



Analyse optoélectronique de la marche après athrodèse métatarso-phalangienne de l' hallux: à propos de 15 cas

Damien Girard

► To cite this version:

Damien Girard. Analyse optoélectronique de la marche après athrodèse métatarso-phalangienne de l' hallux: à propos de 15 cas. Sciences du Vivant [q-bio]. 2002. hal-01738979

HAL Id: hal-01738979

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01738979>

Submitted on 20 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

DOUBLE

160878

UNIVERSITÉ HENRI POINCARÉ, NANCY 1

FACULTÉ DE MÉDECINE DE NANCY

2002

N° 111

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR EN MÉDECINE

Présentée et soutenue publiquement
dans le cadre du troisième cycle de Médecine Spécialisée

Par

Damien GIRARD

Le 09 Octobre 2002

ANALYSE OPTOÉLECTRONIQUE DE LA MARCHE APRÈS ARTHRODÈSE MÉTATARSO-PHALANGIENNE DE L'HALLUX

À propos de 15 observations

Examineurs de la thèse:

Monsieur Le Professeur J.P. DELAGOUTTE

Président

Monsieur Le Professeur J.M. ANDRÉ

}

Monsieur Le Professeur D. MAINARD

}

Juges

Monsieur Le Docteur N. MARTINET

}

BIBLIOTHEQUE MEDECINE NANCY 1



D

007 209970 5

THÈSE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR EN MÉDECINE

Présentée et soutenue publiquement
dans le cadre du troisième cycle de Médecine Spécialisée

Par

Damien GIRARD

Le 09 Octobre 2002

ANALYSE OPTOÉLECTRONIQUE DE LA MARCHE APRÈS ARTHRODÈSE MÉTATARSO-PHALANGIENNE DE L'HALLUX

À propos de 15 observations

Examineurs de la thèse:

Monsieur Le Professeur J.P. DELAGOUTTE

Président

Monsieur Le Professeur J.M. ANDRÉ

}

Monsieur Le Professeur D. MAINARD

}

Monsieur Le Docteur N. MARTINET

}

Juges



FACULTÉ DE MÉDECINE DE NANCY

Président de l'Université : Professeur Claude BURLET

Doyen de la Faculté de Médecine : Professeur Jacques ROLAND

Vice-Doyen de la Faculté de Médecine : Professeur Hervé VESPIGNANI

Assesseurs

du 1^{er} Cycle :

du 2^{ème} Cycle :

du 3^{ème} Cycle :

de la Vie Facultaire :

Mme le Docteur Chantal KOHLER

Mr le Professeur Jean-Pierre BRONOWICKI

Mr le Professeur Henry COUDANE

Mr le Professeur Bruno LEHEUP

DOYENS HONORAIRES

Professeur Adrien DUPREZ – Professeur Jean-Bernard DUREUX

Professeur Georges GRIGNON

PROFESSEURS HONORAIRES

Louis PIERQUIN – Etienne LEGAIT – Jean LOCHARD – René HERBEUVAL – Gabriel FAIVRE – Jean-Marie FOLIGUET
Guy RAUBER – Paul SADOUL – Raoul SENAULT – Pierre ARNOULD – Roger BENICHOUX – Marcel RIBON
Jacques LACOSTE – Jean BEUREY – Jean SOMMELET – Pierre HARTEMANN – Emile de LAVERGNE
Augusta TREHEUX – Michel MANCIAUX – Paul GUILLEMIN – Pierre PAYSANT
Jean-Claude BURDIN – Claude CHARDOT – Jean-Bernard DUREUX – Jean DUHEILLE – Jean-Pierre GRILLIAT
Pierre LAMY – Jean-Marie GILGENKRANTZ – Simone GILGENKRANTZ
Pierre ALEXANDRE – Robert FRISCH – Michel PIERSON – Jacques ROBERT
Gérard DEBRY – Georges GRIGNON – Pierre TRIDON – Michel WAYOFF – François CHERRIER – Oliéro GUERCI
Gilbert PERCEBOIS – Claude PERRIN – Jean PREVOT – Pierre BERNADAC – Jean FLOQUET
Alain GAUCHER – Michel LAXENAIRE – Michel BOULANGE – Michel DUC – Claude HURIET – Pierre LANDES
Alain LARCAN – Gérard VAILLANT – Daniel ANTHOINE – Pierre GAUCHER – René-Jean ROYER
Hubert UFFHOLTZ – Jacques LECLERE – Francine NABET – Jacques BORRELLY
Michel RENARD – Jean-Pierre DESCHAMPS – Pierre NABET – Marie-Claire LAXENAIRE – Adrien DUPREZ – Paul VERT

=====

**PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS -
PRATICIENS HOSPITALIERS**

(Disciplines du Conseil National des Universités)

42^{ème} Section : MORPHOLOGIE ET MORPHOGENÈSE

1^{ère} sous-section : (Anatomie)

Professeur Jacques ROLAND – Professeur Gilles GROSDIDIER

Professeur Pierre LASCOMBES – Professeur Marc BRAUN

2^{ème} sous-section : (Cytologie et histologie)

Professeur Bernard FOLIGUET

3^{ème} sous-section : (Anatomie et cytologie pathologiques)

Professeur François PLENAT - Professeur Jean-Michel VIGNAUD – Professeur Eric LABOUYRIE

43^{ème} Section : BIOPHYSIQUE ET IMAGERIE MÉDICALE

1^{ère} sous-section : (Biophysique et médecine nucléaire)

Professeur Alain BERTRAND – Professeur Gilles KARCHER – Professeur Pierre-Yves MARIE

2^{ème} sous-section : (Radiologie et imagerie médicale)

Professeur Jean-Claude HOEFFEL – Professeur Luc PICARD – Professeur Denis REGENT

Professeur Michel CLAUDON – Professeur Serge BRACARD – Professeur Alain BLUM

Professeur Jacques FELBLINGER

44^{ème} Section : BIOCHIMIE, BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLÉCULAIRE, PHYSIOLOGIE ET NUTRITION

1^{ère} sous-section : (Biochimie et biologie moléculaire)

Professeur Jean-Pierre NICOLAS

Professeur Jean-Louis GUÉANT – Professeur Jean-Luc OLIVIER

2^{ème} sous-section : (Physiologie)

Professeur Jean-Pierre CRANCE – Professeur Jean-Pierre MALLIE

Professeur François MARCHAL – Professeur Philippe HAOUZI

3^{ème} sous-section : (Biologie cellulaire)

Professeur Claude BURLET

4^{ème} sous-section : (Nutrition)

Professeur Olivier ZIEGLER

45^{ème} Section : MICROBIOLOGIE, MALADIES TRANSMISSIBLES ET HYGIÈNE

1^{ère} sous-section : (Bactériologie – virologie ; hygiène hospitalière)

Professeur Alain LE FAOU

2^{ème} sous-section : (Parasitologie et mycologie)

Professeur Bernard FORTIER

3^{ème} sous-section : (Maladies infectieuses ; maladies tropicales)

Professeur Philippe CANTON – Professeur Thierry MAY – Professeur Christian RABAUD

46^{ème} Section : SANTÉ PUBLIQUE, ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ

1^{ère} sous-section : (Épidémiologie, économie de la santé et prévention)

Professeur Philippe HARTEMANN – Professeur Serge BRIANÇON

Professeur Francis GUILLEMIN – Professeur Denis ZMIROU

2^{ème} sous-section : (Médecine et santé au travail)

Professeur Guy PETIET

3^{ème} sous-section : (Médecine légale et droit de la santé)

Professeur Henry COUDANE

4^{ème} sous-section : (Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication)

Professeur Bernard LEGRAS – Professeur François KOHLER

47^{ème} Section : CANCÉROLOGIE, GÉNÉTIQUE, HÉMATOLOGIE, IMMUNOLOGIE

1^{ère} sous-section : (Hématologie ; transfusion)

Professeur Christian JANOT – Professeur Thomas LECOMPTE – Professeur Pierre BORDIGONI

Professeur Pierre LEDERLIN – Professeur Jean-François STOLTZ

2^{ème} sous-section : (Cancérologie ; radiothérapie)

Professeur François GUILLEMIN – Professeur Thierry CONROY

Professeur Pierre BEY – Professeur Didier PEIFFERT

3^{ème} sous-section : (Immunologie)

Professeur Gilbert FAURE – Professeur Marie-Christine BENE

4^{ème} sous-section : (Génétique)

Professeur Philippe JONVEAUX – Professeur Bruno LEHEUP

**48^{ème} Section : ANESTHÉSIOLOGIE, RÉANIMATION, MÉDECINE D'URGENCE,
PHARMACOLOGIE ET THÉRAPEUTIQUE**

1^{ère} sous-section : (Anesthésiologie et réanimation chirurgicale)

Professeur Claude MEISTELMAN – Professeur Dan LONGROIS – Professeur Hervé BOUAZIZ – Professeur Paul-Michel MERTEZ

2^{ème} sous-section : (Réanimation médicale)

Professeur Henri LAMBERT – Professeur Alain GERARD – Professeur Bruno LÉVY

Professeur Pierre-Edouard BOLLAERT

3^{ème} sous-section : (Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique)

Professeur Patrick NETTER – Professeur Pierre GILLET

4^{ème} sous-section : (Thérapeutique)

Professeur François PAILLE – Professeur Gérard GAY – Professeur Faiez ZANNAD

49^{ème} Section : PATHOLOGIE NERVEUSE ET MUSCULAIRE, PATHOLOGIE MENTALE, HANDICAP et RÉÉDUCATION

1^{ère} sous-section : (Neurologie)

Professeur Michel WEBER – Professeur Gérard BARROCHE – Professeur Hervé VESPIGNANI

Professeur Xavier DUCROCQ

2^{ème} sous-section : (Neurochirurgie)

Professeur Henri HEPNER – Professeur Jean-Claude MARCHAL – Professeur Jean AUQUE

Professeur Thierry CIVIT

3^{ème} sous-section : (Psychiatrie d'adultes)

