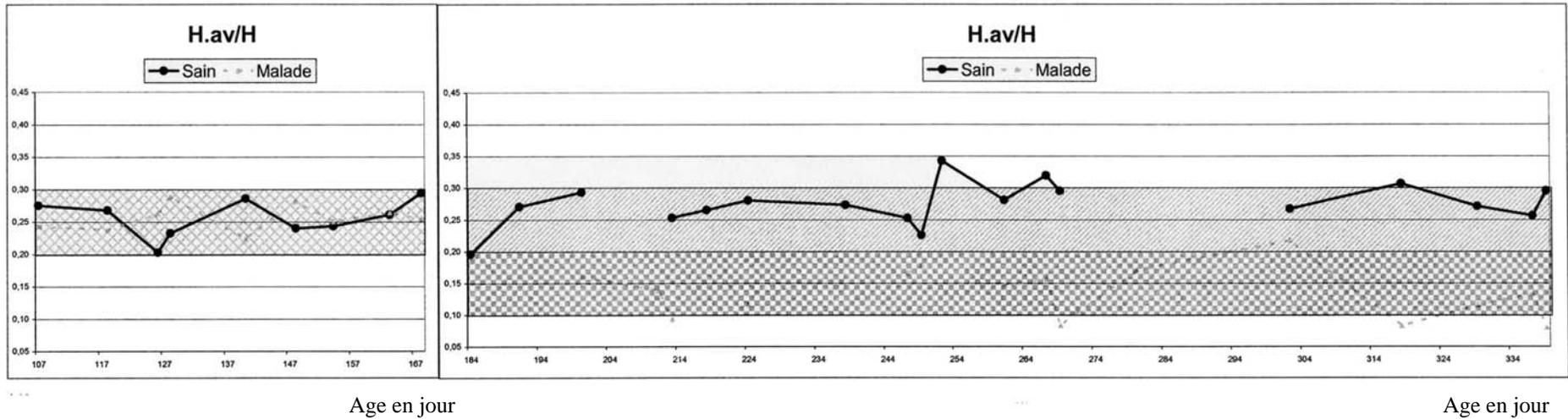
- Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien sain, les mesures sont apparues très stables : $0,20 < H.av/H < 0,29$. Pour le chien atteint, les valeurs ont aussi été constantes : $0,22 < H.av/H < 0,29$ et 6 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,24 ; 0,26\}$. En comparant les deux animaux, aucune différence particulière n'a été décelée.

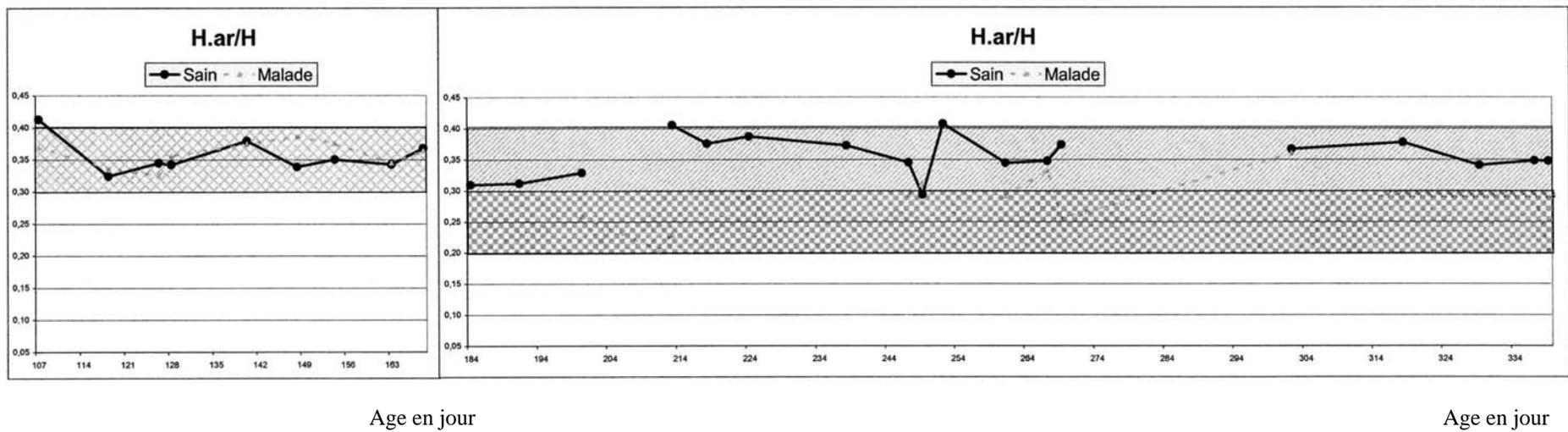
-  Animal sain
-  Animal malade
-  Zone de recouvrement

Figure 31 : Evolution des paramètres de hauteurs en avant (1) en arrière (2) pour le marqueur de la cheville

1



2



(ii) *Hauteur en arrière*

- Lot 1

Dans le lot 1, concernant le chien sain, nous avons obtenu des résultats stables : $0,29 < H_{av}/H < 0,41$ et 15 mesures sur 19 dans l'intervalle $\{0,30 ; 0,40\}$.

Pour le chien dystrophique, les résultats ont également montré une certaine constance : $0,20 < H_{av}/H < 0,36$ et 11 mesures sur 15 dans l'intervalle $\{0,20 ; 0,30\}$.

La comparaison des deux courbes a montré une différence constante entre les deux chiens, le rapport étant supérieur pour le chien sain.

- Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien sain, les valeurs obtenues ont été stables : $0,32 < H_{av}/H < 0,41$ et 8 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,30 ; 0,40\}$. Pour le chien atteint, nous avons également observé une stabilité importante : $0,33 < H_{av}/H < 0,39$. En comparant les deux courbes, nous n'avons pas relevé de différence significative.

(iii) *Hauteur au centre*

- Hauteur moyenne au centre

Lot 1

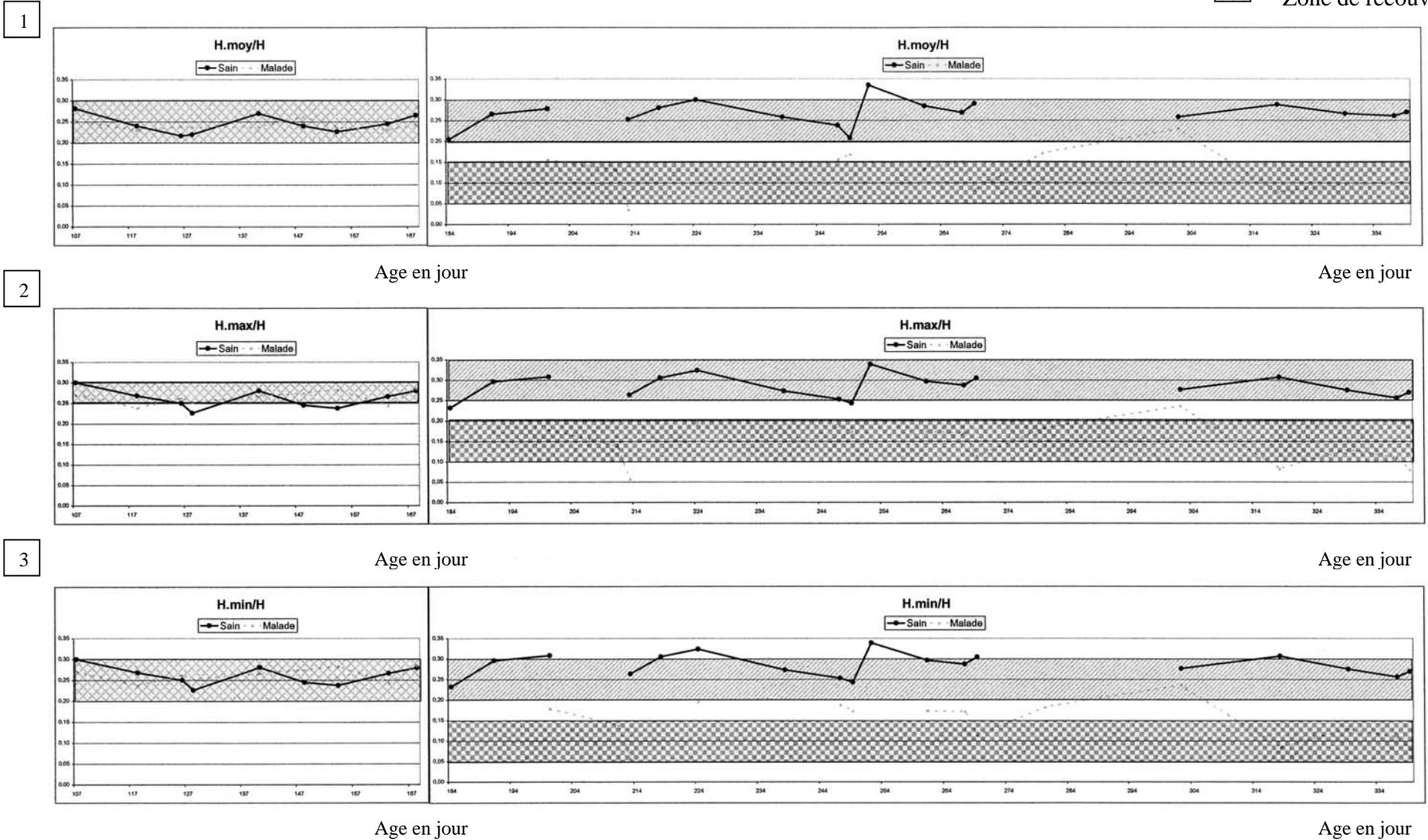
Concernant la hauteur moyenne au centre, dans le lot 1, pour le chien normal, la stabilité des résultats a été remarquable : $0,20 < H_{moy} < 0,33$ avec 17 mesures sur 19 dans l'intervalle $\{0,20 ; 0,30\}$.

Pour le chien dystrophique, nous avons obtenu des valeurs constantes : $0,04 < H_{moy} < 0,23$ avec 9 mesures sur 15 dans l'intervalle $\{0,05 ; 0,15\}$.

En comparant les deux courbes, il est apparu une différence notable, le chien sain ayant un rapport plus élevé.

-  Animal sain
-  Animal malade
-  Zone de recouvrement

Figure 32 : Evolution des paramètres de hauteurs au centre moyenne (1) maximale (2) et minimale (3) pour le marqueur de la cheville



Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien sain, les résultats ont été très stables : $0,22 < H.moy < 0,28$ et 6 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,20 ; 0,25\}$. Pour le chien atteint, les valeurs obtenues ont été encore plus constantes : $0,23 < H.moy < 0,26$. La comparaison des deux courbes n'a pas permis de mettre en évidence de différence entre les animaux.

- Hauteur maximale au centre

Lot 1

Pour le lot 1, concernant le chien sain, nous avons obtenu des mesures constantes : $0,23 < H.max/H < 0,34$ avec 16 valeurs sur 19 dans l'intervalle $\{0,25 ; 0,35\}$.

Pour le chien malade, les valeurs obtenues ont été stables : $0,06 < H.max/H < 0,24$ et 11 mesures sur 15 dans l'intervalle $\{0,10 ; 0,20\}$.

En comparant les deux courbes, une différence constante a pu être relevée, le chien sain montrant un rapport supérieur.

Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien sain, les résultats obtenus ont été très stables : $0,23 < H.max/H < 0,30$ avec 6 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,25 ; 0,30\}$. Les valeurs mesurées pour le chien malade ont également montré une constance importante : $0,24 < H.max < 0,28$ avec 7 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,25 ; 0,30\}$. La comparaison des deux courbes n'a pas mis en évidence de différence entre les deux animaux.

- Hauteur minimale au centre

Lot 1

Dans le lot 1, pour le chien sain, les résultats ont été constant : $0,11 < H.min/H < 0,31$ avec 14 mesures sur 19 dans l'intervalle $\{0,20 ; 0,30\}$.

Pour le chien malade, nous avons trouvé des valeurs stables : $0,01 < H.min/H < 0,15$ avec 12 mesures sur 15 dans l'intervalle $\{0,05 ; 0,15\}$.

La comparaison des deux courbes a montré une différence constante entre les deux animaux, le chien normal ayant un rapport supérieur.

Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien normal, les résultats trouvés ont été constants : $0,17 < H_{\min}/H < 0,26$ et 6 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,20 ; 0,25\}$. Concernant le chien dystrophique, nous avons relevé des valeurs stables : $0,17 < H_{\min}/H < 0,24$ et 5 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{0,19 ; 0,21\}$. En comparant les deux séries de résultat, nous n'avons pas noté de différence entre les deux animaux.

b) Angles

(i) Angle en avant

- Angle en avant moyen

Lot 1

Dans le lot 1, concernant le chien normal, les valeurs obtenues ont été regroupées : $76,08 < A_{\text{av.moy}} < 88,76$ avec 11 valeurs sur 18 comprises dans l'intervalle $\{80 ; 85\}$ et 15 valeurs sur 18 comprises dans l'intervalle $\{75 ; 85\}$.

Pour le chien atteint, les résultats ont été plus dispersés : $58,51 < A_{\text{av.moy}} < 104,18$. Nous avons cependant pu noter une augmentation de l'angle : $58,51 < A_{\text{av.moy}} < 73,46$ en début, 8 valeurs sur 9 dans l'intervalle $\{75 ; 85\}$ en fin d'expérience.