Professeur Jean-Pierre KAHN

4^{ème} sous-section : (Pédopsychiatrie)

Professeur Colette VIDAILHET – Professeur Daniel SIBERTIN-BLANC

5^{ème} sous-section : (Médecine physique et de réadaptation)

Professeur Jean-Marie ANDRE

50^{ème} Section : PATHOLOGIE OSTÉO-ARTICULAIRE, DERMATOLOGIE et CHIRURGIE PLASTIQUE

1^{ère} sous-section : (Rhumatologie)

Professeur Jacques POUREL – Professeur Isabelle VALCKENAERE

2^{ème} sous-section : (Chirurgie orthopédique et traumatologique)

Professeur Daniel SCHMITT – Professeur Jean-Pierre DELAGOUTTE – Professeur Daniel MOLE

Professeur Didier MAINARD

3^{ème} sous-section : (Dermato-vénéréologie)

Professeur Jean-Luc SCHMUTZ – Professeur Annick BARBAUD

4^{ème} sous-section : (Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique)

Professeur François DAP

51^{ème} Section : PATHOLOGIE CARDIORESPIRATOIRE et VASCULAIRE

1^{ère} sous-section : (Pneumologie)

Professeur Jean-Marie POLU - Professeur Yves MARTINET

Professeur Jean-François CHABOT

2^{ème} sous-section : (Cardiologie)

Professeur Etienne ALIOT – Professeur Yves JUILLIERE – Professeur Nicolas SADOUL –

Professeur Christian de CHILLOU de CHURET

3^{ème} sous-section : (Chirurgie thoracique et cardiovasculaire)

Professeur Pierre MATHIEU – Professeur Jean-Pierre VILLEMOT

Professeur Jean-Pierre CARTEAUX – Professeur Loïc MACE

4^{ème} sous-section : (Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire)

Professeur Gérard FIEVE

52^{ème} Section : MALADIES DES APPAREILS DIGESTIF et URINAIRE

1^{ère} sous-section : (Gastroentérologie ; hépatologie)

Professeur Marc-André BIGARD

Professeur Jean-Pierre BRONOWICKI

2^{ème} sous-section : (Chirurgie digestive)

3^{ème} sous-section : (Néphrologie)

Professeur Michèle KESSLER – Professeur Dominique HESTIN (Mme)

4^{ème} sous-section : (Urologie)

Professeur Philippe MANGIN – Professeur Jacques HUBERT

53^{ème} Section : MÉDECINE INTERNE, GÉRIATRIE et CHIRURGIE GÉNÉRALE

1^{ère} sous-section : (Médecine interne)

Professeur Gilbert THIBAUT – Professeur Francis PENIN

Professeur Denise MONERET-VAUTRIN – Professeur Denis WAHL

Professeur Jean DE KORWIN KROKOWSKI – Professeur Pierre KAMINSKY – Professeur Athanase BENETOS

Professeur Gisèle KANNY

2^{ème} sous-section : (Chirurgie générale)

Professeur Patrick-BOISSEL – Professeur Laurent BRESLER

54^{ème} Section : DÉVELOPPEMENT ET PATHOLOGIE DE L'ENFANT, GYNÉCOLOGIE-OBSTÉTRIQUE, ENDOCRINOLOGIE ET REPRODUCTION

1^{ère} sous-section : (Pédiatrie)

Professeur Danièle SOMMELET – Professeur Michel VIDAILHET
Professeur Pierre MONIN – Professeur Jean-Michel HASCOET – Professeur Pascal CHASTAGNER

2^{ème} sous-section : (Chirurgie infantile)

Professeur Michel SCHMITT – Professeur Gilles DAUTEL

3^{ème} sous-section : (Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale)

Professeur Michel SCHWEITZER – Professeur Jean-Louis BOUTROY

Professeur Philippe JUDLIN – Professeur Patricia BARBARINO

4^{ème} sous-section : (Endocrinologie et maladies métaboliques)

Professeur Pierre DROUIN – Professeur Georges WERYHA – Professeur Marc KLEIN

5^{ème} sous-section : (Biologie et médecine du développement et de la reproduction)

Professeur Hubert GERARD

55^{ème} Section : PATHOLOGIE DE LA TÊTE ET DU COU

1^{ère} sous-section : (Oto-rhino-laryngologie)

Professeur Claude SIMON – Professeur Roger JANKOWSKI

2^{ème} sous-section : (Ophtalmologie)

Professeur Antoine RASPILLER – Professeur Jean-Luc GEORGE – Professeur Jean-Paul BERROD

3^{ème} sous-section : (Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie)

Professeur Michel STRICKER – Professeur Jean-François CHASSAGNE

=====

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS

27^{ème} section : INFORMATIQUE

Professeur Jean-Pierre MUSSE

64^{ème} Section : BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLÉCULAIRE

Professeur Daniel BURNEL

=====

PROFESSEUR ASSOCIÉ

Épidémiologie, économie de la santé et prévention

Professeur Tan XIAODONG

=====

MAÎTRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS

42^{ème} Section : MORPHOLOGIE ET MORPHOGENÈSE

1^{ère} sous-section : (Anatomie)

Docteur Bruno GRIGNON – Docteur Jean-Pascal FYAD

2^{ème} sous-section : (Cytologie et histologie)

Docteur Edouard BARRAT – Docteur Jean-Claude GUEDENET

Docteur Françoise TOUATI – Docteur Chantal KOHLER

3^{ème} sous-section : (Anatomie et cytologie pathologiques)

Docteur Yves GRIGNON – Docteur Béatrice MARIE

Docteur Laurent ANTUNES

43^{ème} Section : BIOPHYSIQUE ET IMAGERIE MÉDICALE

1^{ère} sous-section : (*Biophysique et médecine nucléaire*)

Docteur Marie-Hélène LAURENS – Docteur Jean-Claude MAYER
Docteur Pierre THOUVENOT – Docteur Jean-Marie ESCANYE – Docteur Amar NAOUN

44^{ème} Section : BIOCHIMIE, BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLÉCULAIRE, PHYSIOLOGIE ET NUTRITION

1^{ère} sous-section : (*Biochimie et biologie moléculaire*)

Docteur Xavier HERBEUVAL – Docteur Jean STRACZEK
Docteur Sophie FREMONT – Docteur Isabelle GASTIN – Dr Bernard NAMOUR

2^{ème} sous-section : (*Physiologie*)

Docteur Gérard ETHEVENOT – Docteur Nicole LEMAU de TALANCE – Christian BEYAERT

45^{ème} Section : MICROBIOLOGIE, MALADIES TRANSMISSIBLES ET HYGIÈNE

1^{ère} sous-section : (*Bactériologie – Virologie ; hygiène hospitalière*)

Docteur Francine MORY – Docteur Michèle WEBER – Docteur Christine LION
Docteur Michèle DAILLOUX – Docteur Alain LOZNIEWSKI – Docteur Véronique VENARD

2^{ème} sous-section : (*Parasitologie et mycologie*)

Docteur Marie-France BIAVA – Docteur Nelly CONTET-AUDONNEAU

46^{ème} Section : SANTÉ PUBLIQUE, ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ

1^{ère} sous-section : (*Epidémiologie, économie de la santé et prévention*)

Docteur Mickaël KRAMER – Docteur François ALLA

4^{ème} sous-section : (*Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication (type biologique)*)
Docteur Pierre GILLOIS

47^{ème} Section : CANCÉROLOGIE, GÉNÉTIQUE, HÉMATOLOGIE, IMMUNOLOGIE

1^{ère} sous-section : (*Hématologie ; transfusion*)

Docteur Jean-Claude HUMBERT – Docteur François SCHOONEMAN

3^{ème} sous-section : (*Immunologie*)

Docteur Marie-Nathalie SARDA

4^{ème} sous-section : (*Génétique*)

Docteur Christophe PHILIPPE

**48^{ème} Section : ANESTHÉSIOLOGIE, RÉANIMATION, MÉDECINE D'URGENCE,
PHARMACOLOGIE ET THÉRAPEUTIQUE**

1^{ère} sous-section : (*Anesthésiologie et réanimation chirurgicale*)

Docteur Jacqueline HELMER – Docteur Gérard AUDIBERT

3^{ème} sous-section : (*Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique*)

Docteur Françoise LAPICQUE – Docteur Marie-José ROYER-MORROT
Docteur Damien LOEUILLE

**54^{ème} Section : DÉVELOPPEMENT ET PATHOLOGIE DE L'ENFANT, GYNÉCOLOGIE-OBSTÉTRIQUE,
ENDOCRINOLOGIE ET REPRODUCTION**

5^{ème} sous-section : (*Biologie et médecine du développement et de la reproduction*)

Docteur Jean-Louis CORDONNIER

=====

MAÎTRES DE CONFÉRENCES

19^{ème} section : SOCIOLOGIE, DÉMOGRAPHIE

Madame Michèle BAUMANN

32^{ème} section : CHIMIE ORGANIQUE, MINÉRALE, INDUSTRIELLE

Monsieur Jean-Claude RAFT

40^{ème} section : SCIENCES DU MÉDICAMENT

Monsieur Jean-Yves JOUZEAU

60^{ème} section : MÉCANIQUE, GÉNIE MÉCANIQUE ET GÉNIE CIVILE

Monsieur Alain DURAND

64^{ème} section : BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLÉCULAIRE

Madame Marie-Odile PERRIN – Mademoiselle Marie-Claire LANHERS

65^{ème} section : BIOLOGIE CELLULAIRE

Mademoiselle Françoise DREYFUSS – Monsieur Jean-Louis GELLY – Madame Anne GERARD
Madame Ketsia HESS – Monsieur Pierre TANKOSIC – Monsieur Hervé MEMBRE

67^{ème} section : BIOLOGIE DES POPULATIONS ET ÉCOLOGIE

Madame Nadine MUSSE

68^{ème} section : BIOLOGIE DES ORGANISMES

Madame Tao XU-JIANG

=====

MAÎTRES DE CONFÉRENCES ASSOCIÉS

Médecine Générale

Docteur Alain AUBREGE

Docteur Louis FRANCO

=====

PROFESSEURS ÉMÉRITES

Professeur Georges GRIGNON – Professeur Michel PIERSON

Professeur Michel BOULANGE – Professeur Alain LARCAN – Professeur Michel DUC

Professeur Michel WAYOFF – Professeur Daniel ANTHOINE – Professeur Claude HURIET

Professeur Hubert UFFHOLTZ – Professeur René-Jean ROYER

Professeur Pierre GAUCHER – Professeur Claude CHARDOT – Professeur Adrien DUPREZ

=====

DOCTEURS HONORIS CAUSA

Professeur Norman SHUMWAY (1972)

Université de Stanford, Californie (U.S.A)

Professeur Paul MICHIELSEN (1979)

Université Catholique, Louvain (Belgique)

Professeur Charles A. BERRY (1982)

Centre de Médecine Préventive, Houston (U.S.A)

Professeur Pierre-Marie GALETTI (1982)

Brown University, Providence (U.S.A)

Professeur Mamish Nisbet MUNRO (1982)

Massachusetts Institute of Technology (U.S.A)

Professeur Mildred T. STAHLMAN (1982)

Wanderbilt University, Nashville (U.S.A)

Professeur Harry J. BUNCKE (1989)

Université de Californie, San Francisco (U.S.A)

Professeur Théodore H. SCHIEBLER (1989)

Institut d'Anatomie de Würzburg (R.F.A)

Professeur Maria DELIVORIA-PAPADOPOULOS (1996)

Université de Pennsylvanie (U.S.A)

Professeur Mashaki KASHIWARA (1996)

Research Institute for Mathematical Sciences de Kyoto (JAPON)

Professeur Ralph GRÄSBECK (1996)

Université d'Helsinki (FINLANDE)

Professeur James STEICHEN (1997)

Université d'Indianapolis (U.S.A)

Professeur Duong Quang TRUNG (1997)

*Centre Universitaire de Formation et de Perfectionnement des
Professionnels de Santé d'Hô Chi Minh-Ville (VIÊTNAM)*

À notre Maître et Président de Thèse

Monsieur le Professeur J.P. DELAGOUTTE

Professeur de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique

Durant notre formation dans votre service, nous avons été marqué par votre expérience et votre culture orthopédique.

Nous avons pu apprécier votre disponibilité et vos précieux conseils.

Nous espérons être digne de l'honneur que vous nous faites en acceptant la présidence de ce travail et en nous accueillant dans votre service.

Soyez assuré de notre dévouement et de notre profond respect.

À notre Maître et Juge

Monsieur le Professeur J.M. ANDRÉ

Professeur de Rééducation Fonctionnelle

Vos connaissances en rééducation font de vous un juge respecté.

Nous vous remercions de l'honneur que vous nous faites en acceptant de juger ce travail.

À notre Maître et Juge

Monsieur le Professeur D. MAINARD

Professeur de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique

Nous avons été marqué par la rigueur de vos indications et de votre geste chirurgical.

Nous espérons être digne de l'honneur que vous nous faites en jugeant ce travail.

Soyez assuré de notre dévouement et de notre profond respect.

À notre Maître et Juge

Monsieur le Docteur N. MARTINET

Docteur en Rééducation Fonctionnelle

Nous avons été impressionné par vos connaissances et votre dynamisme intellectuel.

Que ce travail soit le témoignage de notre reconnaissance et de notre sincère dévouement.

À nos Maîtres d'Internat

Messieurs les Professeurs DELAGOUTTE et MAINARD

Messieurs les Professeurs SCHMITT et MOLÉ

Monsieur le Professeur LASCOMBES

Messieurs les Professeurs DAUTEL et DAP

Monsieur le Professeur GROSDIDIER

Monsieur le Professeur BORRELLY

Monsieur le Docteur RAVEY

Monsieur le Docteur DUVAL

À Monsieur le Docteur M. CHAMMAS

À Monsieur le Docteur J.M. GUICHET

À Monsieur le Docteur O. ROCHE

Aux Chefs de Clinique- Assistants des Hôpitaux

Mademoiselle le Docteur J. SIAT
Mademoiselle le Docteur L. POKORSKI
Monsieur le Docteur M'B. IRRAZI
Monsieur le Docteur E. MOUREY
Monsieur le Docteur D. ZANARDO
Monsieur le Docteur P. COHEN
Monsieur le Docteur C. NICOUD
Monsieur le Docteur F. LAVRAND
Mademoiselle le Docteur C. HERBEUVAL
Mademoiselle le Docteur H. BERTRAND
Monsieur le Docteur A. AYAV
Monsieur le Docteur C. MAUCOUR
Monsieur le Docteur E. VILLANUEVA
Monsieur le Docteur J.H. AUBRION
Monsieur le Docteur F. SIRVEAUX
Monsieur le Docteur L. GALOIS
Monsieur le Docteur F. PFEFFER
Monsieur le Docteur P. PASQUIER
Monsieur le Docteur J. VIALANEIX
Monsieur le Docteur P. FAIVRE
Monsieur le Docteur B. FERREIRA
Monsieur le Docteur R. TRAVERSARI

qui ont contribué à notre formation

À Marie-Agnès HALDRIC

Sa patience et sa compétence nous ont été d'un grand secours

À David Léonard

Il fut le premier à "expérimenter" notre protocole.
Qu'il soit assuré de toute notre amitié

**À l'ensemble du personnel du Service de Chirurgie Orthopédique et
Traumatologique de l'Hôpital Central**

À mes deux merveilles Pauline et Antoine

Vous êtes ce que j'ai de plus cher
Avec tout mon amour

À ma mère

Qu'elle sache que ce travail est le fruit de tous ses efforts et de son
éducation
Qu'elle sache aussi que je suis fier de porter son nom

À mon grand-père

Qu'il sache toute l'affection que j'ai pour lui

À Virginie, Martine et Jean-Marie

Votre indéfectible soutien m'est indispensable
Soyez assurés de toute mon affection

À toute ma famille

À tous mes amis

**Je dédie cette thèse à la mémoire
de ma grand-mère et de ma grand-tante.**

SERMENT

"Au moment d'être admis à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité. Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux. Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions. J'interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas usage de mes connaissances contre les lois de l'humanité. J'informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences. Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer les consciences. Je donnerai mes soins à l'indigent et à quiconque me les demandera. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admis dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me sont confiés. Reçu à l'intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs. Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité.

Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonoré et méprisé si j'y manque".

SOMMAIRE



INTRODUCTION	p.18
ANATOMIE DE L'ARTICULATION MÉTATARSO- PHALANGIENNE DE L'HALLUX	p.19
BIOMÉCANIQUE	p.31
ÉTUDE DE LA MARCHE NORMALE	p.39
DESCRIPTION DES TECHNIQUES CHIRURGICALES	p.66
INDICATIONS D'ARTHRODÈSE MÉTATARSO- PHALANGIENNE DE L'HALLUX	p.78
MATÉRIEL ET MÉTHODES	p.83
RÉSULTATS	p.109
DISCUSSION	p.122
CONCLUSION	p.134
BIBLIOGRAPHIE	p.136
TABLEAUX	p.147
TABLE DES MATIÈRES	p.161
ANNEXE 1: LISTE DES ILLUSTRATIONS	p.172
ANNEXE 2: LISTE DES TABLEAUX	p.174

INTRODUCTION



L'arthrose métatarso-phalangienne de l'hallux est, en fréquence, la seconde atteinte du premier rayon après l'hallux valgus.

Parmi les différentes interventions chirurgicales proposées pour en effectuer la cure, l'arthrodèse métatarso-phalangienne occupe une place de choix. Bien qu'anti-physiologique puisqu'elle supprime la mobilité d'une articulation, elle n'en apporte pas moins une indolence rapide. L'indication d'une arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux ne peut être retenue que s'il existe une liberté des articulations talo-crurale et interphalangienne.

Trois questions ont motivé l'analyse optoélectronique de la marche de patients ayant bénéficié d'une arthrodèse métatarso-phalangienne uni- ou bilatérale de l'hallux:

➡ **Quelles sont, dans les trois plans de l'espace, les modifications observées lors d'un cycle de la marche sur terrain plat?**

➡ **L'essentiel de la compensation de l'arthrodèse métatarso-phalangienne s'effectue-t'il au niveau de l'articulation talo-crurale ou de l'articulation interphalangienne?**

➡ **Comment le patient s'adapte-t'il à la montée et à la descente des escaliers?**

ANATOMIE DE L'ARTICULATION MÉTATARSO-PHALANGIENNE DE L'HALLUX

Les termes anatomiques utilisés ci-dessous sont issus de la nomenclature anatomique internationale dont la dernière mise à jour remonte à 1998 (26,31).

A-Anatomie descriptive (5, 45, 71, 89)

1-Généralités

Unissant la tête du premier métatarsien à la première phalange, la première articulation métatarso-phalangienne présente une anatomie très différente des autres articulations métatarso-phalangiennes. Il s'agit d'une articulation de type ellipsoïde.

Les deux surfaces articulaires en contact sont d'une part la **tête du premier métatarsien**, sphérique, et d'autre part la **base de la première phalange** de l'hallux, creusée en forme de cupule, correspondant à une cavité glénoïde.

Ces deux extrémités osseuses sont solidarisées par un **manchon capsulo-ligamentaire**. Il est renforcé sur ses faces latérales par les **ligaments collatéraux métatarso-phalangiens** médial et latéral. Il s'agit de lames fibreuses résistantes, triangulaires, s'insérant sur les faces médiale et latérale de la tête métatarsienne et sur les faces correspondantes de la base de la phalange proximale.