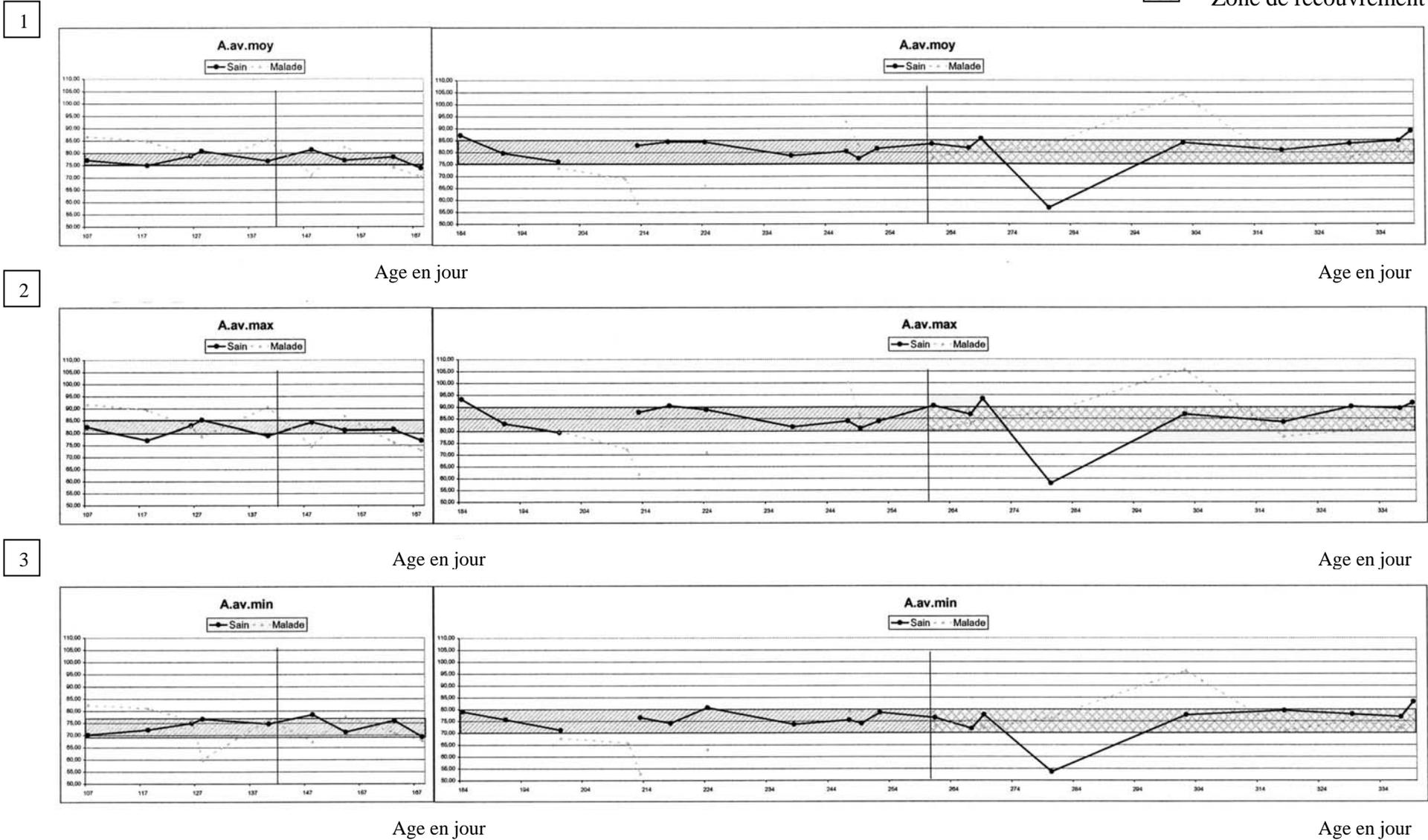
La comparaison des deux courbes, difficile en raison des disparités pour le chien malade, a montré une différence initiale qui a disparu totalement en fin de manipulation.

Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien normal, les valeurs mesurées ont été très constantes : $73,69 < A_{\text{av.moy}} < 81,28$ avec 6 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{75 ; 80\}$.

-  Animal sain
-  Animal malade
-  Zone de recouvrement

Figure 33 : Evolution des paramètres d'angles en avant moyen (1) maximal (2) et minimal (3) pour le marqueur de la cheville



Pour le chien malade, nous avons observé une diminution légère de l'angle, $75,24 < A.av.moy < 86,67$ pour le premier mois avec 4 valeurs sur 5 dans l'intervalle {75 ;85} et pour le second mois $70,11 < A.av.moy < 82,49$ avec 3 valeurs sur 4 dans l'intervalle {70 ;75}.

En comparant les deux courbes, nous avons noté une inversion du rapport entre les deux animaux, le chien malade ayant un angle supérieur en début d'étude, inférieur en fin.

- Angle avant maximal

Lot 1

Dans le lot 1, pour le chien sain, nous avons obtenu des valeurs relativement stables : $79,36 < A.av.max < 93,27$, aucun intervalle restreint n'a pu être mis en évidence, cependant, 15 valeurs sur 18 ont été comprises dans l'intervalle {80 ;90}.

Pour le chien malade, les résultats sont apparus variables : $61,82 < A.av.max < 105,78$. Toutefois, nous avons décelé une augmentation de l'angle : $61,82 < A.av.max < 79,88$ en début du protocole ; 7 valeurs sur 9 comprises dans l'intervalle {80 ;90} en fin.

En comparant les deux courbes, nous avons noté une différence initiale entre les deux courbes, différence qui s'est estompée ensuite.

Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien sain, les résultats ont été stables : $76,85 < A.av.max < 85,18$ avec 6 mesures sur 9 dans l'intervalle {80 ;85}.

Chez le chien malade, l'angle a légèrement diminué : $78,45 < A.av.max < 91,59$ pour le premier mois avec 3 valeurs sur 5 dans l'intervalle {80 ;90} puis $72,89 < A.av.max < 86,86$ pour le mois suivant avec 3 valeurs sur 4 dans l'intervalle {72 ;76}.

La comparaison des deux courbes a montré une différence entre les deux animaux : le chien malade a eu un angle supérieur en début d'analyse par rapport au chien sain, puis un angle inférieur en fin d'analyse.

- Angle en avant minimal

Lot 1

Dans le lot 1, pour le chien normal, les valeurs mesurées ont été très stables : $71,19 < A.av.min < 83,14$ avec 12 mesures sur 18 dans l'intervalle $\{75 ; 80\}$ et 15 sur 18 dans l'intervalle $\{73 ; 80\}$.

Pour le chien malade, les paramètres mesurés ont été plus variables : $52,79 < A.av.min < 96,20$. Cependant, les valeurs en début de protocole sont plus faibles que celles en fin : $52,79 < A.av.min < 67,74$ au début puis 8 valeurs sur 9 dans l'intervalle $\{70 ; 77\}$ en fin de protocole.

En comparant les deux courbes, nous avons vu une différence présente au début, différence qui a quasiment disparu en fin d'expérience.

Lot 2

Dans le lot 2, chez le chien normal, nous avons observé des valeurs stables : $69,28 < A.av.min < 78,44$ avec 5 valeurs sur 9 dans l'intervalle $\{70 ; 75\}$ et 8 sur 9 dans l'intervalle $\{69 ; 77\}$.

Chez le chien malade, les mesures ont été très variables : $59,77 < A.av.min < 82,35$. Toutefois, l'angle a semblé diminuer pendant la période d'étude : 4 valeurs sur 5 dans l'intervalle $\{75 ; 83\}$ pendant le premier mois, 3 valeurs sur 4 dans l'intervalle $\{67 ; 71\}$ pour le mois suivant.

Il s'est avéré difficile de comparer une série de mesures stables et une série de mesures variables. Cependant, nous avons remarqué que l'angle a été supérieur pour le chien malade au début, puis inférieur en fin, vis-à-vis de l'angle du chien sain.

(ii) *Angle en arrière*

- Angle en arrière moyen

Lot 1

Dans le lot 1, pour le chien sain, l'ensemble des mesures a été très regroupé : $105,35 < A.ar.moy < 129,55$ avec 11 mesures sur 18 dans l'intervalle $\{120 ; 125\}$ et 15 mesures dans l'intervalle $\{120 ; 130\}$.

Pour le chien malade, les valeurs ont été très variables : $103,18 < A.ar.moy < 179,66$. L'angle a semblé augmenter, avec 7 mesures sur 8 dans l'intervalle $\{103 ; 114\}$ pour les trois premiers mois, puis 6 mesures sur 7 dans l'intervalle $\{115 ; 123\}$ pour les deux mois suivants.

Lorsque nous avons comparé les deux animaux, il est apparu que l'angle a été inférieur pour le chien malade en début de protocole, puis cette différence s'est estompée en fin de protocole.

Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien normal, les valeurs obtenues ont été constantes : $116,31 < A.ar.moy < 126,39$ et 7 valeurs sur 9 dans l'intervalle $\{122 ; 127\}$.

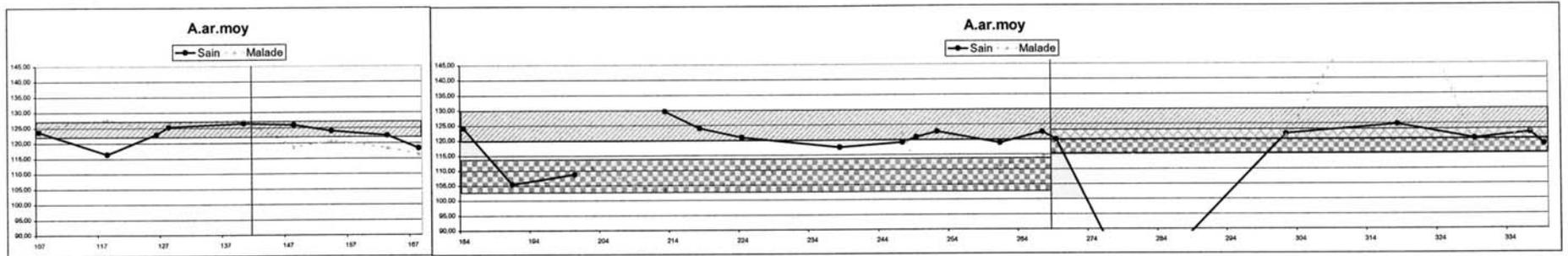
Chez le chien atteint, l'angle a diminué au cours du temps : $124,13 < A.ar.moy < 127,51$ pour le premier mois, puis $116,33 < A.ar.moy < 120,78$ pour le mois suivant.

La comparaison des deux courbes a montré que l'angle du chien malade a été supérieur à celui du chien sain en début d'analyse pour devenir inférieur à partir du second mois.

-  Animal sain
-  Animal malade
-  Zone de recouvrement

Figure 34 : Evolution des paramètres d'angles en arrière moyen (1) maximal (2) et minimal (3) pour le marqueur de la cheville

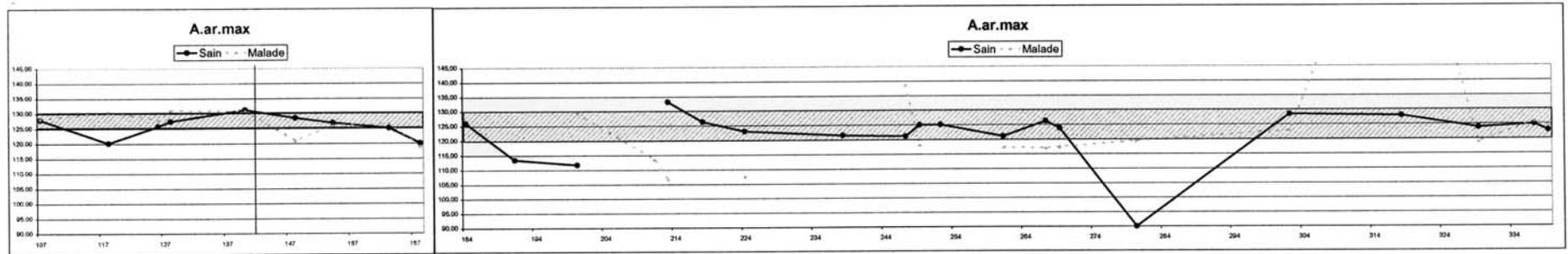
1



Age en jour

Age en jour

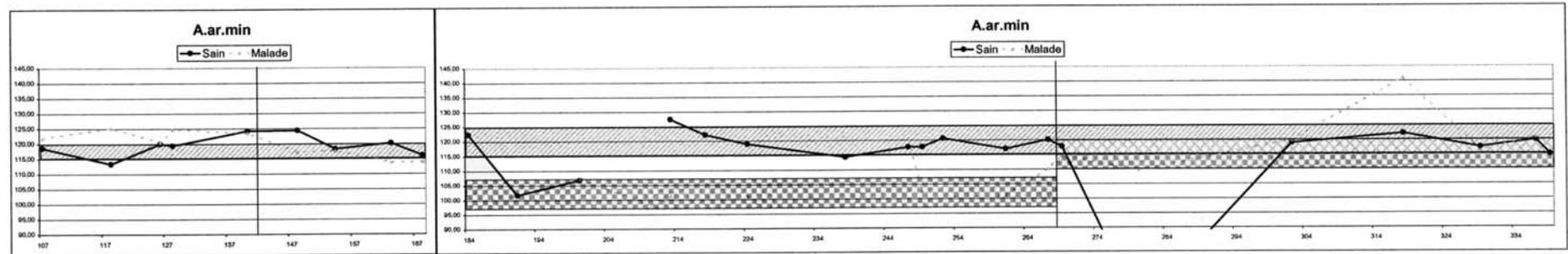
2



Age en jour

Age en jour

3



Age en jour

Age en jour

- Angle en arrière maximal

Lot 1

Dans le lot 1, pour le chien normal, les mesures ont été très constantes : $111,68 < A.ar.max < 133,22$ avec 10 mesures sur 18 dans l'intervalle $\{120 ; 125\}$ et 15 mesures sur 18 dans l'intervalle $\{120 ; 130\}$. Chez le chien malade, les mesures ont montré une variabilité importante : $106,66 < A.ar.max < 218,31$ avec cependant 10 valeurs sur 15 dans l'intervalle $\{115 ; 130\}$ d'amplitude importante. La comparaison des deux courbes a souligné la différence de constance des deux séries de valeurs et n'a pas permis de mettre en évidence de différence entre les deux animaux.

Lot 2

Dans le lot 2, chez le chien sain, l'angle a peu varié pendant l'analyse : $119,95 < A.ar.max < 131,16$ avec 6 mesures sur 9 dans l'intervalle $\{125 ; 130\}$.

Pour le chien malade, l'angle a diminué pendant l'analyse : $127,93 < A.ar.max < 131,01$ pour le premier mois, $119,02 < A.ar.moy < 126,05$ pour le second mois.

En comparant les deux courbes, nous avons remarqué l'inversion du rapport entre les deux chiens : l'angle du chien malade a été initialement supérieur, pour devenir inférieur en fin d'analyse.

- Angle en arrière minimal

Lot 1

Dans le lot 1, chez le chien sain, les mesures se sont révélées stables : $101,56 < A.ar.min < 127,48$ avec 10 mesures sur 18 dans l'intervalle $\{115 ; 120\}$ et 13 mesures dans l'intervalle $\{115 ; 125\}$.

Pour le chien malade, les mesures ont été variables : $97,19 < A.ar.min < 141,01$. L'angle a augmenté au cours de l'expérience : 6 mesures sur 7 dans l'intervalle $\{97 ; 107\}$ pendant les deux premiers mois, et $109,50 < A.ar.min < 141,01$ avec 6 valeurs sur 8 dans l'intervalle $\{110 ; 120\}$ pour les trois mois suivants.

En comparant les deux courbes, nous avons remarqué une différence initialement présente, qui s'est estompée au fur et à mesure du temps.