Ce manchon capsulo-ligamentaire présente, à sa face inférieure, une lame

cartilagineuse composant le ligament sésamoïdien.

Les deux os sésamoïdes sont inclus dans ce ligament. Ligament sésamoïdien et os sésamoïdes constituent un support à la tête du premier métatarsien. Hohmann (85) prétendait même qu'ils composaient une "chaussure que la nature aurait réservé à l'usage exclusif du premier métatarsien".

Le ligament sésamoïdien permet le roulement de la tête du premier métatarsien au cours des mouvements de flexion-extension pendant l'appui.

Les os sésamoïdes, pour leur part, sont le siège d'un entrecroisement tendineux (Fig.1):

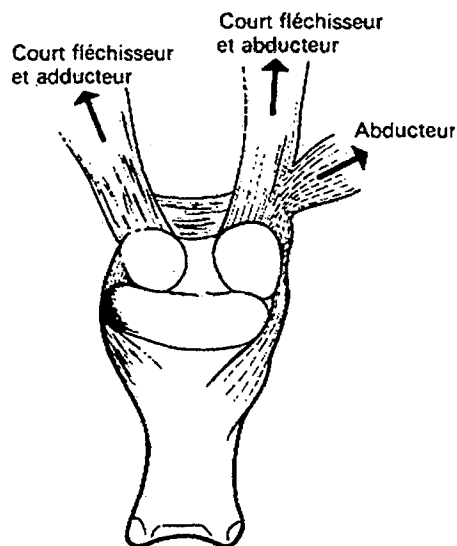


Fig.1-Système gléno-sésamoïdien (89)

Les tendons du muscle adducteur de l'hallux et du muscle court fléchisseur de l'hallux s'insèrent sur le sésamoïde médial;

Le tendon du muscle court fléchisseur de l'hallux et les faisceaux longitudinal et transversal du muscle abducteur de l'hallux s'insèrent sur le

sésamoïde latéral. Ce dernier faisceau donne aussi des expansions vers les faces dorsale et plantaire de l'articulation métatarso-phalangienne, ainsi qu'aux tendons fléchisseur et long extenseur de l'hallux. Ainsi, l'adduction de toutes les formations de l'articulation de l'hallux s'effectue en les rapprochant des autres métatarsiens.

2-Anatomie du premier métatarsien

Le premier métatarsien présente une largeur correspondant au double de celle des autres métatarsiens.

La diaphyse du premier métatarsien a le même calibre que ses épiphyses, contrairement aux autres métatarsiens dont les épiphyses sont plus développées que la diaphyse.

La tête du premier métatarsien est volumineuse et aplatie de haut en bas. Deux dépressions antéro-postérieures sont marquées à sa face inférieure, en rapport avec les deux os sésamoïdes.

Le premier métatarsien présente un **système trabéculaire** particulier (Fig.2). Les travées osseuses sont orientées de manière plastique, selon les lignes de force qui agissent sur l'os. Puerta (89) a étudié les systèmes trabéculaires de 136 métatarsiens et phalanges. On peut résumer ses constatations de la manière suivante.

Le premier métatarsien présente trois systèmes trabéculaires:

*Un **système longitudinal dorsal**, prolongeant les travées osseuses de la moitié dorsale du premier cunéiforme. Réparties uniformément au niveau de l'épiphyse proximale, elles se dirigent vers la corticale au niveau de la

métaphyse. Les travées s'écartent en éventail au niveau de la métaphyse distale. Celles du milieu se dirigent vers la partie plantaire (zone d'appui sésamoïdien), les travées internes s'orientent en dedans, s'entrecroisant avec les travées latérales.

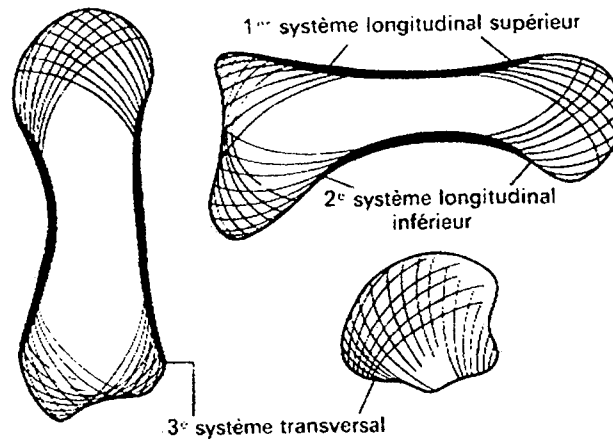


Fig.2-Systèmes trabéculaires du premier métatarsien (89)

*Un **système longitudinal plantaire**, dont les travées s'entremêlent avec celles du système plantaire du premier cunéiforme.

Leur distribution est identique à celle du premier système. Les travées médianes se dirigent vers le bas, les travées médiales se dirigent en dehors. Elles s'ouvrent en éventail au niveau de la métaphyse distale et s'entrecroisent avec le système précédent.

*Un **système transversal** dont les fibres sont orientées perpendiculairement aux précédentes, avec lesquelles elles s'entrecroisent. C'est dans la zone où le premier métatarsien s'articule avec le second que l'on

observe le plus grand nombre de travées en éventail.

Ces travées représentent les lignes de traction et de compression de la base du métatarsien. À la face médiale du premier métatarsien, en raison de l'absence d'articulation à ce niveau, les travées sont à peine ébauchées.

3-Anatomie de la première phalange

Nous considérerons uniquement la base phalangienne qui entre seule en jeu dans l'articulation métatarso-phalangienne.

La base de la phalange est constituée d'une **cavité glénoïde**.

Deux tubercules latéraux sont présents de chaque côté de la base correspondant à l'insertion des ligaments collatéraux de l'articulation.

La première phalange comporte, comme le premier métatarsien, trois systèmes trabéculaires dont la disposition est la suivante:

*Les **premier et second systèmes trabéculaires** ont une disposition analogue à celles des autres os longs.

*Le **troisième système** comporte des travées ne partant d'aucune facette articulaire. Elles partent de la corticale en formant une concavité postérieure. Elles naissent de la base de la phalange et de la diaphyse et atteignent l'épiphyse distale.

4-Anatomie des os sésamoïdes

Constants, ils sont situés à la face inférieure de la première articulation métatarso-phalangienne, au niveau des dépressions marquées à la face inférieure

du premier métatarsien.

Ils sont ovoïdes, allongés d'avant en arrière, le plus volumineux étant le sésamoïde médial.

5-Innervation

5.1-Innervation motrice

Nous considérerons successivement les faces plantaire et dorsale du pied.

5.1.1-Face plantaire du pied

À la face plantaire, les nerfs **plantaires médial et latéral** donnent les nerfs des métatarsiens et des orteils.

C'est le nerf plantaire médial qui fournit l'innervation de l'hallux, ainsi que celle des deuxième et troisième rayons.

Les muscles de l'hallux sont innervés par le nerf plantaire médial excepté le muscle abducteur de l'hallux innervé par le nerf plantaire latéral.

5.1.2-Face dorsale du pied

À la face dorsale, le **nerf tibial antérieur** innerve le muscle pédieux.

5.2-Innervation sensitive

L'innervation sensitive est schématisée ci-dessous (Fig.3).

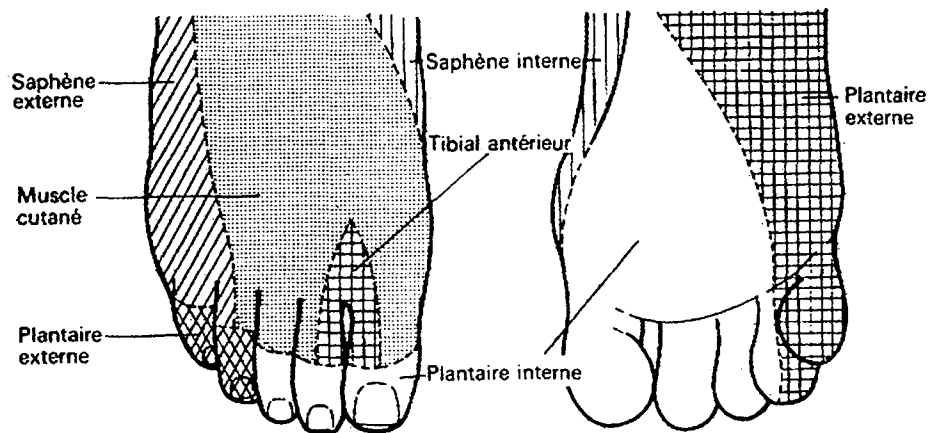


Fig.3-Aires sensibles du pied (89)

(Saphène externe= Sural)

(Musculo-cutané= Fibulaire superficiel)

(Plantaire externe= Plantaire latéral)

(Plantaire interne= Plantaire médial)

(Saphène interne= Saphène)

6-Vascularisation

La vascularisation de l'hallux provient des deux branches de terminaison de l'artère tibiale postérieure (Fig.4 et 5):

l'artère plantaire latérale;

l' artère plantaire médiale;

ainsi que d'une branche collatérale de l'artère dorsale du pied: **l'interosseuse dorsale du premier espace.**

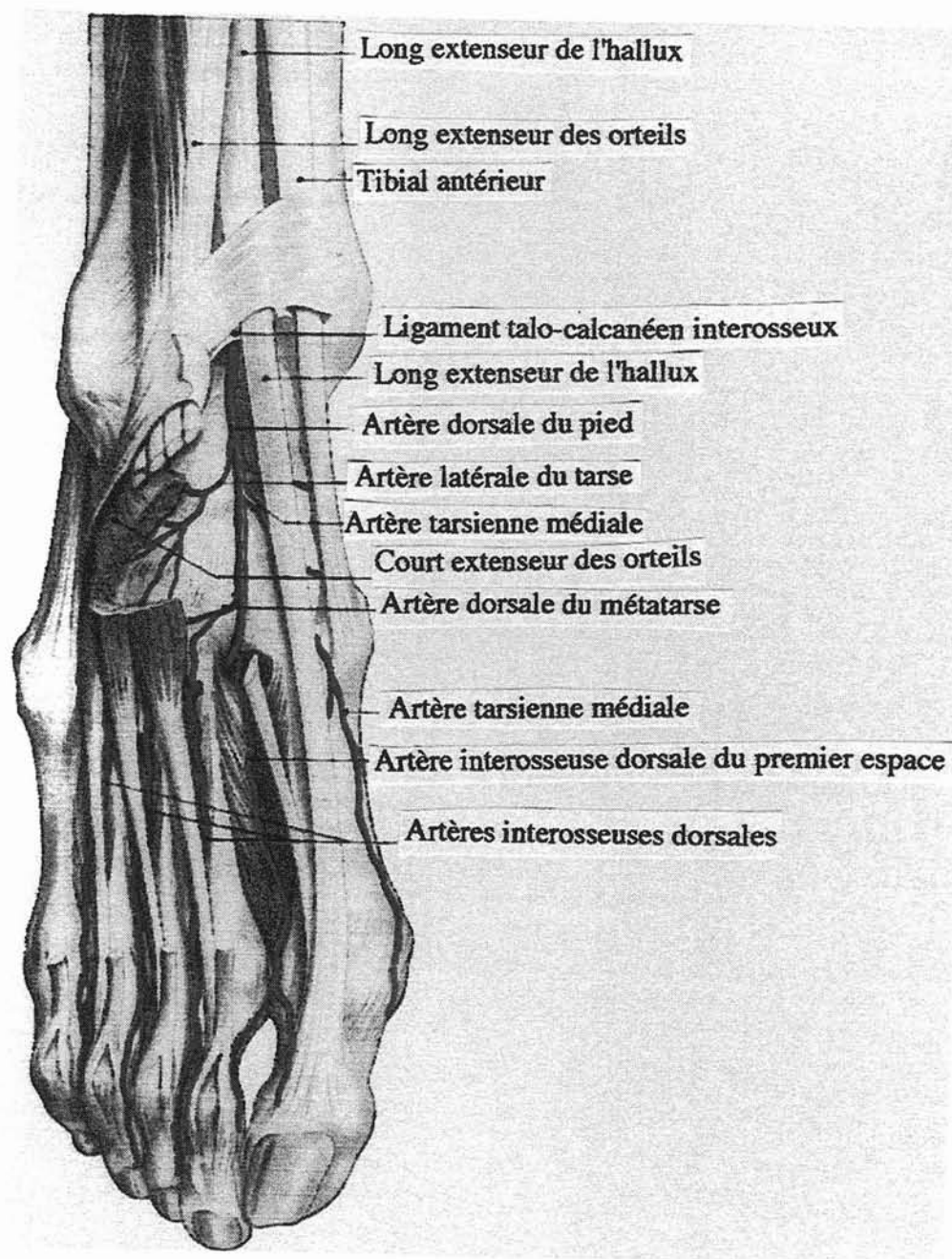


Fig.4- Vascularisation de la face dorsale du pied (d'après 71)

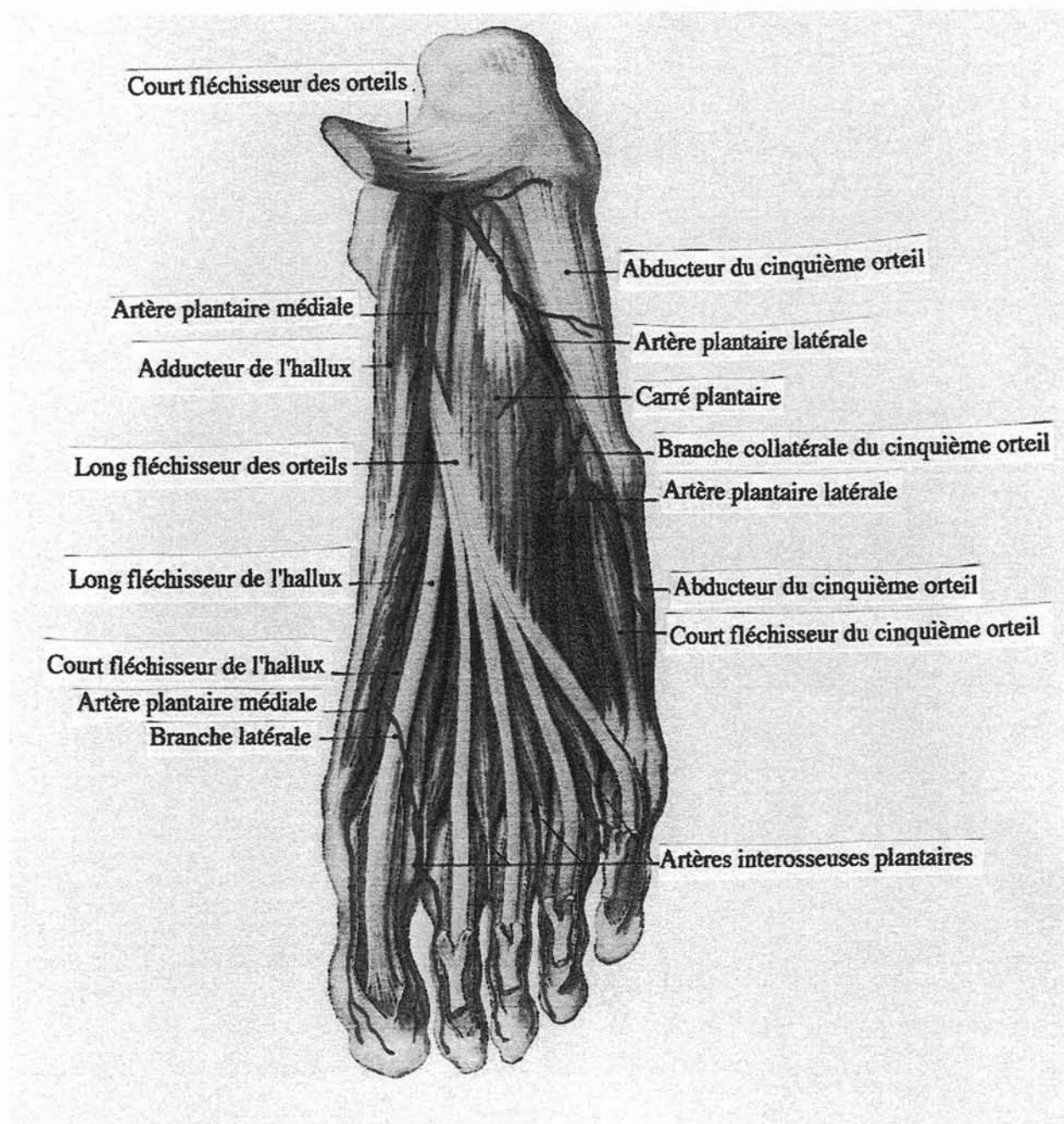


Fig.5-Vascularisation de la face plantaire du pied (d'après 71)

6.1-Artère plantaire latérale

L'**artère plantaire latérale** est la plus volumineuse des deux. On peut diviser son trajet en deux portions.

La première est dite portion oblique, appliquée sur le carré plantaire.

La seconde est dite portion transversale ou arcade plantaire, passant sur la base des métatarsiens et sur l'extrémité postérieure des muscles interosseux.

L'artère plantaire latérale s'anastomose à l'artère dorsale du pied au niveau de l'extrémité postérieure du premier espace inter-osseux. Elle donne alors ses branches collatérales, dont les principales naissent de l'arcade plantaire.

Il s'agit:

***Des perforantes postérieures:**

Celle qui concerne le premier espace est représentée par une anastomose de l'artère plantaire latérale avec l'artère dorsale du pied;

***De la collatérale latérale du cinquième orteil;**

***Des interosseuses plantaires des deuxième, troisième et quatrième espaces;**

***De l'interosseuse du premier espace:**

Elle naît de la réunion de l'artère plantaire latérale et de l'artère dorsale du pied.

Elle donne deux branches:

- Une **branche médiale** qui est la collatérale plantaire médiale de l'hallux;
- Une **branche latérale** qui se divise en collatérale latérale de l'hallux et en collatérale médiale du deuxième orteil.

6.2-Artère plantaire médiale

L'artère plantaire médiale, plus grêle, se dirige d'emblée vers l'hallux. Elle se termine en donnant une **branche médiale** ou collatérale médiale de l'hallux et une **branche latérale** s'anastomosant avec les interosseuses des premier et deuxième espaces, branches de l'artère plantaire latérale.

6.3-Interosseuse dorsale du premier espace

L'interosseuse dorsale du premier espace se divise en trois branches. La **branche médiale** donne les collatérales dorsales médiale et latérale de l'hallux.

La **branche latérale** donne la collatérale dorsale médiale du deuxième espace. Elle donne enfin une **perforante antérieure** volumineuse s'anastomosant avec l'interosseuse plantaire du premier espace.

B-Anatomie fonctionnelle

Les amplitudes des articulations métatarso-phalangienne et interphalangienne ont été étudiées par plusieurs auteurs, notamment Joseph J. (44). Les valeurs données ci-dessous ont été déterminées chez des patients de plus de 45 ans.

En position neutre, l'articulation métatarso-phalangienne est en dorsiflexion en moyenne d'environ 16,2°, tandis que l'articulation interphalangienne se trouve à 13,4° de dorsiflexion..

La flexion plantaire active est en moyenne d'environ 17,6° (de 3 à 43°) au niveau métatarso-phalangien et 42,6° (de 0 à 86°) au niveau interphalangien.

La flexion dorsale active est en moyenne d'environ 46,3° au niveau métatarso-phalangien et 7,3° au niveau interphalangien.