Lot 2

Dans le lot 2, pour le chien normal, les mesures ont été constantes : $113,26 < A.ar.min < 124,30$ et 6 mesures sur 9 dans l'intervalle {115 ;120}.

L'angle du chien malade a diminué au cours des manipulations : $120,48 < A.ar.min < 125,08$ pour le premier mois et $113,85 < A.ar.min < 117,61$ pour le second mois.

L'angle du chien malade a été supérieur à celui du chien sain en début de protocole, pour devenir inférieur en fin de protocole.

(iii) Amplitude

- Amplitude moyenne

Lot 1

Dans le lot 1, pour le chien sain, nous avons relevé des valeurs relativement stables : $25,76 < Ampl.moy < 46,66$ avec 10 mesures sur 18 dans l'intervalle {35 ;40} et 13 mesures sur 18 dans l'intervalle {35 ;45}. Pour le chien malade, les mesures ont été légèrement plus variables : $16,81 < Ampl.moy < 104,08$ et surtout 10 mesures sur 15 dans l'intervalle {30 ;40}. La comparaison des deux courbes n'a pas permis de mettre en évidence de différence notable entre les deux chiens.

Lot 2

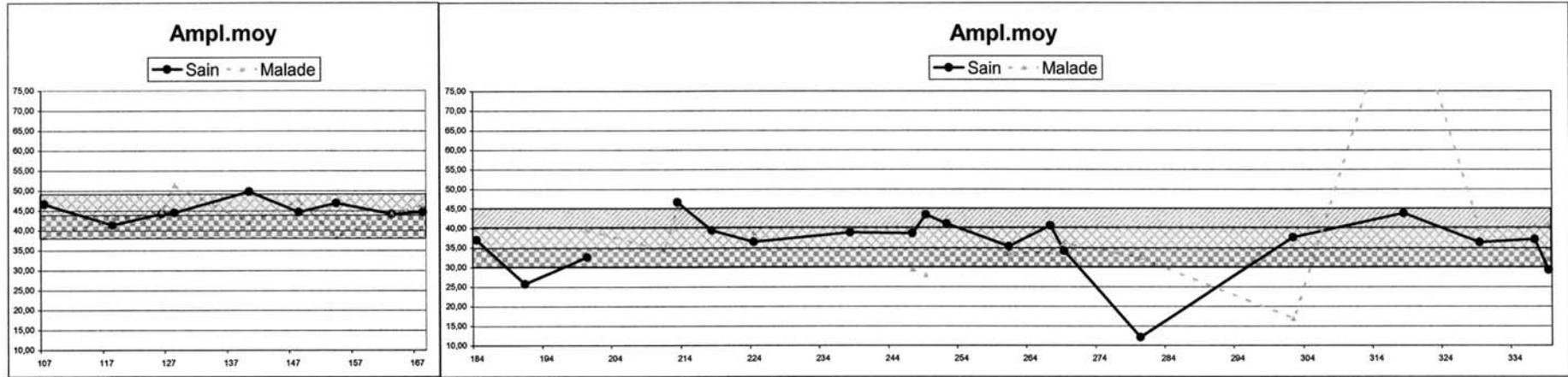
Dans le lot 2, pour le chien normal, les mesures ont été très constantes : $41,39 < Ampl.moy < 49,71$ et 7 mesures sur 9 comprises dans l'intervalle {44 ;47}.

Chez le chien atteint, nous avons obtenu des résultats relativement stables : $38,28 < Ampl.moy < 51,27$, aucun intervalle restreint n'est ressorti, cependant nous avons relevé 8 valeurs sur 9 comprises dans l'intervalle {38 ;48}.

-  Animal sain
-  Animal malade
-  Zone de recouvrement

Figure 35 : Evolution des paramètres d'amplitudes moyennes (1) et maximales (2) pour le marqueur de la cheville

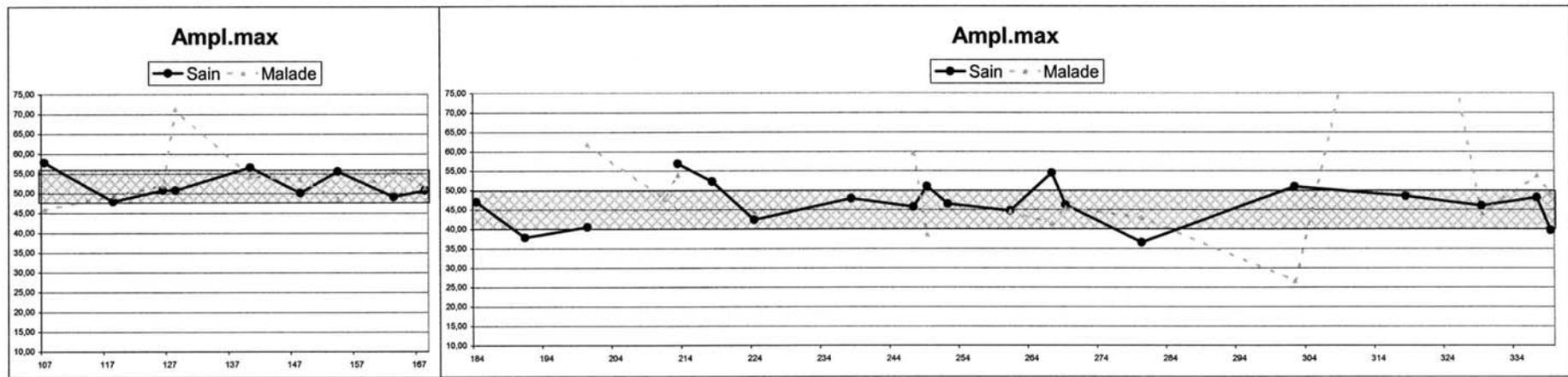
1



Age en jour

Age en jour

2



Age en jour

Age en jour

La comparaison n'a pas semblé facile en raison de la différence de stabilité des paramètres, néanmoins l'amplitude du chien sain a semblé être supérieure à celle du chien atteint.

- Amplitude maxi

Rapport-Gratuit.com

V. Discussion

A. Discussion du protocole expérimental

1) Méthode

- Analyse en deux dimensions

Nous avons utilisé une caméra analogique reliée à un ordinateur. Nous avons donc travaillé sur un plan en 2 dimensions. Les mouvements du chien dans le plan horizontal ne peuvent être détectés par une seule caméra. L'analyse en 2 dimensions facilite les mesures et les interprétations, cependant elle induit nécessairement une imprécision importante des mesures, imprécision impossible à quantifier pour chaque mesure. En effet, les mouvements de rapprochement et d'éloignement par rapport à la caméra, ainsi que les mouvements obliques dans ce même plan ne sont pas évalués. Par conséquent, une analyse cinématique en 2 dimensions **ne peut fournir de résultats très précis.**

- Mouvement des masses molles

Les marqueurs ont été placés sur la projection des surfaces osseuses au niveau cutané. Cette projection a toujours été repérée avec l'animal dans la même position (animal au repos, membre à l'appui). Cependant, au cours de la locomotion, les masses molles, c'est-à-dire l'ensemble peau-muscle, ont un mouvement différent de celui des segments osseux. Cela signifie qu'une articulation se projette à des endroits différents sur la peau, suivant sa position. Cette position est surtout influencée par son degré d'ouverture (flexion ou extension), et par la position des rayons osseux adjacents mais également par la position des articulations du même membre. Donc, les marqueurs placés correctement reflètent bien l'articulation au repos, mais ils ne correspondent plus précisément à l'articulation pendant le mouvement. Cela induit une **imprécision résiduelle.**

La méthode utilisée ici pour réduire ces imprécisions est celle de la reconnaissance de forme. Le système d'analyse ne prend en compte le marqueur que si celui-ci a une forme circulaire ou légèrement elliptique. Si le marqueur est trop déformé par rapport à la forme

reconnue initialement (déformation liée aux déplacements latéraux du chien, ou aux mouvements des masses molles) l'image ne sera pas considérée comme correcte.

- Placement des marqueurs

Les marqueurs ont été systématiquement placés par le même manipulateur. Ceci a été strictement respecté dans le but de standardiser au maximum leur position d'une analyse à l'autre. Néanmoins, malgré toutes les précautions prises, il existe toujours une variation résiduelle, liée à la **variation** de placement des marqueurs.

- Echantillon d'images
 - Précision

En outre, le nombre d'images prises en compte a été nécessairement variable d'un chien à l'autre. Nous avons déterminé arbitrairement une séance correcte comme une séance avec plus de 50 images prises en compte. Cependant, sur l'ensemble des séances, le nombre d'images correctes a été très variable (de 51 à 300). Cette variation a eu pour conséquence directe la **variation** de la précision des mesures. Ainsi, sur l'ensemble des mesures, la taille de l'échantillon a été très variable, ce qui a induit des intervalles de confiance à 5% très différents. Cependant, pour l'ensemble des mesures, les intervalles de confiance calculés sont restés faibles en relation avec la valeur brute qui s'y rapporte : moins de 2% par rapport à la valeur moyenne pour les mesures concernant la hanche, moins de 5% pour celles concernant le genou, moins de 6% pour celles concernant la cheville.

- Exactitude

Nous avons observé de 20 à 35 foulées pendant l'enregistrement de 30 secondes, suivant les animaux et le déficit locomoteur. Dans le cas où le nombre d'images est faible, nous avons très peu d'images correctes par foulée, parfois moins de deux. Cet état de fait a limité la précision des mesures comme nous venons de le dire.

Mais surtout, cet état de fait amène à s'interroger sur la prise en compte des images par la machine. En effet, dans les cas où nous avons disposé d'une ou de deux images correctes par foulée, il n'a pu être exclu que ces images aient correspondu toujours au même

instant de la foulée, pour lesquelles la position des marqueurs ait été optimum, tout comme l'éclairage et la position de la caméra. Les mesures obtenues auraient alors été précises, puisque le même instant est pris en compte à chaque foulée, mais l'échantillon d'image n'aurait plus été pris au hasard. Ce biais, engendré par la prise en compte automatique des images sans qu'il soit possible d'identifier précisément l'image considérée, a été un inconvénient majeur, l'exactitude des mesures n'est plus certaine.

- Particularité du marqueur de la cheville

De plus, le principe de l'analyse d'images consiste en une reconnaissance de forme et de couleur. Nous avons travaillé avec des **marqueurs noirs sur fond blanc**. Cependant, la bande de défilement du tapis roulant était noire. Cela a pu perturber la reconnaissance du capteur correspondant à la cheville. De fait, cela peut expliquer certaines acquisitions difficiles avec un faible nombre d'images et certains résultats atypiques.

2) Logiciel

Nous avons utilisé un logiciel de cinématique déjà fabriqué. Ce logiciel n'a cependant pas donné totale satisfaction.

- Calibration

La calibration de la machine a du être faite systématiquement avant chaque animal. Ensuite, cette même calibration pour une séance est faite à l'aide de la hauteur au garrot du chien mesurée par le manipulateur. Cette méthode a induit nécessairement une imprécision, du fait de la mesure, **imprécision qui varie à chaque séance**, du fait de la répétition obligatoire. Un système de calibration unique, à l'aide d'un segment identifié de longueur fixe et précise, aurait permis de limiter ces variations : la longueur fixe aurait limité l'imprécision liée à la mesure. Il serait resté néanmoins une imprécision résiduelle, qui aurait eu cependant un effet stable pour toutes les séances, du fait de la calibration unique.

- Données fournies

Le logiciel a fourni des résultats bruts qui ont correspondu aux **moyennes** des variables calculées sur l'ensemble des foulées observées. Cependant, il est préférable d'analyser une **courbe** et par conséquent une trajectoire, plutôt que des valeurs particulières. Ainsi, il est à présent conseillé d'utiliser les équations d'analyse de Fourier pour décrire précisément la trajectoire à chaque instant et non uniquement des valeurs particulières.

De plus, le calcul automatique d'une moyenne a gommé toutes les irrégularités de foulées. Cet inconvénient a été particulièrement important dans le cadre de notre étude, les animaux atteints de myopathie dystrophique ayant une locomotion très irrégulière.

3) Réalisation des manipulations

- Taille de l'effectif

Le nombre initial de chien (6) était **faible**. De surcroît, l'expression importante de la maladie chez deux sujets et leurs difficultés à se mouvoir a conduit à les exclure de l'étude. Au final, l'étude n'a porté que sur quatre individus.

- Comparaison difficile entre sujets atteints et témoins

En outre, les sujets atteints ont présenté un retard de croissance important. La taille et plus généralement le **format** sont des éléments à ne pas négliger lors d'analyse biomécanique. En effet, la locomotion est légèrement différente en fonction du gabarit des animaux étudiés. Par souci de précision, il est conseillé généralement de se limiter à une seule race si possible, ou à un seul format. Nous avons utilisé ici des Golden Retriever, mais la différence de taille due au retard de croissance a limité la pertinence des mesures et des comparaisons.

De plus, comme nous l'avons déjà mentionné, les animaux malades ont présenté un niveau d'atteinte très différent. Il est ainsi difficile de comparer strictement l'évolution de ces deux animaux.

En outre, cette variation du niveau d'atteinte a conduit à étudier des chiens dont le **potentiel locomoteur était très variable**. En conséquence, les essais n'ont pu être réitérés, les animaux malades n'étant pas toujours capables de marcher plus d'une à deux minutes. Cela a

induit de nombreuses données manquantes dans le protocole, et des durées de manipulation variables. En outre, la **fatigue** est intervenue différemment selon les chiens. Il est logique de penser qu'un chien fatigué a présenté des résultats différents d'un animal dont le premier essai a été satisfaisant. Cet état de fait a également été une source de variation des mesures.

- Autres sources de variation

Enfin, les animaux étudiés étaient des animaux en **croissance**. En plus de la différence de format entre les animaux sains et les animaux malades, le format a évolué au cours de la période d'analyse. Ainsi, certains chiens ont grandi d'environ 10 centimètres. L'intervention de la croissance a donc ajouté une variation aux mesures.

Au final, nous avons pu dégager **cinq sources de variation** : les variations inter-individuelles, les variations journalières, les variations liées à la croissance de l'animal, les variations liées à l'évolution et à l'expression de la maladie, la variation résiduelle.

L'ensemble des imprécisions recensées, les cinq sources de variation dégagées, la petite taille de l'échantillon, et les variations de mesures intra et inter-lot ont conduit à mener l'interprétation des mesures selon une comparaison des résultats deux à deux. Nous avons tenté d'exprimer des tendances générales par animal. L'obtention de données plus précises et notamment l'établissement de différences significatives nécessiteront des recherches ultérieures.