La flexion dorsale passive métatarso-phalangienne permet d'augmenter en moyenne d'environ 24,6° la valeur de la flexion dorsale active, soit 70,9° (de 40 à 100°) au total.

La flexion dorsale passive interphalangienne permet d'augmenter en moyenne d'environ 22,4° la valeur de la flexion dorsale active, soit 29,7° (de 6 à 73°) au total.

Dans le plan frontal, la mobilité en varus-valgus est comprise entre 5 et 20° avec une moyenne à 15,7° +/- 6°.

La marche normale nécessite 60° dorsiflexion (12).

La plupart des sports nécessitent plus de 90° dorsiflexion (13).

BIOMÉCANIQUE

A-Notions de biomécanique (1, 4, 41, 73)

1-Cinématique

Sous-division de la biomécanique, elle permet l'étude des vitesses angulaires.

Plusieurs variables sont utilisées pour décrire le mouvement d'un segment du corps: il s'agit du **déplacement**, de la **vitesse**, de l'**accélération** et du **temps**.

Les mouvements d'un corps sont analysés dans les trois plans de l'espace: plan **frontal**, plan **sagittal** et plan **transversal** (ou horizontal).

Les mouvements angulaires d'un corps sont donc décrits dans un système de coordonnées selon un référentiel (O, x, y, z). Ceci permet de calculer les amplitudes articulaires des mouvements des différents segments les uns par rapport aux autres.

2-Cinétique

Sous-division de la biomécanique, elle permet l'étude des forces mises en jeu lors de la marche humaine.

Sont donc analysés les forces qui agissent sur le corps humain, le poids du corps et le mouvement de chaque segment.

Nous allons successivement envisager les différentes notions faisant partie de la cinétique:

- *les **forces**;
- *les **moments**;
- *les **notions d'équilibre statique et dynamique**;
- *les **forces de réaction au sol**.

2.1-Forces

Une force est définie comme étant la quantité qui tend à changer la vitesse linéaire d'un objet.

La force est égale au produit de la masse d'un objet accéléré et de l'accélération de l'objet. Toute force peut donc changer la vitesse ou la direction d'un objet.

Elle est caractérisée par son amplitude et sa direction.

La direction d'une force requiert pour déterminer ses coordonnées dans les trois plans de l'espace un référentiel (O, x, y, z). Ce référentiel permet de déterminer le point d'application de la force.

Une force est caractérisée par un vecteur $F_m(A \rightarrow B)$ correspondant à une force exercée au point m par le corps A sur le corps B. L'unité de mesure est le Newton (N) résultant du produit de la masse (kg) par l'accélération (m/s^2).

En analyse du mouvement, les unités de force sont normalisées en fonction du poids du patient et sont exprimées en pourcentage du poids du corps.

On distingue les forces intérieures et les forces extérieures.

Les **forces intérieures** représentent les forces exercées par les tissus mous (capsules et ligaments), les muscles et les forces de coaptation articulaires entre deux segments de membre;

Les **forces extérieures** représentent l'action de la gravité universelle, l'inertie (résistance d'un objet à tout déplacement) et les forces de réaction du sol.

2.2-Moments

Un moment est la quantité qui tend à changer la vitesse angulaire d'un objet. Le moment d'action d'une force par rapport à un point est l'action de la force appliquée à un objet qui entraîne une rotation autour d'un axe.

Prenons l'exemple d'un plan P défini par un point A et une force F (Fig.6).

Soit h la distance entre le point A et le point d'intersection de la perpendiculaire à la ligne d'action de la force F passant par A.

Le moment M de la force F par rapport à A est un vecteur de direction perpendiculaire au plan P, de norme égale au produit de F par h, de sens défini par la position de F par rapport à A en utilisant le Bonhomme d'Ampère. Le moment est un produit vectoriel et son unité de mesure est le N.m dont l'équivalent est le $\text{kg.m}^2/\text{s}^2$.

En analyse du mouvement, les unités de moment sont normalisées en fonction du poids et de la taille du patient et sont exprimées en pourcentage du poids du corps et de la taille.

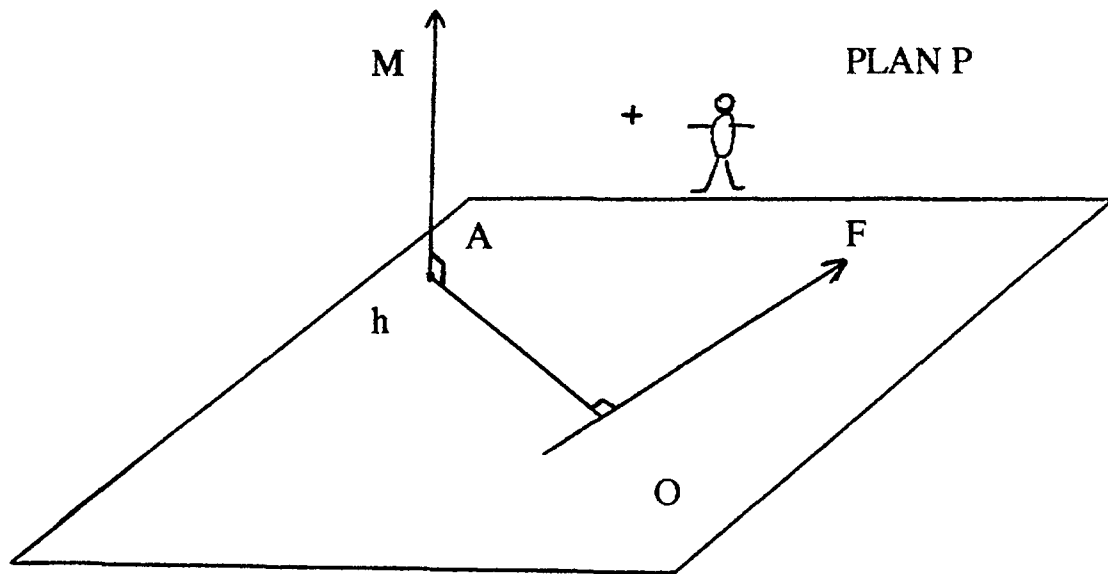


Fig.6-Représentation graphique du moment d'une force

2.3-Équilibres statique et dynamique

On peut déterminer un état d'équilibre selon les lois de Newton à partir de la connaissance des forces intérieures et extérieures.

Un corps est en équilibre statique si la somme des forces ($\sum F$) translationnelles et la somme des moments ($\sum M$) rotatoires qui s'exercent sur lui sont nulles.

Cette condition est nécessaire et suffisante.

Un corps est en équilibre dynamique si la somme des forces égale la valeur de la gravité ($\sum F=ma$ ou m est la masse corporelle et a l'accélération linéaire) et si la somme des moments égale la valeur du moment d'inertie ($\sum M=I\alpha$ ou α est l'accélération angulaire).

2.4-Force de réaction du sol

Lors de la marche, le passage du poids du corps d'un membre inférieur à l'autre entraîne la création de forces verticales, horizontales et rotatoires. Ces forces correspondent à la réaction du sol en réponse aux actions musculaires et au poids du corps transmis par le pied.

La force de réaction du sol est mesurée par une plate-forme de force: il s'agit d'une plaque rigide avec des capteurs piezzo-électriques couplés à des jauges de pression.

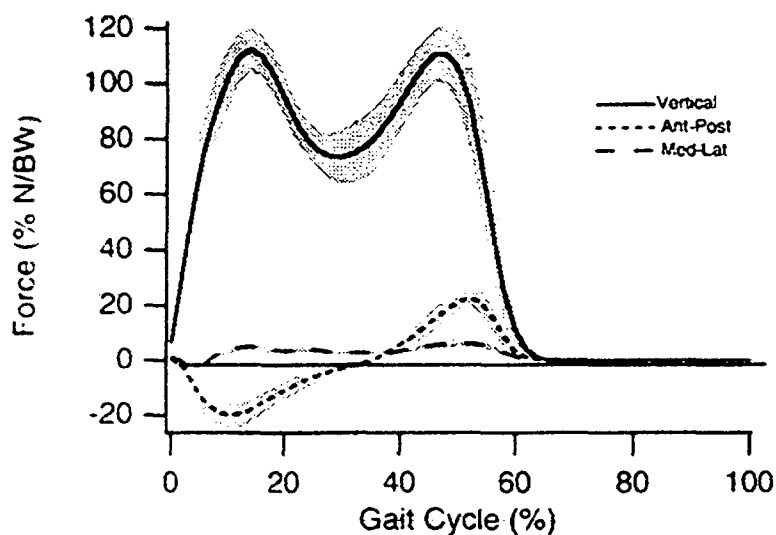


Fig.7-Force de réaction du sol (68)

Les forces de réaction sont converties ainsi en signaux électriques dont l'intensité et la direction sont proportionnelles à l'intensité et à la direction des forces transmises par le pied au cours de la marche.

La **force de réaction du sol (Fig.7)** peut être déterminée dans l'espace et se décompose en trois composantes:

- *Une **composante verticale** (la plus importante);

- *Deux **composantes horizontales** de cisaillement (une dans le plan antéro-postérieur de progression et une dans le plan latéro-médial qui agit de dedans en dehors).

*La composante verticale doit être au moins égale au poids du corps pour maintenir le centre de gravité au-dessus du sol.

Quand cette force verticale est plus faible que le poids du corps, le centre de gravité s'abaisse et permet ainsi l'accélération du corps.

Quand cette force verticale est plus forte que le poids du corps, le centre de gravité s'élève et permet ainsi la décélération du corps.

L'amplitude de cette composante est dépendante de la vitesse de la marche.

Elle peut être caractérisée par une **courbe sinusoïde** avec deux pics et une zone décroissante (Winter).

Le **premier pic** répond à la partie moyenne de la phase d'appui et correspond à l'amortissement du poids du corps.

Le **deuxième pic** répond à la partie terminale de la phase d'appui, juste avant la phase oscillante. Il correspond au ralentissement du centre de gravité avant la phase de contrôle musculaire du membre oscillant.