B. Discussion des résultats

En premier lieu, il convient de préciser que nos résultats ont été **difficilement comparables** avec ceux de la littérature.

En effet, nos mesures ont été effectuées à 1,5 km/h soit 0,40 m/s. Cette vitesse correspond à un pas très lent pour un animal normal, cependant, ce fut déjà une vitesse importante pour les animaux malades étudiés. Cette faible vitesse n'est donc pas recensée dans la littérature.

De plus, nous avons utilisé un système de **mesure atypique**. Ainsi, nous avons considéré deux mouvements pendulaires du genou et de la cheville par rapport à l'articulation

de la hanche considérée comme fixe. Nous n'avons pas utilisé de marqueur sur le squelette axial ou sur d'autres structures du bassin. Donc la seule amplitude articulaire qu'il serait possible de calculer est celle du genou. Cependant, en raison des imprécisions du système, mentionnées précédemment, il serait illusoire de procéder à un calcul mathématique complexe avec ces données dans le but d'obtenir un résultat fiable. Nos mesures n'ont donc pas été celles couramment utilisées.

Enfin, nous avons travaillé avec des animaux en croissance. Il s'agit d'un cas de figure qui n'a jamais encore été décrit, même pour des sujets normaux. A la connaissance de l'auteur, il n'existe aucune référence disponible sur la modification des paramètres cinématiques avec la croissance.

1) Résultats pour la hanche

Nous avons remarqué une grande constance des paramètres de hauteurs moyenne et maximale. La hauteur minimale a semblé plus variable. Les hauteurs moyenne et maximale ont donc semblé les plus fiables.

Dans le lot 1, nous avons observé l'apparition d'une différence entre les deux animaux dans le dernier mois d'analyse soit quand les animaux sont âgés de 10 mois. En effet, les hauteurs ont diminué pour le chien malade. Cela a correspondu à une **baisse** du marqueur représentant la hanche par rapport à la hauteur totale du chien.

Dans le lot 2, les hauteurs n'ont pas été différentes entre les deux animaux pendant le temps de l'analyse, soit entre 3 ½ mois et 5 ½ mois.

2) Résultats pour le genou

- Hauteurs

Concernant les hauteurs, pour le lot 1, nous avons observé une grande constance des différents paramètres : hauteur en avant, hauteur en arrière, hauteurs au centre moyenne, minimale et maximale.

Nous avons remarqué une différence entre le sujet sain et le sujet atteint, le marqueur correspondant au genou étant constamment situé **plus haut** pour le chien sain, avec pour certains paramètres un domaine de superposition. De plus, cette différence a augmenté dans le dernier mois au moment où les animaux sont âgés de 10 mois.

Dans le lot 2, la même stabilité des paramètres a été relevée, à l'exception de la hauteur en avant pour le chien malade.

Nous n'avons jamais mis en évidence de différence entre les chiens sur la période d'analyse soit entre 3 ½ et 5 ½ mois.

- Angles
 - Angle en avant

Concernant les angles en avant, dans le lot 1, les courbes sont restées relativement stables pour le chien sain, contrairement au chien malade pour lequel elles ont été plus ou moins variables. Cette différence de variabilité a limité la comparaison et l'interprétation des courbes. Cependant, pour tous les paramètres, l'angle du chien sain a été supérieur à celui du chien malade. Cette différence a admis quelques variations suivant la date et le paramètre considéré, mais elle ne s'est jamais inversée sur la période d'étude.

Dans le lot 2, les valeurs du chien sain ont été plus ou moins stables. Les paramètres du chien malade ont toujours évolué de la même façon. L'angle initialement supérieur à celui du chien sain, est devenu inférieur en fin d'analyse, la transition se faisant approximativement à 4 ½ mois.

Cette diminution, et l'inversion du rapport de force ont traduit le fait que le genou a été **de plus en plus proche de l'horizontale** de la hanche lorsque la hanche était en flexion. Nous avons observé en réalité une avancée de plus en plus importante du genou.

- Angle en arrière

Pour les angles en arrière, dans le lot 1, les mesures ont été très divergentes pour les deux animaux. Il a été très difficile d'établir une comparaison fiable.

Dans le lot 2, les mesures ont été plus instables que pour le lot 1. Nous n'avons pu comparer les courbes que pour les valeurs moyennes et minimales. Il en est ressorti que les paramètres du chien malade ont évolué de la même façon que précédemment dans le cas de l'angle en avant. Cette diminution et inversion de rapport montrent que le genou a été de plus en plus proche, en terme d'angle, de l'horizontale de la hanche quand la hanche était en extension. Cela signifie d'après le sens des angles que le genou en extension s'est rapproché de la colonne vertébrale. Il s'est produit en réalité une **avancée** de plus en plus importante du genou.

- Amplitude

Au sujet des amplitudes, dans le lot 1, les résultats ont été stables pour le chien sain, légèrement plus variables pour le chien malade, avec notamment une augmentation dans le dernier mois. Nous avons observé une légère différence entre les deux animaux, différence constante, qui s'est estompée néanmoins dans le dernier mois. L'amplitude du chien sain a été légèrement supérieure à celle du chien malade, cependant, cette différence a semblé sujette à variation.

Pour le lot 2, nous avons observé des valeurs très dispersées, avec néanmoins certains intervalles regroupant plusieurs mesures. Il est apparu que l'amplitude a varié faiblement pendant l'analyse, sans qu'il ait été possible de distinguer de tendance particulière. D'autre part, l'amplitude pour le chien atteint est apparue légèrement supérieure à celle du chien sain.

3) Résultats pour la cheville

- Hauteur

Concernant les hauteurs, nous avons toujours obtenu des résultats stables, pour les quatre chiens selon tous les paramètres. Dans le lot 1, nous avons observé une différence constante entre les deux sujets, le sujet sain montrant une cheville **plus haute** que le sujet

atteint ont initialement été supérieurs et sont devenus ensuite inférieurs. La cheville a été de plus en plus proche de l'horizontale de la hanche. Nous avons observé une **avancée de plus en plus importante** de la cheville du chien atteint lorsque le membre était en protraction.

- Angle en arrière

Pour les angles en arrière, dans le lot 1, nous avons observé comme pour les angles en avant, des mesures stables pour le chien sain, variables pour le chien malade, sauf après trois mois d'expérience. Nous n'avons pas mis en évidence de différence entre les deux animaux dans les trois derniers mois, au moment où les mesures ont été stabilisées. En conséquence, nous n'avons pas mis en évidence de différence pour ce paramètre entre les deux chiens à partir de 8 mois d'âge.

Dans le lot 2, nous avons observé comme pour l'angle en avant une diminution de l'angle du chien atteint et une grande constance des valeurs du chien sain. La cheville a été de plus en plus proche en terme d'angle de l'horizontale de la hanche. Cela signifie, d'après le sens des angles, que la cheville en propulsion s'est rapprochée de la colonne vertébrale. L'avancée de la cheville a été de plus en plus importante lorsque le membre était en propulsion.

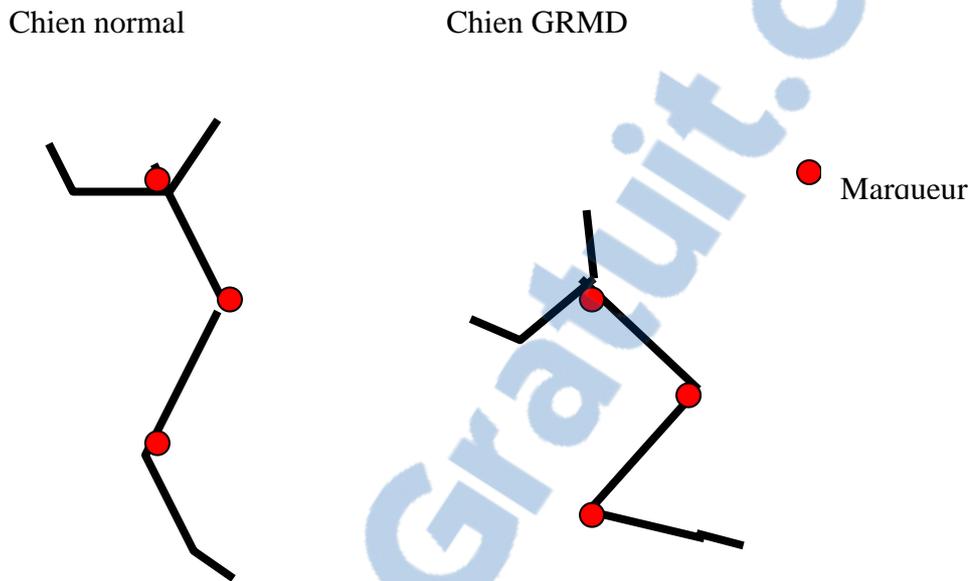
Au sujet des amplitudes, pour les chiens sains des deux lots, nous avons observé des valeurs stables, alors que pour les chiens atteints des deux lots, les valeurs ont été plus dispersées. Néanmoins, nous n'avons pas mis en évidence de différence particulière entre les animaux, ni de tendance remarquable d'évolution de l'amplitude en fonction du temps.

Au final, nous avons observé une plus grande variabilité des paramètres pour les chiens atteints. Ces animaux ont donc vraisemblablement eu des cycles de marche plus irréguliers. Les animaux atteints ont montré une hanche, un genou, et une cheville à hauteur égale ou inférieure à celle des chiens normaux. Les animaux atteints ont également montré des angles en protraction (avant) et en propulsion (arrière) égaux ou inférieurs à ceux des chiens sains. Les amplitudes n'ont pas semblé différentes.

Ces mesures ont correspondu à **l'affaissement du membre postérieur** : diminution des hauteurs et avancée du membre sous le corps de l'animal. En ce sens, elles ont été tout à fait conformes à ce que nous avons observé à l'œil nu (voir figure). Elles ont eu l'avantage de

pouvoir fournir une base de données répétables pour décrire plus précisément cet affaissement que par la simple observation visuelle.

Figure 36 : Schématisation de la stature d'un chien GRMD, comparaison avec un chien normal



En outre, les variations des différents paramètres : hauteur et angle, n'ont pas semblé concomitantes. Néanmoins, la grande disparité de l'atteinte des chiens utilisés, le faible nombre de sujet et les imperfections de la collecte des données limitent les conclusions à ce sujet.

Pour les mêmes raisons, l'établissement d'une différence précise, quantitative nécessite des investigations ultérieures.

Conclusion du troisième chapitre

La Myopathie Dystrophique du Golden Retriever est rare dans l'espèce canine. Mais elle constitue l'un des meilleurs modèles animal de la Myopathie Dystrophique de Duchenne. En conclusion de cette étude de cas pathologiques, nous pouvons dire que les anomalies de la démarche liées au développement de la myopathie dystrophique sont détectables et quantifiables grâce à l'analyse cinématique. Cependant, nous n'avons pu établir précisément cette quantification du fait des limites du protocole expérimental (matériel, effectif, atteinte des animaux...).

En outre, il faut souligner que dans le cas d'affections complexes comme la myopathie dystrophique, il est préférable de disposer d'une technique d'investigation complète : couplage cinétique et cinématique, étude des quatre membres simultanément et de foulées successives. Une telle technique permettrait de déterminer précisément les modifications du cycle de marche : les phases incriminées, les articulations touchées, et l'évolution de l'atteinte. En attendant de disposer d'un tel outil, notre étude a permis de mettre en évidence l'intérêt de l'analyse biodynamique pour l'étude des affections locomotrices.

CONCLUSION GENERALE

Nous avons donc étudié les deux principales techniques d'analyse de mouvement, à savoir la cinétique et la cinématique. Il est apparu qu'il est souvent souhaitable d'associer les deux techniques. L'intérêt potentiel de l'analyse de mouvement est important dans l'optique d'étude d'affection locomotrice, tant initialement sur le plan diagnostique que pronostic, puis lors du suivi et du contrôle. Elle constitue un test fonctionnel de la fonction locomotrice.

Le développement de l'analyse sur tapis roulant est une innovation technique originale pour les expériences biodynamiques. Notre étude a montré que cette technique était utilisable, avec une variabilité inférieure. La variation sur plusieurs jours, liée à l'entraînement, reste encore à explorer. Un autre élément clef de l'utilisation de cette technique est que la locomotion étudiée est une évolution inhabituelle pour l'animal, et que sa démarche s'en trouve légèrement modifiée.

Ainsi, nous avons pu expérimenter ce nouveau protocole d'analyse dans l'étude d'une affection locomotrice complexe : la myopathie dystrophique du Golden Retriever. Cette étude a donné des résultats limités, du fait de la technique de mesure cinématique utilisée, et de la complexité de l'affection. Toutefois, cette étude constitue une première approche et a montré que l'analyse sur tapis roulant est intéressante pour l'analyse de sujets malades.

Cette étude a également montré les différences entre les deux techniques biodynamiques : cinétique et cinématique. La cinétique est plus facile à employer. Elle fournit aisément des résultats précis, résultats peu nombreux et facilement interprétables. Cette technique est toutefois moins complète. Le constat est différent concernant la cinématique, pour laquelle il est difficile d'obtenir une exactitude et une précision satisfaisante. Elle fournit un grand nombre de données sur les trajectoires, dont l'interprétation en vue de dégager les critères discriminants est plus difficile. Mais elle permet une analyse plus exhaustive de la démarche.

Au final, la biodynamique est un outil de quantification de la locomotion, encore trop méconnu. L'analyse sur tapis roulant est une innovation qui simplifie les protocoles expérimentaux, dans le sens où la collecte des données est plus rapide et plus efficace. L'utilisation régulière d'un tapis roulant pour des analyses biodynamiques devrait permettre l'analyse plus courante de sujets pathologiques.