Entre ces deux pics, la force de réaction du sol est inférieure au poids du corps.

Le centre de gravité subit une accélération qui correspond au transfert du poids du corps d'un membre inférieur à l'autre.

*Les forces de cisaillement horizontales sont corrélées au déplacement du centre de gravité dans ces deux plans.

Lors du contact du pied avec le sol, la force de réaction du sol est de direction verticale mais se modifie immédiatement du fait du déplacement antérieur du corps. Ceci se traduit par une force de réaction du sol de direction postérieure.

À la partie moyenne du cycle de la marche, la direction du vecteur est verticale. La dorsiflexion plantaire de la cheville permet le déplacement de la base du vecteur au fur et à mesure du déplacement du centre de gravité.

À la partie terminale de la phase d'appui, le déplacement antérieur du centre de gravité sur l'avant-pied entraîne une contrainte de cisaillement postérieure qui se traduit par une force de réaction du sol de direction antérieure. Il en résulte que le point de contact du pied avec le sol débute à la partie médiale du talon pour rapidement devenir latéral pendant la partie moyenne et se déporte ensuite médialement vers l'hallux juste avant le début de la phase oscillante. La force de réaction du sol est très importante car elle permet de générer des moments qui entraîneront des contractions musculaires.

B-Biomécanique de l'articulation métatarso-phalangienne de l'hallux (1, 4, 76)

1-Centres instantanés de rotation

Dans le cas de sujets normaux, les centres instantanés de rotation de la première articulation métatarso-phalangienne se projettent à l'intérieur de la tête

métatarsienne dans le plan sagittal.

Chez les patients porteurs d'hallux rigidus, les centres instantanés de rotation se trouvent dispersés et excentrés. Ceci est probablement dû à la présence d'une exostose dorsale, d'une dégénérescence articulaire et/ou d'un état cicatriciel des structures tissulaires molles juxta-articulaires.

2-Déplacement de la surface de l'articulation

Dans le cas de sujets normaux, les vecteurs de vitesse de surface montrent un glissement tangentiel de la flexion plantaire maximale à la dorsiflexion modérée, avec un blocage lors de la dorsiflexion extrême.

Chez les patients porteurs d'un hallux rigidus, on observe quelques interruptions prématurées dans la flexion plantaire et plutôt un blocage marqué durant la dorsiflexion. Les vecteurs de vitesse de surface ne sont pas aussi tangents aux surfaces articulaires. Ces surfaces tendent à se bloquer ensemble ou à se séparer durant l'angle de déplacement. Ceci est probablement causé par une usure articulaire, des ostéophytes marginaux, un allongement et une contracture des structures juxta-articulaires.

ÉTUDE DE LA MARCHÉ NORMALE

A-Historique (10, 24, 59)

L'étude de la marche est longtemps restée purement visuelle. Elle est étroitement liée aux avancées technologiques et scientifiques au cours du temps. **Aristote** donne les premières observations sur le déplacement des humains. Il établit que ce sont des contractions musculaires qui sont responsables du déplacement angulaire des différents segments de membre.

En 285 avant J.C., **Éristrate** décrit les mouvements des articulations. Dans le milieu artistique, **De Vinci** et **Dürer** publient des images des diverses postures du corps humain.

Au dix-septième siècle, **Borelli**, dans "De Motu Animalum", donne de multiples informations sur la biomécanique du corps humain. Il étudie les mouvements alternés permettant de maintenir l'équilibre du centre de gravité global du corps au cours de la marche.

En 1836, les frères **Weber** décrivent les paramètres temporels et spatiaux de la marche.

En 1872, **Marey** et **Carlet** développent la méthode pneumatographique. Le principe est de faire marcher un patient dont les chaussures sont dotées d'un capteur de pression relié à un oscilloscope, sur une chambre à air d'environ 20m de diamètre. Des points fixes du corps du patient sont reliés au même appareil.

Ainsi, les différences de pression sur le sol et les oscillations verticales et horizontales du pelvis sont mesurées, et les différentes phases du cycle de la marche peuvent être caractérisées.

Quelques années plus tard, l'Américain **Muybridge**, suivi de **Marey**, conçoit un appareil permettant de photographier la marche de patients, à intervalles réguliers et très brefs, et ainsi d'analyser les différents temps de la marche. Cette technique, baptisée **chronophotographie**, restera la seule utilisée pendant une quinzaine d'années.

En 1895, **Braune** et **Fischer** développent la **stéréophotographie**, permettant non seulement de déterminer le centre de gravité du corps, mais aussi de mesurer les mouvements des membres dans les trois dimensions de l'espace.

Il faudra attendre les années 1940 pour voir apparaître, sous l'impulsion des Américains **Eberhardt**, **Inmann** et **Saunders** les **plates-formes dynamométriques** dans l'étude de la marche.

L'apparition de l'informatique va grandement simplifier les calculs et l'analyse de la marche. **Pelissier** jouera à ce moment un rôle fondamental. Nombre d'appareils permettant de relever les déplacements de points remarquables vont être développés, et en particulier le système VICON, que nous avons choisi pour notre étude. Fondé sur le principe de la **stéréophotogrammétrie**, ce système permet d'enregistrer grâce à des caméras infra-rouges le déplacement d'un sujet équipé de mires passives ou actives comme nous le verrons plus loin.

B-Le laboratoire de la marche

Au sein du laboratoire de la posture et du mouvement de Gondreville, l'équipement permettant les différentes mesures et l'enregistrement de la marche peut être schématiquement divisé en quatre éléments:

- *Le système d'analyse du mouvement en trois dimensions **VICON**;
- *Les plates-formes de force à multiples degrés de liberté **AMTI** au nombre de trois;
- *La chaîne d'enregistrement vidéo;
- *Le dispositif d'enregistrement électromyographique que nous n'avons pas utilisé dans cette étude.

1-Système d'analyse du mouvement en trois dimensions

Le système d'analyse du mouvement en trois dimensions VICON repose sur l'utilisation de marqueurs réfléchissants et de caméras vidéo avec éclairage infra-rouge. Les marqueurs sphériques sont placés sur la peau à différents endroits définis par convention, et réfléchissent dans les mêmes directions les rayons infra-rouges émis par les sept caméras vidéo placées autour de la pièce d'enregistrement.

Les marqueurs sont fixés à la peau grâce à un petit adhésif. Les mires sont localisées en regard des reliefs osseux. Les mouvements des parties molles sur ces reliefs osseux peuvent être source d'erreur. Par ailleurs, le mode de fixation en lui-même peut occasionner quelques erreurs dans les mesures.

Le marqueur situé à l'extrémité de l'hallux est miniaturisé afin de s'adapter à l'anatomie de la région.

L'équipement comprend une unité ETHERBOX dont la fonction est la détection, la génération et le stockage en temps réel des coordonnées 2D provenant des caméras vidéo à une fréquence de 50 Hz. La phase de reconstruction permet de calculer la position tridimensionnelle des différents marqueurs dans un couloir d'environ 6 mètres de long, de 2,5 mètres de large et de 2 mètres de haut.

Le logiciel VICON 370 permet ensuite de visualiser et d'identifier les marqueurs de façon automatique selon un modèle préalablement défini. Il possède des outils d'analyse en 3D: position absolue ou relative des marqueurs, position des segments définis par deux marqueurs, angle entre deux segments définis par trois ou quatre marqueurs.

L'unité ETHERBOX associée au logiciel VICON 370 permet aussi d'acquérir et de visualiser de façon synchrone des données analogiques issues des plates-formes de force et des enregistrements électromyographiques.

2-Les plates-formes de force

Les plates-formes de force AMTI (Advanced Mechanical Technology, inc.) permettent de mesurer simultanément en temps réel les trois composantes de force le long des axes XYZ (coordonnées cartésiennes) et les trois composantes de moment (force de torsion) autour des axes XYZ. La force de réaction au sol est la force opposée à la force d'appui au sol.

Une plate-forme est constituée d'un châssis de base sur lequel sont fixés aux quatre coins des capteurs (jauges de contrainte). L'appui du pied se fait sur une plaque métallique rigide posée sur les capteurs. Les jauges forment six ponts de Wheatstone, trois des tensions de sortie sont proportionnelles à la force et

trois sont proportionnelles aux moments.

Ces signaux analogiques sont amplifiés puis numérisés.

Le laboratoire est équipé d'une grande plate-forme ($L=121,9$ cm, $l=61$ cm) placée parallèlement à deux petites plates-formes ($L=50,8$ cm, $l=46,4$ cm); cette disposition permet assez facilement d'enregistrer une marche où les pieds se posent chacun sur une plate-forme.

3-La chaîne d'enregistrement vidéographique

Un enregistrement vidéo de la marche est pratiqué à l'aide d'un caméscope à sortie analogique continue connecté à une interface permettant de numériser les images. Un affichage multi-fenêtre permet ensuite de visualiser de façon synchrone la vidéo, l'animation de la reconstruction tridimensionnelle des marqueurs et les différents signaux analogiques numérisés.

4-Le dispositif d'électromyographie

Ce dispositif n'a pas été utilisé dans cette étude.

Il est constitué d'un boîtier qui peut recevoir et amplifier 12 signaux analogiques provenant d'électrodes bipolaires amplificatrices, posées sur la peau couvrant les muscles superficiels à analyser. L'activité électromyographique est numérisée par la station ETHERBOX et peut être visualisée en affichant soit le signal brut soit la courbe enveloppe (obtenue par la moyenne pas-à-pas d'une période de valeur efficace du signal).

C-Le déroulement du cycle de la marche (24, 88)

Toute description de la marche actuelle fait référence aux travaux de Ducroquet publiés dans un ouvrage de 1965 intitulé "**La marche et les boiteries. Étude des marches normales et pathologiques**" (23).

La marche est un terme non spécifique. Il s'agit de la **répétition cyclique de mouvements du corps pas à pas et de façon indéfinie**.