Glossaire des abréviations utilisées

ADN: Acide DésoxyriboNucléique

Ampl.max : amplitude angulaire maximale

Ampl.min : amplitude angulaire minimale

ARN: Acide RiboNucléique

A.ar.max : angle en arrière maximum

A.ar.min : angle en arrière minimum

A.ar.moy : angle en arrière moyen

A.av.max : angle en avant maximum

A.av.min : angle en avant minimum

A.av.moy : angle en avant moyen

CK : Créatine Kinase sérique

cm: centimètre

CXMD: Canine X-linked Muscular Dystrophy

DMD: Duchenne Muscular Dystrophy

Fx : force médiolatérale

Fy : force antéro-postérieure

Fyb : force antéro-postérieure de freinage

Fyp : force antéro-postérieure de propulsion

Fz :force verticale

GRMD : Golden Retriever Muscular Dystrophy

H : hauteur au garrot mesurée

Hz : Herz

H.max : hauteur maximale au centre

H.min : hauteur minimale au centre

H.moy : hauteur moyenne au centre

IFy : Impulse de la force antéro-postérieure

IFz : Impulse de la force verticale

km/h : kilomètres par heure

kg : kilogramme

m : mètre

ms : milliseconde

m/s : mètres par seconde

N : Newton

PCR : Polymerase Chain reaction

PFz : Pic de la force verticale

Pds : poids

s : seconde

St : durée de contact (stance)

Str : durée de la foulée (stride)

Tc : temps de contact en pourcentage de la foulée

Tv : temps de contact en pourcentage de la foulée

Tz : date desurvenue du pic de force verticale

UI/L : Unités internationales par litre

BIBLIOGRAPHIE

- 1 ALLEN K, DECAMP CE, BRADEN TD and BAHNS M. Kinematic gait analysis of the trot in healthy mixed breed dogs. *Vet Comp Orthop Traumatol* 1994, **7**, 148-153.
- 2 ANDERSON GI, HEARN T and TAVES C. Force plate gait analysis in normal and dysplastic dogs before and after total hip replacement surgery: an experimental study. *Vet Surg* 1988, **17**, 27.
- 3 ANDERSON MA. Force plate analysis : A non invasive tool for gait evaluation. *Compend Contin Educ Pract Vet* 1994, **16**, 857-867.
- 4 ANDERSON MA, MANN FA, WAGNER-MANN C, HAHN AW and JIANG BL. Comparison of three different type 1 external skeletal fixation pins using biomechanical testing and force plate analysis. *Vet Surg* 1992, **21**, 382.
- 5 ANDERSON MA, PAYNE JT, KREEGER JM, WAGNER-MANN CC, SCHMIDT DA and MANN FA. Effects of intra-articular chlorhexidine diacetate lavag on the stifle in healthy dogs. *Am J Vet Res* 1993, **54**, 1784-1789.
- 6 ASCHERO R. *Etude des torsions fémorales expérimentales à l'aide d'une plateforme de marche*. Thèse Méd. Vét., Toulouse, 1994.
- 7 ASHTON-MILLER JA, HE Y, KADHIRESAN VA, MCCUBBREY DA and FAULKNER JA. An apparatus to measure in vivo biomechanical behavior of dorsi- and plantarflexors of mouse ankle. *J. Appl. Physiol.* 1992, **72**, 1205-1211.
- 8 BACK W, SCHAMHARDT HC, HARTMAN W and BARNEVELD A. Kinematic differences between the distal portions of the forelims and hind limbs of horses at the trot. *Am J Vet Res* 1995, **56**, 1522-1528.
- 9 BALLIGAND M. *Etude des actions d'appui au sol chez le chien en déplacement*. Thèse Méd. Vét., Liège, 1988.
- 10 BARTEL DL, SCHRYVER HF, LOWE JE and PARKER RA. Locomotion in the horse: a procedure for computing the internal forces in the digit. *Am J Vet Res* 1978, **39**, 1721-1727.
- 11 BEALE BS and FOX SM. The science of evaluating lameness and pain relief. Soc. Pfizer, créé en 1999, accédé le 12 novembre 2002, dernière modification en 2002, [en-ligne], [<http://www.pfizer.com/ah/rimadyl/advances.html>].
- 12 BENNETT RL, DECAMP CE, FLO GL, HAUPTMAN JG and STAJICH M. Kinematic gait analysis in dogs with hip dysplasia. *Am J Vet Res* 1996, **57**, 966-971.
- 13 BENZANCON MF, CONZEMIUS MG and DERRICK TR. Comparison of vertical forces in normal dogs between the AMTI force platform and the Tek-Scan pressure walkway. *Vet Comp Orthop Traumatol* 2001, **14**, A1.
- 14 BERTRAM JEA, LEE DV, CASE HN and TODHUNTER RJ. Comparison of the trotting gaits of Labrador Retrievers and Greyhounds. *Am J Vet Res* 2000, **61**, 832-838.
- 15 BERTRAM JEA, LEE DV, TODHUNTER RJ, FOELS WS, WILLIAMS AJ and LUST G. Multiple force platform analysis of the canine trot: a new approach to

- assessing basic characteristics of locomotion. *Vet Comp Orthop Traumatol* 1997, **10**, 160-169.
- 16 BIEWENER AA, THOMASON J, GOODSHIP A and LANYON LE. Bone stress in the horse forelimb during locomotion at different gaits: a comparison of two experimental methods. *J Biomech* 1983, **16**, 565-576.
- 17 BLOT S and FUHRER L. Les myopathies des carnivores domestiques. Deuxième partie : étude spéciale. *Prat. Méd. Chir. Anim. Comp.* 1995, **30**, 27-43.
- 18 BOCCARDI S, CHIESA G and PEDOTTI A. New procedure for evaluation of normal and abnormal gait. *Am J Phys Med* 1977, **56**, 163-182.
- 19 BOUTRAND JP, DAVOUST B, CABASSU JP, MESURE S, DEPARIS X and GENEVOIS JP. Comparaison de la marche chez des chiens bergers allemands adultes normaux ou dysplasiques à l'aide d'un plateau dynamométrique. *Revue Med Vet* 1996, **147**, 813-818.
- 20 BUCHNER HHF, SAVELBERG HHCM, SCHAMHARDT HC, MERKENS HW and BARNEVELD A. Habituation of horses to treadmill locomotion. *Equine vet J Suppl* 1994, **17**, 13-15.
- 21 BUDSBERG SC. Outcome assessment in clinical trials involving medical management of osteoarthritis in small animals. *Vet Clin North Am* 1997, **27**, 815-823.
- 22 BUDSBERG SC. Long-term temporal evaluation of ground reaction forces during development of experimentally induced osteoarthritis in dogs. *Am J Vet Res* 2001, **62**, 1207-1211.
- 23 BUDSBERG SC, CHAMBERS JN, LUE SL, FOUTZ TL and REECE L. Prospective evaluation of ground reaction forces in dogs undergoing unilateral total hip replacement. *Am J Vet Res* 1996, **57**, 1781-1785.
- 24 BUDSBERG SC, JEVENS DJ, BROWN J, FOUTZ TL, DECAMP CE and REECE L. Evaluation of limb symmetry indices, using ground reaction forces in healthy dogs. *Am J Vet Res* 1993, **54**, 1569-1574.
- 25 BUDSBERG SC, JOHNSTON SA, SCHWARZ PD, DECAMP CE and CLAXTON R. Efficacy of etodolac for the treatment of osteoarthritis of the hip joints in dogs. *J Am Vet Med Assoc* 1999, **214**, 206-210.
- 26 BUDSBERG SC, RYTZ U and JOHNSTON SA. Effects of acceleration on ground reaction forces collected in healthy dogs at a trot. *Vet Comp Orthop Traumatol* 1999, **12**, 15-19.
- 27 BUDSBERG SC and VERSTRAETE MC. Canine center of pressure patterns during a trotting gait. *Vet Surg* 1993, **22**, 373-374.
- 28 BUDSBERG SC, VERSTRAETE MC, BROWN J and REECE L. Vertical loading rates in clinically normal dogs at a trot. *Am J Vet Res* 1995, **56**, 1275-1280.
- 29 BUDSBERG SC, VERSTRAETE MC and SOUTAS-LITTLE RW. Force plate analysis of the walking gait in healthy dogs. *Am J Vet Res* 1987, **48**, 915-918.
- 30 BUDSBERG SC, VERSTRAETE MC, SOUTAS-LITTLE RW, FLO GL and PROBST CW. Force plate analyses before and after stabilization of canine stifles for cruciate injury. *Am J Vet Res* 1988, **49**, 1522-1524.

- 31 BULFIELD G, SILLER WG, WIGHT PAL and MOORE KJ. X chromosome-linked muscular dystrophy (mdx) in the mouse. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 1984, **81**, 1189-1192.
- 32 CAVAGNA GA. Force platforms as ergometers. *J Appl Physiol* 1985, **39**, 174-179.
- 33 CAVAGNA GA, HEGLUND NC and TAYLOR CR. Mechanical work in terrestrial locomotion: two basic mechanisms for minimizing energy expenditure. *Am J Physiol* 1977, **233**, R243-R261.
- 34 CLAEYS R. The analysis of ground reaction forces in pathological gait secondary to disorders of the foot. *Int Orthop* 1983, **7**, 113-119.
- 35 CLAYTON HM. Comparison of the stride kinematics of the collected, medium, and extended walks in horses. *Am J Vet Res* 1995, **56**, 849-852.
- 36 CONZEMIUS MG, APER RL and HILL CM. Evaluation of a canine total-elbow arthroplasty system: a preliminary study in normal dogs. *Vet Surg* 2001, **30**, 11-20.
- 37 COOPER BJ, GALLAGHER EA, SMITH CA, VALENTINE BA and WINAND NJ. Mosaic expression of dystrophin in carriers of canine X-linked muscular dystrophy. *Laboratory investigation* 1990, **62**, 171-178.
- 38 COOPER BJ, WINAND NJ, STEDMAN H, VALENTINE BA, HOFFMAN EP, KUNKEL LM, *et al.* The homologue of the Duchenne locus is defective in X-linked muscular dystrophy of dogs. *Nature* 1988, **334**, 155-156.
- 39 CROSS AR, BUDSBERG SC and KEEFE TJ. Kinetic gait analysis assessment of meloxicam efficacy in a sodium urate-induced synovitis model in dogs. *Am J Vet Res* 1997, **58**, 626-631.
- 40 DECAMP CE. Kinetic and kinematic gait analysis and the assessment of lameness in the dog. *Vet Clin North Am Small Anim Pract* 1997, **27**, 825-840.
- 41 DECAMP CE, RIGGS CM, OLIVIER NB, HAUPTMAN JG, HOTTINGER HA and SOUTAS-LITTLE RW. Kinematic evaluation of gait in dogs with cranial cruciate ligament rupture. *Am J Vet Res* 1996, **57**, 120-126.
- 42 DECAMP CE, SOUTAS-LITTLE RW, HAUPTMAN J, OLIVIER B, BRADEN T and WALTON A. Kinematic gait analysis of the trot in healthy greyhounds. *Am J Vet Res* 1993, **54**, 627-634.
- 43 DOGAN S, MANLEY PA, VANDERBY JR R, KOHLES SS, HARTMAN LM and MCBEATH AA. Canine intersegmental hip joint forces and moments before and after cemented total hip replacement. *J Biomech* 1991, **24**, 397-407.
- 44 DOW SM, LEENDERTZ JA, SILVER IA and GOODSHIP AE. Identification of subclinical tendon injury from ground reaction force analysis. *Equine Vet J* 1991, **23**, 266-272.
- 45 DUELAND R, BARTEL DL and ANTONSON E. Force plate technique for canine gait analysis of total hip and excision arthroplasty. *J Am Anim Hosp Assoc* 1977, **13**, 547-552.
- 46 DUELAND RT, ADAMS WM, FIALKOWSKI JP, PATRICELLI AJ, MATHEWS KG and NORDHEIM EV. Effects of pubic symphysiodesis in dysplastic puppies. *Vet Surg* 2001, **30**, 201-217.

- 47 DUPUIS J, HARARI J, PAPAGEORGES M, GALLINA AM and RATZLAFF M. Evaluation of fibular head transposition for repair of experimental cranial cruciate ligament injury in dogs. *Vet Surg* 1994, **23**, 1-12.
- 48 FREDRICKSON I, DREVEMO S, DALIN G, HJERTEN G, BJORNE K and RYNDE R. Treadmill for equine locomotion analysis. *Equine Vet J* 1983, **15**, 111-115.
- 49 GILLETTE RL. Analytical techniques available in the Motion Analysis laboratory. Auburn Sports Medicine Program, créé en 1999, accédé le 12 novembre 2000, dernière modification en 1999, [en-ligne], [http://www.vetmed.auburn.edu/sportsmed/GaitLab.html].
- 50 GILLETTE RL. Gait analysis. non publié, 2000.
- 51 GILLETTE RL and ZEBAS CJ. A two-dimensional analysis of limb symmetry in the trot of Labrador retrievers. *J Am Anim Hosp Assoc* 1999, **35**, 515-520.
- 52 GORCE P. Modélisation biomécanique du mouvement. *In.*, 2001, 7p p.
- 53 GRANATA AL, VECCHI C, GRACIOTTI L, FULGENZI G, MAGGI S and CORSI A. Gamma irradiation can reduce muscle damage in mdx dystrophic mice. *Acta Neuropathol* 1998, **96**, 564-568.
- 54 GRIFFON DJ, MC LAUGHLING JR RM and ROUSH JK. Vertical ground reaction force redistribution during experimentally induced shoulder lameness in dogs. *Vet Comp Orthop Traumatol* 1994, **7**, 154-157.
- 55 HOTTINGER HA, DECAMP CE, OLIVIER NB, HAUPTMAN JG and SOUTAS-LITTLE RW. Noninvasive kinematic analysis of the walk in healthy large-breed dogs. *Am J Vet Res* 1996, **57**, 381-388.
- 56 HUIBREGTSE BA, JOHNSON AL, MUHLBAUER MC and PIJANOWSKI GJ. The effect of the treatment of fragmented coronoid process on the development of osteoarthritis of the elbow. *J Am Anim Hosp Assoc* 1994, **30**, 190-195.
- 57 JEVENS DJ, DECAMP CE, HAUPTMAN J, BRADEN TD, RICHTER M and ROBINSON R. Use of force-plate analysis of gait to compare two surgical techniques for treatment of cranial cruciate ligament rupture in dogs. *Am J Vet Res* 1996, **57**, 389-393.
- 58 JEVENS DJ, HAUPTMAN JG, DECAMP CE, BUDSBERG SC and SOUTAS-LITTLE RW. Contributions to variance in force-plate analysis of gait in dogs. *Am J Vet Res* 1993, **54**, 612-615.
- 59 KIRPENSTEIJN J, VAN DER BOS R, VAN DEN BROM WE and HAZEWINDEL HAW. Ground reaction force analysis of large breed dogs when walking after the amputation of a limb. *Vet Record* 2000, **146**.
- 60 KORNEGAY JN, SHARP NJ, BOGAN DJ, VAN CAMP SD, METCALF JR and SCHUELER RO. Contraction tension and kinetics of the peroneus longus muscle in golden retriever muscular dystrophy. *J. Neu. Sci.* 1994, **123**, 100-107.
- 61 KORNEGAY JN, SHARP NJ, SCHUELER RO and BETTS CW. Tarsal joint contracture in dogs with golden retriever muscular dystrophy. *Laboratory animal science* 1994, **44**, 331-333.
- 62 KORNEGAY JN, TULER SM, MILLER DM and LEVESQUE DC. Muscular dystrophy in a litter of golden retriever dogs. *Muscle&nerve* 1988, 1056-1064.

- 63 KORVICK DL, PIJANOWSKI GJ and SCHAEFFER DJ. Three-dimensional kinematics of the intact and cranial cruciate ligament-deficient stifle of dogs. *J Biomech* 1994, **27**, 77-87.
- 64 KRAM R and POWELL AJ. A treadmill-mounted force platform. *J Appl Physiol* 1989, **67**, 1692-1698.
- 65 LEACH D and CYMBALUK NF. Relationships between stride length, stride frequency, velocity, and morphometrics of foals. *Am J Vet Res* 1986, **47**, 2090-2097.
- 66 LEE DV, BERTRAM JEA and TODHUNTER RJ. Acceleration and balance in trotting dogs. *J Exp Biol* 1999, **202**, 3565-3573.
- 67 MANLEY PA, VANDERBY JR R, DOGAN S, KOHLES SS and MCBEATH AA. Ground reaction force comparison of canine cemented and cementless total hip replacement. *Clin Biomech* 1990, **5**, 199-204.
- 68 MANN FA, TANGNER CH, WAGNER-MANN C, READ WK, HULSE DA, PUGLISI TA, *et al.* A comparison of standard femoral head and neck excision and femoral head and neck excision using a biceps femoris muscle flap in the dog. *Vet Surg* 1987, **16**, 223-230.
- 69 MANTER JT. The dynamics of quadrupedal walking. *J Exp Biol* 1938, **15**, 522-540.
- 70 MARSOLAIS GS, DVORAK G and CONZEMIUS MG. Effects of postoperative rehabilitation on limb function after cranial cruciate ligament repair in dogs. *J Am Vet Med Assoc* 2002, **220**, 1325-1330.
- 71 MARTINEZ SA, DECAMP CE, CIMINO LD and WALTON AM. Repeatability of kinematic variables in the normal gait of adult greyhounds. *Vet Surg* 1995, **24**, 431-432.
- 72 MARTINEZ-DEL CAMPO LJ, KOBLUK CN, GREER N, TRENT AM, STONER LJ, WICKSTROM L, *et al.* The use of high-speed videography to generate angle-time and angle-angle diagrams for the study of equine locomotion. *Vet Comp Orthop Traumatol* 1991, **4**, 120-131.
- 73 MC LAUGHLIN JR RM and ROUSH JK. Effects of subject stance time and velocity on ground reaction forces in clinically normal Greyhounds at the trot. *Am J Vet Res* 1994, **55**, 1666-1671.
- 74 MC LAUGHLIN RM and ROUSH JK. Effects of increasing velocity on braking and propulsion times during force plate gait analysis in Greyhounds. *Am J Vet Res* 1995, **56**, 159-161.
- 75 MCLAUGHLIN JR RM, MILLER CW, TAVES CL, HEARN TC, PALMER NC and ANDERSON GI. Force plate analysis of triple pelvic osteotomy for the treatment of canine hip dysplasia. *Vet Surg* 1991, **20**, 291-297.
- 76 MCLAUGHLIN RM. Kinetic and kinematic gait analysis in dogs. *Vet Clin North Am Small Anim Pract* 2001, **31**, 193-201.
- 77 MCMAHON TA. Using body size to understand the structural design of animals: quadrupedal locomotion. *J Appl Physiol* 1975, **39**, 619-627.
- 78 MERKENS HW, SCHAMHARDT HC, HARTMAN W and KERSJES AW. The use of H(orse) INDEX: a method of analysing the ground reaction force patterns of lame and normal gaited at the walk. *Equine Vet J* 1988, **20**, 29-36.

- 79 MUIR P, MARKEL MD, BOGDANSKE JJ and JOHNSON KA. Dual-energy x-ray absorptiometry and force-plate analysis of gait in dogs with healed femora after leg-lengthening plate fixation. *Vet Surg* 1995, **24**, 15-24.
- 80 MUNRO CF. Ground reaction forces in running: a reexamination. *J Biomech* 1987, **20**, 147-155.
- 81 NGUYEN F. *La dystrophie musculaire du chien golden retriever (GRMD) : étude histologique de la forme néonatale fulminante et contribution à l'étude de la pathogénie des lésions*. Thèse Méd. Vét., Nantes, 2001, 199 p.
- 82 OAKLEY RE, DECAMP CE, FLO GL and HAUPTMAN JG. Kinematic evaluation of two extracapsular surgical techniques for the treatment of cranial cruciate ligament rupture in dogs. *Vet Surg* 1995, **25**, 435.
- 83 O'CONNOR BL, VISCO DM, HECK DA, MYERS SL and BRANDT KD. Gait alterations in dogs after transection of the anterior cruciate ligament. *Arthritis Rheum* 1989, **32**, 1142-1147.
- 84 ORANGE F. *Contribution à l'étude cinématique tridimensionnelle du trot chez le cheval: influence du tapis roulant sur la locomotion*. Thèse Méd. Vét., Alfort, 1995, 163 p.
- 85 PAGE AE, ALLAN C, JASTY M, HARRIGAN TP, BRAGDON CR and HARRIS WH. Determination of loading parameters in the canine hip in vivo. *J Biomech* 1993, **26**, 571-579.
- 86 PERSON MW. Arthroscopic treatment of osteochondritis dissecans in the canine shoulder. *Vet Surg* 1989, **18**, 175-189.
- 87 PIJANOWSKI GJ and MOEINZADEH M. Forces in the forelimb and hindlimb of the dog during walk and trot. *Anatomia histologia embryologia* 1987, **16**, 86-87.
- 88 POY NS, DECAMP CE, BENNETT RL and HAUPTMAN JG. Additional kinematic variables to describe differences in the trot between clinically normal dogs and dogs with hip dysplasia. *Am J Vet Res* 2000, **61**, 974-978.
- 89 REMY D. *Contribution à l'étude de la biomécanique articulaire du membre pelvien chez le chien Berger Allemand à l'aide de systèmes d'analyse du mouvement et d'une plate-forme dynamométrique : étude de faisabilité, mise au point et essai de validation d'un protocole à partir d'une analyse chez sept chiens sains et un chien dysplasique*. Thèse Méd. Vét., Lyon, 1995, 233 p.
- 90 REMY D and ROMAND O. Biomécanique articulaire : méthodes d'étude 1. Analyse visuelle du mouvement : études biocinématiques. *Rec Med Vet* 1995, **171**, 827-834.
- 91 RENBERG WC, JOHNSTON SA, YE K and BUDSBERG SC. Comparison of stance time and velocity as control variables in force plate analysis of dogs. *Am J Vet Res* 1999, **60**, 814-819.
- 92 RIGGS CM, DECAMP CE, SOUTAS-LITTLE RW, BRADEN TD and RICHTER MA. Effects of subject velocity on force plate-measured ground reaction forces in healthy Greyhounds at the trot. *Am J Vet Res* 1993, **57**, 1523-1526.
- 93 ROUSH JK and MC LAUGHLIN JR RM. Effects of subject stance time and velocity on ground reaction forces in clinically normal greyhounds at the walk. *Am J Vet Res* 1994, **55**, 1672-1676.

- 94 ROY WE. Examination of the canine locomotor system. *Vet Clin North Am* 1971, **1**, 53-70.
- 95 RUMPH PF, KINCAID SA, BAIRD DK, KAMMERMANN JR, VISCO DM and GOETZE LF. Vertical ground reaction force distribution during experimentally induced acute synovitis in dogs. *Am J Vet Res* 1993, **54**, 365-369.
- 96 RUMPH PF, KINCAID SA, VISCO DM, BAIRD DK, KAMMERMANN JR and WEST MS. Redistribution of vertical ground reaction force in dogs with experimentally induced chronic hindlimb lameness. *Vet Surg* 1995, **24**, 384-389.
- 97 RUMPH PF, LANDER JE, KINCAID SA, BAIRD DK, KAMMERMANN JR and VISCO DM. Ground reaction force profiles from force platform gait analyses of clinically normal mesomorphic dogs at the trot. *Am J Vet Res* 1994, **55**, 756-761.
- 98 RUMPH PF and STEISS JE. Ground reaction forces in Greyhounds with tibial nerve injury. *Am J Vet Res* 1998, **59**, 375-378.
- 99 RUMPH PF, STEISS JE and MONTGOMERY RD. Effects of selection and habituation on vertical ground reaction force in Greyhounds. *Am J Vet Res* 1997, **58**, 1206-1208.
- 100 RUMPH PF, STEISS JE and WEST MS. Interday variation in vertical ground reaction force in clinically normal Greyhounds at the trot. *Am. J Vet Res* 1999, **60**, 679-683.
- 101 SCHAEFER SL, DECAMP CE, HAUPTMAN JG and WALTON A. Kinematic gait analysis of hind limb symmetry in dogs at the trot. *Am J Vet Res* 1998, **59**, 680-685.
- 102 SCHAMHARDT HC and MERKENS HW. Quantification of equine ground reaction force patterns. *J Biomech* 1987, **20**, 443-446.
- 103 SCHAMHARDT HC and MERKENS HW. Objective determination of ground contact of equine limbs at the walk and trot: comparison between ground reaction forces, accelerometer data and kinematics. *Equine vet J Suppl* 1994, **17**, 75-79.
- 104 SCHATZKER J, ANDERSON G, SUMNER-SMITH G, HEARN T and FORNASIER V. An experimental investigation in the dog into the mode of osseous integration of total joint implants. *Arch Orthop Trauma Surg* 1989, **108**, 132-140.
- 105 SCHNEIDER E and CHAO EY. Fourier analysis of ground reaction forces in normals and patients with knee joint disease. *J Biomech* 1983, **16**, 591-601.
- 106 SCHNEIDER TA and BUDSBERG SC. Plasma and synovial concentrations of carprofen in dogs with chronic osteoarthritis. *Vet Comp Orthop Traumatol* 2001, **14**, 19-24.
- 107 SCHRYVER HF, BARTEL DL, LANGRANA N and LOWE JE. Locomotion in the horse: kinematics and external and internal forces in the normal equine digit in the walk and trot. *Am J Vet Res* 1978, **39**, 1728-1733.
- 108 SCOTT GB. Changes in limb loading with lameness for a number of Friesian cattle. *Br Vet J* 1989, **145**, 28-38.
- 109 SHARP NJ, KORNEGAY JN and LANE SB. The muscular dystrophies. *Seminars in Veterinary Medicine and Surgery (Small Animal)* 1989, **4**, 133-140.

- 110 SHELTON GD, LIU LA, GUO LT, SMITH GK, CHRISTIANSEN JS, THOMAS WB, *et al.* Muscular dystrophy in female dogs. *J. Vet. Intern. Med.* 2001, **15**, 240-244.
- 111 STEISS JE, YUILL GT, WHITE NA and BOWEN JM. Modifications of a force plate system for equine gait analysis. *Am J Vet Res* 1982, **43**, 538-540.
- 112 SUMNER-SMITH G. Gait analysis and Orthopedic Examination. *In: SLATTER, D*, editors. *Textbook of Small Animal Surgery*,: WB Saunders, 1995, 1577-1586.
- 113 TANO CA, COCKSHUTT JR, DOBSON H, MILLER CW, HOLMBERG DL and TAVES CL. Force plate analysis of dogs with bilateral hip dysplasia treated with a unilateral pelvic osteotomy: a long term review of cases. *Vet Comp Orthop Traumatol* 1998, **11**, 85-93.
- 114 TOKURIKI M. Electromyographic and joint-mechanical studies in quadrupedal locomotion I. Walk. *Jap J Vet Sci* 1973, **35**, 433-436.
- 115 TOKURIKI M. Electromyographic and joint-mechanical studies in quadrupedal locomotion II. Trot. *Jap J Vet Sci* 1973, **35**, 525-533.
- 116 TOKURIKI M. Electromyographic and joint-mechanical studies in quadrupedal locomotion III. Gallop. *Jap J Vet Sci* 1974, **36**, 121-132.
- 117 TORRES LFB and DUCHEN LW. The mutant mdx: inherited myopathy in the mouse. *Brain* 1987, **110**, 269-299.
- 118 VALENTINE BA, COOPER BJ, CUMMINGS JF and DE LAHUNTA A. Progressive muscular dystrophy in a golden retriever dog : light microscope and ultrastructural features at 4 and 8 months. *Acta Neuropathol* 1986, **71**, 301-310.
- 119 VALENTINE BA, COOPER BJ, CUMMINGS JF and DE LAHUNTA A. Canine X-linked muscular dystrophy: morphologic lesions. *J. Neu. Sci.* 1990, **97**, 1-23.
- 120 VALENTINE BA, WINAND NJ, PRADHAN D, MOISE NS, DE LAHUNTA A, KORNEGAY JN, *et al.* Canine X-linked muscular dystrophy as an animal model of duchenne muscular dystrophy : a review. *Am. J. Med. Genet.* 1992, **42**, 352-356.
- 121 VAN DEN BOGERT AJ, VAN WEEREN PR and SCHAMHARDT HC. Correction for skin displacement errors in movement analysis of the horse. *J Biomech* 1990, **23**, 97-101.
- 122 VAN LUE SJ, BUDSBERG SC and CHAMBERS JN. Computer-assisted force plate analysis of the biomedtrix hip in total hip replacement in the dog: a prospective quantitative analysis of limb function for one year following implantation. *Vet Surg* 1994, **23**, 419.
- 123 VASSEUR PB, JOHNSON AL, BUDSBERG SC, LINCOLN JD, TOOMBS JP, WHITEHAIR JG, *et al.* Randomized, controlled trial of the efficacy of carprofen, a nonsteroidal anti-inflammatory drug, in the treatment of osteoarthritis in dogs. *J Am Vet Med Assoc* 1995, **206**, 807-811.
- 124 VILENSKY JA, O'CONNOR BL, BRANDT KD, DUNN EA, ROGERS PI and DELONG CA. Serial kinematic analysis of the unstable knee after transection of the anterior cruciate ligament: temporal and angular changes in a canine model of osteoarthritis. *J Orthop Res* 1994, **12**, 229-37.

- 125 WEISHAUPT MA, HOGG HP, WIESTNER T, DENOTH J, STUSSI E and AUER JA. Instrumented treadmill for measuring vertical ground reaction forces in horses. *Am J Vet Res* 2002, **63**, 520-527.
- 126 WINGFIELD C, LAW HT and STEAD AC. Canine kinematic hindleg gait analysis using a microcomputer. *J Small Anim Pract* 1993, **34**, 319-324.
- 127 WINTER DA. Moments of force and mechanical power in jogging. *J Biomech* 1983, **16**, 91-97.
- 128 YANOFF SR, HULSE DA, HOGAN HA, SLATER MR and LONGNECKER MT. Measurement of vertical ground reaction force in jumping dogs. *Vet Comp Orthop Traumatol* 1992, **5**, 44-50.

ANNEXES

Tableau V : Résultats numériques de la force verticale Fz mesurée selon le protocole du chapitre 2

Chien	Chien	Jour	Séq	V	Tz (% Str)	Str(ms)	Tc(% Str)	Tv(% Str)	PFz (% Pds)	IFz (% Pds)
Mastoc	1	1	1	1	19,22	461,24	43,84	4,50	176,39	21,22
Mastoc	1	1	1	2	20,86	460,67	44,69	7,05	171,81	21,08
Mastoc	1	1	2	1	19,14	473,40	43,24	4,79	181,49	21,94
Mastoc	1	1	2	2	21,80	473,80	44,86	7,16	179,51	22,38
Mastoc	1	1	3	1	19,27	478,90	43,44	5,15	178,66	22,12
Mastoc	1	1	3	2	22,11	479,37	44,31	7,09	178,26	22,30
Mastoc	1	2	1	1	19,69	603,29	42,45	6,72	179,45	22,77
Mastoc	1	2	1	2	21,80	604,00	43,96	8,02	181,26	23,28
Mastoc	1	2	2	1	19,91	486,95	43,35	4,56	166,67	21,32
Mastoc	1	2	2	2	22,02	486,63	44,66	7,73	177,73	22,66
Mastoc	1	2	3	1	19,83	486,63	43,56	4,15	164,53	21,17
Mastoc	1	2	3	2	22,26	489,44	44,80	7,26	176,80	22,62
Mastoc	1	3	1	1	19,81	608,78	42,62	7,21	193,39	24,32
Mastoc	1	3	1	2	20,77	606,75	42,48	8,10	198,92	24,51
Mastoc	1	3	2	1	19,63	607,89	42,25	6,61	194,71	24,26
Mastoc	1	3	2	2	20,77	608,42	42,89	8,26	195,41	24,45
Mastoc	1	3	3	1	19,69	606,35	42,19	6,61	195,78	24,24
Mastoc	1	3	3	2	20,61	605,25	42,24	8,99	197,73	24,05
Odin	2	1	1	1	20,21	468,29	42,43	8,29	196,40	22,25
Odin	2	1	1	2	18,36	468,60	40,73	8,35	213,92	23,20
Odin	2	1	2	1	20,69	469,20	42,78	8,27	194,74	22,34
Odin	2	1	2	2	18,45	469,60	40,85	8,13	214,57	23,45
Odin	2	1	3	1	19,99	471,30	42,46	8,42	198,89	22,70
Odin	2	1	3	2	18,63	470,60	40,70	8,33	214,62	23,48
Odin	2	2	1	1	19,83	475,60	42,09	8,60	200,90	22,94
Odin	2	2	1	2	18,21	476,20	40,34	8,90	216,59	23,34
Odin	2	2	2	1	19,62	474,40	41,99	8,75	202,08	23,03
Odin	2	2	2	2	18,20	474,90	40,19	9,12	216,44	23,21
Odin	2	2	3	1	19,75	475,00	42,13	8,78	199,61	22,83
Odin	2	2	3	2	18,10	475,30	40,04	9,02	217,81	23,45
Odin	2	3	1	1	19,35	477,10	42,00	8,63	199,05	23,24
Odin	2	3	1	2	18,40	476,80	40,61	8,89	214,10	23,77
Odin	2	3	2	1	19,79	472,00	42,80	7,77	194,15	22,62
Odin	2	3	2	2	18,93	471,80	41,20	8,24	207,18	23,26
Odin	2	3	3	1	19,48	482,14	41,86	7,54	199,99	22,40
Odin	2	3	3	2	20,21	465,14	43,28	7,33	190,01	22,62
Shark	3	1	1	1	19,46	612,00	41,30	5,91	182,66	19,03
Shark	3	1	1	2	20,26	625,75	42,21	6,50	149,29	19,20
Shark	3	1	2	1	20,67	494,11	42,68	4,99	163,86	20,86
Shark	3	1	2	2	21,75	493,22	44,92	7,33	168,70	22,46
Shark	3	1	3	1	20,70	494,44	43,22	5,18	168,26	21,68
Shark	3	1	3	2	21,78	495,68	44,84	6,71	172,95	22,98
Shark	3	2	1	1	20,05	493,68	42,40	5,97	169,32	21,36
Shark	3	2	1	2	21,69	493,47	44,69	7,04	174,44	23,12
Shark	3	2	2	1	20,97	498,95	44,12	7,26	178,95	23,71
Shark	3	2	2	2	20,18	499,16	42,30	6,30	175,35	22,13
Shark	3	2	3	1	20,10	497,68	42,31	5,94	173,55	21,87
Shark	3	2	3	2	21,36	497,68	44,33	7,40	181,80	24,05
Shark	3	3	1	1	20,18	499,06	42,39	5,89	169,05	21,73
Shark	3	3	1	2	21,34	495,25	44,26	7,59	176,44	23,42
Shark	3	3	2	1	20,31	493,67	42,29	6,07	174,44	21,75
Shark	3	3	2	2	21,04	496,88	44,21	7,62	183,26	24,28
Shark	3	3	3	1	20,63	498,38	43,16	5,44	164,36	21,69
Shark	3	3	3	2	21,20	602,67	44,31	7,51	174,21	23,73
Max	4	1	1	1	18,68	461,40	41,18	8,11	183,46	19,89
Max	4	1	1	2	19,32	461,14	42,62	8,12	200,20	22,13
Max	4	1	2	1	19,18	461,60	42,13	8,17	190,81	20,99
Max	4	1	2	2	19,38	461,62	42,33	7,36	201,55	22,12
Max	4	1	3	1	19,23	461,62	41,97	8,43	191,73	21,00
Max	4	1	3	2	19,62	461,81	42,21	7,37	201,67	22,03
Max	4	2	1	1	18,88	467,62	41,48	8,69	197,10	21,48
Max	4	2	1	2	19,67	467,90	42,31	7,49	215,86	23,81
Max	4	2	2	1	18,17	464,38	40,62	9,61	199,90	20,99
Max	4	2	2	2	19,12	464,76	41,72	8,00	214,11	22,97
Max	4	2	3	1	18,71	468,19	41,14	9,05	199,61	21,46
Max	4	2	3	2	19,63	468,10	42,31	7,47	212,46	23,35
Max	4	3	1	1	19,53	444,76	42,55	8,08	182,44	20,22
Max	4	3	1	2	19,25	445,24	42,23	7,14	195,82	21,26
Max	4	3	2	1	19,14	447,24	41,69	8,65	185,60	20,10
Max	4	3	2	2	18,93	447,16	41,83	7,86	201,08	21,54
Max	4	3	3	1	18,98	460,76	41,37	9,27	186,33	20,08
Max	4	3	3	2	18,93	460,76	41,60	7,75	203,94	21,89
Niepce	5	1	1	1	18,16	481,30	40,43	9,70	214,32	24,08
Niepce	5	1	1	2	18,11	481,40	39,59	10,28	201,63	22,64
Niepce	5	1	2	1	18,26	479,70	40,57	9,48	211,10	23,62
Niepce	5	1	2	2	18,08	480,00	39,77	10,20	202,44	22,75
Niepce	5	1	3	1	18,37	478,10	40,29	9,66	209,99	23,54
Niepce	5	1	3	2	17,88	478,53	39,75	10,40	202,10	22,67
Niepce	5	2	1	1	17,50	478,92	40,69	9,09	193,46	22,37
Niepce	5	2	1	2	17,66	477,83	39,62	10,13	180,00	20,43
Niepce	5	2	2	1	16,19	493,00	38,67	11,62	188,26	21,54
Niepce	5	2	2	2	16,69	496,67	37,67	12,03	183,82	20,93
Niepce	5	2	3	1	17,04	499,38	39,59	12,26	205,70	24,22
Niepce	5	2	3	2	16,72	600,00	37,65	10,57	182,48	20,85
Niepce	5	3	1	1	17,32	498,42	38,84	10,77	218,65	24,60
Niepce	5	3	1	2	17,27	497,89	38,82	11,92	208,22	23,38
Niepce	5	3	2	1	17,43	497,68	38,90	10,70	218,76	24,40
Niepce	5	3	2	2	17,38	497,37	38,56	11,87	209,43	23,43
Niepce	5	3	3	1	17,34	602,44	37,95	12,10	210,04	23,45
Niepce	5	3	3	2	17,27	602,32	38,89	11,04	219,06	24,76

Chien	Chien	Jour	Séq	V	Tz (% Str)	Str (ms)	Tc (% Str)	Tv (% Str)	PFz (% Pds)	IFz (% Pds)
Mastoc	1	1	1	1	19,22	461,24	43,84	4,60	176,39	21,22
Mastoc	1	1	1	2	20,86	460,67	44,69	7,05	171,81	21,08
Mastoc	1	1	2	1	19,14	473,40	43,24	4,79	181,49	21,94
Mastoc	1	1	2	2	21,80	473,80	44,95	7,16	179,61	22,38
Mastoc	1	1	3	1	19,27	478,90	43,44	6,15	178,66	22,12
Mastoc	1	1	3	2	22,11	479,37	44,31	7,09	178,26	22,30
Mastoc	1	2	1	1	19,69	503,29	42,45	6,72	179,45	22,77
Mastoc	1	2	1	2	21,80	504,00	43,96	8,02	181,26	23,28
Mastoc	1	2	2	1	19,91	486,95	43,95	4,66	166,67	21,32
Mastoc	1	2	2	2	22,02	486,63	44,86	7,73	177,73	22,66
Mastoc	1	2	3	1	19,93	486,63	43,66	4,16	164,63	21,17
Mastoc	1	2	3	2	22,26	489,44	44,80	7,26	176,90	22,62
Mastoc	1	3	1	1	19,81	508,78	42,62	7,21	193,39	24,32
Mastoc	1	3	1	2	20,77	506,75	42,48	8,10	198,82	24,61
Mastoc	1	3	2	1	19,63	507,89	42,25	6,61	194,71	24,26
Mastoc	1	3	2	2	20,77	508,42	42,89	8,26	195,41	24,45
Mastoc	1	3	3	1	19,69	506,95	42,19	6,61	195,78	24,24
Mastoc	1	3	3	2	20,61	505,25	42,24	8,99	197,73	24,05
Odin	2	1	1	1	20,21	468,29	42,43	8,29	196,40	22,25
Odin	2	1	1	2	18,36	488,60	40,73	8,35	213,92	23,20
Odin	2	1	2	1	20,69	469,20	42,78	8,27	194,74	22,34
Odin	2	1	2	2	18,45	469,60	40,85	8,13	214,67	23,45
Odin	2	1	3	1	19,99	471,30	42,46	8,42	198,89	22,70
Odin	2	1	3	2	18,63	470,60	40,70	8,33	214,82	23,48
Odin	2	2	1	1	19,83	475,60	42,09	8,60	200,90	22,94
Odin	2	2	1	2	18,21	476,20	40,34	8,90	216,69	23,34
Odin	2	2	2	1	19,62	474,40	41,99	8,75	202,08	23,03
Odin	2	2	2	2	18,20	474,80	40,19	9,12	216,44	23,21
Odin	2	2	3	1	19,75	475,00	42,13	8,78	199,61	22,83
Odin	2	2	3	2	18,10	475,30	40,04	9,02	217,81	23,45
Odin	2	3	1	1	19,35	477,10	42,00	8,63	199,05	23,24
Odin	2	3	1	2	18,40	476,80	40,61	8,89	214,10	23,77
Odin	2	3	2	1	19,79	472,00	42,80	7,77	194,15	22,82
Odin	2	3	2	2	18,93	471,80	41,20	8,24	207,18	23,26
Odin	2	3	3	1	19,48	462,14	41,86	7,64	199,99	22,40
Odin	2	3	3	2	20,21	465,14	43,28	7,33	190,01	22,62
Shark	3	1	1	1	19,46	512,00	41,30	6,91	162,66	19,03
Shark	3	1	1	2	20,26	525,75	42,21	6,60	149,29	19,20
Shark	3	1	2	1	20,67	494,11	42,68	4,99	163,86	20,86
Shark	3	1	2	2	21,75	493,22	44,92	7,33	168,70	22,46
Shark	3	1	3	1	20,70	494,44	43,22	6,18	168,26	21,68
Shark	3	1	3	2	21,78	495,68	44,84	6,71	172,96	22,98
Shark	3	2	1	1	20,05	493,68	42,40	6,97	169,32	21,36
Shark	3	2	1	2	21,69	493,47	44,69	7,04	174,44	23,12
Shark	3	2	2	1	20,97	498,95	44,12	7,26	178,95	23,71
Shark	3	2	2	2	20,18	499,16	42,30	6,30	175,35	22,13
Shark	3	2	3	1	20,10	497,68	42,31	6,94	173,65	21,87
Shark	3	2	3	2	21,36	497,68	44,33	7,40	181,80	24,05
Shark	3	3	1	1	20,18	499,06	42,39	6,89	169,05	21,73
Shark	3	3	1	2	21,34	496,25	44,26	7,69	176,44	23,42
Shark	3	3	2	1	20,31	493,67	42,29	6,07	174,44	21,76
Shark	3	3	2	2	21,04	496,88	44,21	7,62	183,26	24,28
Shark	3	3	3	1	20,63	498,38	43,16	6,44	164,36	21,69
Shark	3	3	3	2	21,20	502,67	44,31	7,61	174,21	23,73
Max	4	1	1	1	18,68	461,40	41,18	8,11	183,46	19,89
Max	4	1	1	2	19,32	461,14	42,62	8,12	200,20	22,13
Max	4	1	2	1	19,18	461,60	42,13	8,17	190,81	20,99
Max	4	1	2	2	19,38	461,62	42,33	7,36	201,65	22,12
Max	4	1	3	1	19,23	461,62	41,97	8,43	191,73	21,00
Max	4	1	3	2	19,62	461,81	42,21	7,37	201,67	22,03
Max	4	2	1	1	18,88	467,62	41,48	8,69	197,10	21,48
Max	4	2	1	2	19,67	467,90	42,31	7,49	215,86	23,81
Max	4	2	2	1	18,17	464,38	40,62	9,61	199,90	20,99
Max	4	2	2	2	19,12	464,76	41,72	8,00	214,11	22,97
Max	4	2	3	1	18,71	468,19	41,14	9,05	199,81	21,46
Max	4	2	3	2	19,63	468,10	42,31	7,47	212,46	23,36
Max	4	3	1	1	19,63	444,76	42,65	8,08	182,44	20,22
Max	4	3	1	2	19,25	445,24	42,23	7,14	195,82	21,26
Max	4	3	2	1	19,14	447,24	41,69	8,65	185,60	20,10
Max	4	3	2	2	18,93	447,16	41,83	7,86	201,08	21,64
Max	4	3	3	1	18,98	460,76	41,37	9,27	186,33	20,08
Max	4	3	3	2	18,93	460,76	41,60	7,75	203,94	21,89
Niepce	5	1	1	1	18,16	481,30	40,43	9,70	214,32	24,08
Niepce	5	1	1	2	18,11	481,40	39,69	10,28	201,63	22,64
Niepce	5	1	2	1	18,26	479,70	40,67	9,48	211,10	23,82
Niepce	5	1	2	2	18,08	480,00	39,77	10,20	202,44	22,76
Niepce	5	1	3	1	18,37	478,10	40,29	9,66	209,99	23,64
Niepce	5	1	3	2	17,88	478,63	39,75	10,40	202,10	22,67
Niepce	5	2	1	1	17,60	478,92	40,69	9,09	193,46	22,37
Niepce	5	2	1	2	17,66	477,83	39,62	10,13	180,00	20,43
Niepce	5	2	2	1	16,19	493,00	38,67	11,82	188,26	21,64
Niepce	5	2	2	2	16,69	496,67	37,67	12,03	183,82	20,93
Niepce	5	2	3	1	17,04	499,38	39,69	12,26	205,70	24,22
Niepce	5	2	3	2	16,72	500,00	37,65	10,67	182,48	20,86
Niepce	5	3	1	1	17,32	498,42	38,84	10,77	218,65	24,60
Niepce	5	3	1	2	17,27	497,89	38,82	11,92	208,22	23,38
Niepce	5	3	2	1	17,43	497,68	38,90	10,70	218,76	24,40
Niepce	5	3	2	2	17,38	497,37	38,66	11,87	209,43	23,43
Niepce	5	3	3	1	17,34	502,44	37,95	12,10	210,04	23,45
Niepce	5	3	3	2	17,27	502,32	38,89	11,04	219,06	24,76

Tableau VI : Résultats numériques pour le mouvement de la hanche selon le protocole du chapitre 3

Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	0,51	0,58	0,63	0,57	0,61	0,63	0,63	0,67	0,63	0,57	0,65	0,58	0,67	0,62	0,58	0,70	0,63	0,59	0,62	0,62
Malade			0,51	0,57	0,51	0,63	0,57	0,67	0,49	0,63		0,54	0,52	0,53	0,59	0,53	0,45	0,02	0,46	0,44
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	0,56	0,54	0,58	0,57	0,58	0,58	0,55	0,58	0,61											
Malade	0,60	0,56	0,52	0,59	0,54	0,62	0,61	0,61	0,60											
H.ar																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	0,49	0,53	0,58	0,50	0,58	0,60	0,62	0,63	0,59	0,49	0,60	0,53	0,59	0,59	0,57	0,64	0,60	0,55	0,58	0,56
Malade			0,43	0,50	0,47	0,60	0,51	0,63	0,46	0,59		0,46	0,49	0,47	0,55	0,52	0,40	0,40	0,40	0,39
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	0,54	0,50	0,56	0,54	0,56	0,53	0,48	0,51	0,56											
Malade	0,55	0,52	0,45	0,56	0,50	0,56	0,55	0,53	0,55											
H.moy																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	0,48	0,51	0,57	0,44	0,55	0,59	0,60	0,63	0,57	0,50	0,59	0,53	0,58	0,58	1,15	0,64	0,58	0,54	0,58	0,56
Malade			0,44	0,50	0,44	0,59	0,51	0,63	0,43	0,59		0,47	0,48	0,46	0,54	0,50	0,40	0,40	0,39	0,39
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	0,54	0,49	0,55	0,53	0,56	0,53	0,48	0,52	0,56											
Malade	0,55	0,52	0,45	0,55	0,50	0,56	0,55	0,54	0,54											
H.max																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	0,48	0,51	0,57	0,44	0,55	0,59	0,60	0,63	0,57	0,50	0,59	0,53	0,58	0,58	1,15	0,64	0,58	0,54	0,58	0,56
Malade			0,44	0,50	0,44	0,59	0,51	0,63	0,43	0,59		0,47	0,48	0,46	0,54	0,50	0,40	0,40	0,39	0,39
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	0,54	0,49	0,55	0,53	0,56	0,53	0,48	0,52	0,56											
Malade	0,55	0,52	0,45	0,55	0,50	0,56	0,55	0,54	0,54											
H.min																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	0,48	0,51	0,57	0,44	0,55	0,59	0,60	0,63	0,57	0,50	0,59	0,53	0,58	0,58	1,15	0,64	0,58	0,54	0,58	0,56
Malade			0,44	0,50	0,44	0,59	0,51	0,63	0,43	0,59		0,47	0,48	0,46	0,54	0,50	0,40	0,40	0,39	0,39
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	0,54	0,49	0,55	0,53	0,56	0,53	0,48	0,52	0,56											
Malade	0,55	0,52	0,45	0,55	0,50	0,56	0,55	0,54	0,54											
A.av.moy																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62		48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
A.av.max																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62		48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
A.av.min																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62		48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
A.ar.moy																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62		48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
A.ar.max																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62		48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
A.ar.min																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62		48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
Ampl.moy																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	37,01	25,07	30,10	28,38	44,61	34,90	30,84	32,15	43,95	39,46	35,93	26,85	40,38	31,59	29,01	29,22	41,58	28,76	34,98	30,19
Malade			31,94	28,38	33,36	34,90	30,28	25,86	21,64			26,77	27,84	29,90	27,39	17,79	59,28	35,30	35,83	34,23
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	31,99	30,53	25,75	24,82	38,31	30,68	39,07	31,38	27,57											
Malade	30,82	31,76	37,13	35,90	36,43	34,92	24,00	29,45	28,85											
Ampl.max																				
Lot 1																				
Age	184</																			

Tableau VII : Résultats numériques pour le mouvement du genou selon le protocole du chapitre 3

Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	0,51	0,58	0,63	0,57	0,61	0,63	0,63	0,67	0,63	0,57	0,65	0,58	0,67	0,62	0,58	0,70	0,63	0,59	0,62	0,62
Malade			0,51	0,57	0,51	0,63	0,57	0,67	0,49	0,63		0,54	0,52	0,53	0,59	0,53	0,45	0,02	0,46	0,44
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	0,56	0,54	0,58	0,57	0,58	0,58	0,55	0,58	0,61											
Malade	0,60	0,56	0,52	0,59	0,54	0,62	0,61	0,61	0,60											
H.ar																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	0,49	0,53	0,58	0,50	0,58	0,60	0,62	0,63	0,59	0,49	0,60	0,53	0,59	0,59	0,57	0,64	0,60	0,55	0,58	0,56
Malade			0,43	0,50	0,47	0,60	0,51	0,63	0,46	0,59		0,46	0,49	0,47	0,55	0,52	0,40	0,40	0,40	0,39
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	0,54	0,50	0,56	0,54	0,56	0,53	0,48	0,51	0,56											
Malade	0,55	0,52	0,45	0,56	0,50	0,56	0,55	0,53	0,55											
H.moy																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	0,48	0,51	0,57	0,44	0,55	0,59	0,60	0,63	0,57	0,50	0,59	0,53	0,58	0,58	1,15	0,64	0,58	0,54	0,58	0,56
Malade			0,44	0,50	0,44	0,59	0,51	0,63	0,43	0,59		0,47	0,48	0,46	0,54	0,50	0,40	0,40	0,39	0,39
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	0,54	0,49	0,55	0,53	0,56	0,53	0,48	0,52	0,56											
Malade	0,55	0,52	0,45	0,55	0,50	0,56	0,55	0,54	0,54											
H.max																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	0,48	0,51	0,57	0,44	0,55	0,59	0,60	0,63	0,57	0,50	0,59	0,53	0,58	0,58	1,15	0,64	0,58	0,54	0,58	0,56
Malade			0,44	0,50	0,44	0,59	0,51	0,63	0,43	0,59		0,47	0,48	0,46	0,54	0,50	0,40	0,40	0,39	0,39
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	0,54	0,49	0,55	0,53	0,56	0,53	0,48	0,52	0,56											
Malade	0,55	0,52	0,45	0,55	0,50	0,56	0,55	0,54	0,54											
H.min																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	0,48	0,51	0,57	0,44	0,55	0,59	0,60	0,63	0,57	0,50	0,59	0,53	0,58	0,58	1,15	0,64	0,58	0,54	0,58	0,56
Malade			0,44	0,50	0,44	0,59	0,51	0,63	0,43	0,59		0,47	0,48	0,46	0,54	0,50	0,40	0,40	0,39	0,39
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	0,54	0,49	0,55	0,53	0,56	0,53	0,48	0,52	0,56											
Malade	0,55	0,52	0,45	0,55	0,50	0,56	0,55	0,54	0,54											
A.av.moy																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62		48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
A.av.max																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62		48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
A.av.min																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62		48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
A.ar.moy																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62		48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
A.ar.max																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62		48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
A.ar.min																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62		48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
Ampl.moy																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	37,01	25,07	30,10	28,38	44,61	34,90	30,84	32,15	43,95	39,46	35,93	26,85	40,38	31,59	29,01	29,22	41,58	28,76	34,98	30,19
Malade			31,94	28,38	33,36	30,28	30,28	25,86	21,64			26,77	27,84	29,90	27,39	17,79	59,28	35,30	35,83	34,23
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	31,99	30,53	25,75	24,82	38,31	30,68	39,07	31,38	27,57											
Malade	30,82	31,76	37,13	35,90	36,43	34,92	24,00	29,45	28,85											
Ampl.max																				
Lot 1																				
Age	184																			

Tableau VIII : Résultats numériques pour le mouvement de la cheville selon le protocole du chapitre 3

Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	0,51	0,58	0,63	0,57	0,61	0,63	0,63	0,67	0,63	0,57	0,65	0,58	0,67	0,62	0,58	0,70	0,63	0,59	0,62	0,62
Malade			0,51	0,57	0,51	0,63	0,57	0,67	0,49	0,63	0,65	0,54	0,52	0,53	0,59	0,53	0,45	0,02	0,46	0,44
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	0,56	0,54	0,58	0,57	0,58	0,58	0,55	0,58	0,61											
Malade	0,60	0,56	0,52	0,59	0,54	0,62	0,61	0,61	0,60											
H.ar																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	0,49	0,53	0,58	0,50	0,58	0,60	0,62	0,63	0,59	0,49	0,60	0,53	0,59	0,59	0,57	0,64	0,60	0,55	0,58	0,56
Malade			0,43	0,50	0,47	0,60	0,51	0,63	0,46	0,59	0,60	0,46	0,49	0,47	0,55	0,52	0,40	0,40	0,40	0,39
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	0,54	0,50	0,56	0,54	0,56	0,53	0,48	0,51	0,56											
Malade	0,55	0,52	0,45	0,56	0,50	0,56	0,55	0,53	0,55											
H.moy																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	0,48	0,51	0,57	0,44	0,55	0,59	0,60	0,63	0,57	0,50	0,59	0,53	0,58	0,58	1,15	0,64	0,58	0,54	0,58	0,56
Malade			0,44	0,50	0,44	0,59	0,51	0,63	0,43	0,59	0,59	0,47	0,48	0,46	0,54	0,50	0,40	0,40	0,39	0,39
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	0,54	0,49	0,55	0,53	0,56	0,53	0,48	0,52	0,56											
Malade	0,55	0,52	0,45	0,55	0,50	0,56	0,55	0,54	0,54											
H.max																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	0,48	0,51	0,57	0,44	0,55	0,59	0,60	0,63	0,57	0,50	0,59	0,53	0,58	0,58	1,15	0,64	0,58	0,54	0,58	0,56
Malade			0,44	0,50	0,44	0,59	0,51	0,63	0,43	0,59	0,59	0,47	0,48	0,46	0,54	0,50	0,40	0,40	0,39	0,39
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	0,54	0,49	0,55	0,53	0,56	0,53	0,48	0,52	0,56											
Malade	0,55	0,52	0,45	0,55	0,50	0,56	0,55	0,54	0,54											
H.min																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	0,48	0,51	0,57	0,44	0,55	0,59	0,60	0,63	0,57	0,50	0,59	0,53	0,58	0,58	1,15	0,64	0,58	0,54	0,58	0,56
Malade			0,44	0,50	0,44	0,59	0,51	0,63	0,43	0,59	0,59	0,47	0,48	0,46	0,54	0,50	0,40	0,40	0,39	0,39
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	0,54	0,49	0,55	0,53	0,56	0,53	0,48	0,52	0,56											
Malade	0,55	0,52	0,45	0,55	0,50	0,56	0,55	0,54	0,54											
A.av.moy																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62	46,62	48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
A.av.max																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62	46,62	48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
A.av.min																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62	46,62	48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
A.ar.moy																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62	46,62	48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
A.ar.max																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62	46,62	48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
A.ar.min																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	50,91	45,92	48,62	44,61	53,24	57,62	53,85	46,54	51,73	54,20	52,06	53,14	46,36	58,26	59,83	60,36	59,31	53,81	51,91	53,34
Malade			40,08	44,61	37,74	36,92	36,92	64,88	64,88	46,62	46,62	48,83	51,80	47,60	48,14	71,10	54,68	52,80	56,85	56,11
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	60,08	60,21	59,41	54,35	66,76	62,33	52,31	56,05	49,32											
Malade	66,59	74,94	61,17	63,34	64,40	47,25	56,11	52,16	44,02											
Ampl.moy																				
Lot 1																				
Age	184	191	200	211	213	218	224	238	247	249	252	261	267	269	280	302	318	329	337	339
Sain	37,01	25,07	30,10	28,38	44,61	34,90	30,84	32,15	43,95	39,46	35,93	26,85	40,38	31,59	29,01	29,22	41,58	28,76	34,98	30,19
Malade			31,94	28,38	33,36	30,28	30,28	25,86	21,64	21,64	21,64	26,77	27,84	29,90	27,39	17,79	59,28	35,30	35,83	34,23
Lot 2																				
Age	107	118	126	128	140	148	154	163	168											
Sain	31,99	30,53	25,75	24,82	38,31	30,68	39,07	31,38	27,57											
Malade	30,82	31,76	37,13	35,90	36,43	34,92	24,00	29,45	28,85					</						