Un **cycle de marche** est un intervalle de temps au cours duquel une séquence d'événements se produit. Le découpage en différentes phases n'est pas, bien qu'utile sur le plan de la compréhension, représentatif de l'enchaînement harmonieux qu'est la marche en réalité.

Par convention, le cycle de la marche débute par l'**attaque du talon droit** (ou Heel-strike) et se termine avec le contact du même talon avec le sol.

La description du cycle de la marche ne peut pas s'appliquer aux premiers pas car les séquences motrices ne sont pas les mêmes. C'est pourquoi nous décrirons au préalable brièvement les séquences motrices propres à l'**initiation du pas**.

Le cycle de la marche est décomposé en **deux phases principales (Fig.8)**.

Chaque phase est exprimée en pourcentage du temps total d'un cycle complet de la marche, ce qui permet une normalisation des études.

*La première phase est la **phase d'appui**. Elle couvre **40% du cycle** de la marche. Elle correspond à la période allant de l'attaque du talon droit au sol jusqu'au temps de double appui postérieur.

*La seconde phase est la **phase d'oscillation**. Elle couvre **60% du cycle**

de la marche. Elle correspond à la période allant du double appui postérieur jusqu'à l'attaque du talon droit au sol.

Ces deux phases sont elles-mêmes décomposées en deux phases secondaires.

L'étude de la marche se fait dans trois plans: sagittal, frontal et horizontal que nous décrirons systématiquement.

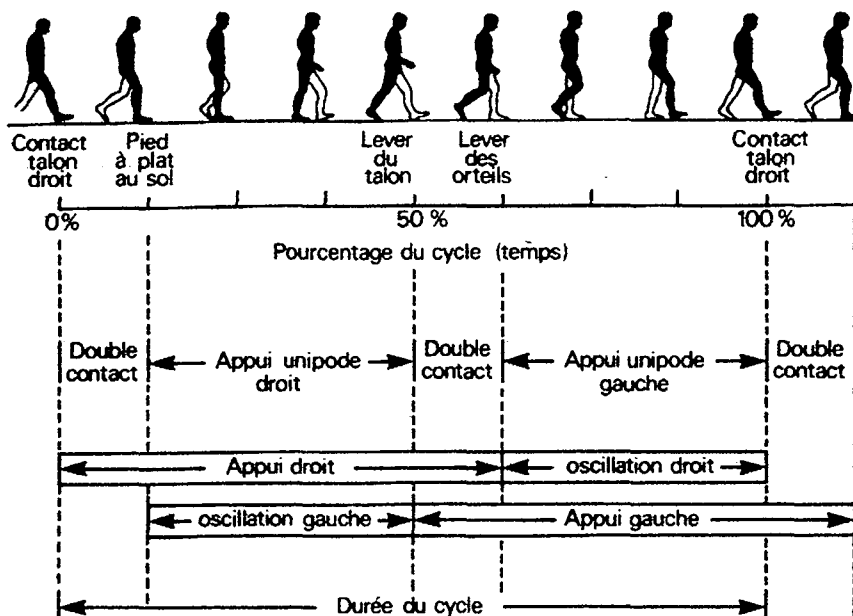


Fig.8-Les divisions du cycle de la marche (68)

1-Initiation du pas

La description de l'initiation du pas se fait chez un sujet répondant à un ordre simple, tel un ordre oral ou un top sonore. On considère par convention que c'est le pied droit qui quitte le premier le sol.

Debout, en appui bipodal, la verticale de gravité passe en avant de l'articulation

talo-crurale. Le muscle soléaire est toujours actif.

C'est l'étude électro-myographique qui montre le mieux les différents évènements de l'initiation du pas.

On observe tout d'abord une diminution brutale de l'activité du muscle gastrocnémien médial ainsi que du muscle soléaire concomitante d'une augmentation importante de l'activité du muscle tibial antérieur. Ces phénomènes entraînent un déséquilibre de la jambe sur le pied.

On constate de façon fugace une diminution de l'appui à gauche en même temps qu'une augmentation de l'appui à droite. Ceci s'annule dès la levée du talon droit. Le corps "chute" alors en avant, tandis que les pieds sont stables. Dans un plan frontal, le corps présente un mouvement latéral vers le côté droit.

Pendant ce temps moteur, on observe une augmentation croissante de l'activité du muscle gluteus medius et du muscle droit. Puis le muscle triceps sural augmente son activité alors que celle du muscle tibial antérieur diminue, limitant l'avance jambière.

C'est exactement l'inverse qui se produit lorsque les orteils quittent le sol. Le muscle long fibulaire entre en jeu et participe à la stabilisation du pied en synergie avec le muscle triceps sural.

Les pressions sur le pied d'appui (gauche) augmentent, jusqu'à supporter la totalité du poids du corps lors de la phase oscillante du membre inférieur droit. Tous les muscles hormis le muscle droit, évitant une trop grande flexion du genou, sont à leur niveau d'activité le plus bas.

À la fin de l'oscillation du membre inférieur droit et donc juste avant sa première phase portante, fléchisseurs et extenseurs de genou et de cheville sont contractés de façon concomitante.

2-Première phase: la phase d'appui (ou Stand Phase)

Cette phase comporte un premier temps de double appui antérieur de réception suivi d'un temps d'appui unilatéral pied à plat. Pendant cette phase, le pied reste donc en contact avec la surface portante (Fig.9).

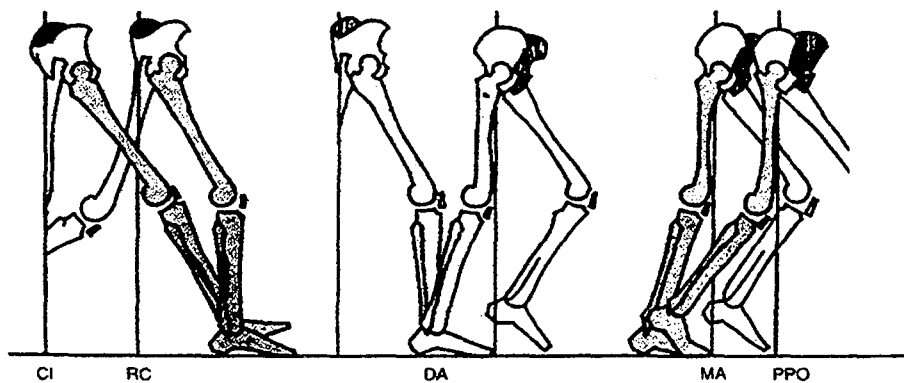


Fig.9-La phase d'appui (68)

2.1-Temps de double appui antérieur de réception

Il concerne de **0 à 12% du cycle total de la marche.**

Lors de ce temps, sera assuré le transfert brutal du poids du corps sur un membre qui vient de terminer son mouvement pendulaire. Les muscles ont un rôle de stabilisation des articulations du membre inférieur. La position des articulations dans l'espace à cet instant précis détermine la force de réaction du sol.

Dans le **plan sagittal**, le membre inférieur droit qui passe d'avant en arrière attaque le pas par le contact talonier, reçoit tout le poids du corps (en fait

120% du poids du corps) et absorbe son énergie cinétique. L'avant-pied se rabat ensuite, freiné par les muscles de la loge antéro-externe de la jambe, et la plante du pied entre alors totalement en contact avec le sol.

Dans le **plan frontal**, l'ensemble du corps bascule du côté du membre recevant le poids du corps. Le genou est quasiment en extension lors de l'attaque du talon, stabilisé par les muscles de la patte d'oie du côté médial et le tenseur du fascia lata du côté latéral.

Dans le **plan horizontal**, le bassin passe de la position oblique à la position horizontale. Il est stabilisé latéralement par le muscle tenseur du fascia lata et les muscles glutéaux. La ceinture scapulaire suit un mouvement inverse. À la fin de ce premier temps, les deux ceintures se superposent.

2.2-Temps d'appui unilatéral

Ce temps concerne de **12 à 40% du cycle total de la marche**.
La masse corporelle est en équilibre dans les trois plans de l'espace.

Dans le **plan sagittal**, la cheville qui était à 5 degrés de flexion plantaire lors du heel-strike passe à 0 degré de flexion dorsale et plantaire au moment où la jambe passe à la verticale du pied puis atteint 10 degrés de flexion dorsale pendant le premier appui unilatéral. Cette flexion dorsale apparaît comme un phénomène passif, lié à l'avancement de la jambe entraînée par l'élan du corps vers l'avant.

Le genou était proche de l'extension lors de l'attaque au sol. Au début de la phase d'appui, le genou présente une petite flexion d'environ 15 à 25°. Le

muscle quadriceps est inactif, la position du genou est contrôlée par le muscle triceps sural.

Il retrouve quasiment une position d'extension à l'approche du décollement du talon.

Dans le **plan frontal**, le bassin s'incline du côté oscillant stabilisé par les muscles petit et moyen fessiers et tenseur du fascia lata. L'épaule s'incline du côté portant. L'angle maximum entre les deux ceintures est atteint au moment du plus fort appui. Elles sont parallèles à la fin de cette période.

Les mouvements du pied et de la cheville comportent une mobilité sous-talienne et de l'ensemble du couple de torsion. Ces articulations permettent également les mouvements de rotation du squelette jambier sur le pied fixé au sol, ainsi que les mouvements du membre inférieur et du bassin.

Dans le **plan horizontal**, le talus tourne autour du calcaneus et le cotyle tourne au-dessus de la tête fémorale. La ceinture scapulaire tourne en sens inverse.

La phase d'appui comporte peu de moteurs bien qu'elle soit la phase où se produit l'essentiel de la progression.

3-Deuxième phase: la phase oscillante (ou Swing Phase)

Cette phase comprend un premier temps de double appui postérieur d'élan et un deuxième temps correspondant à la phase oscillante propre. Ces deux temps correspondent à une inversion des moments articulaires s'exerçant sur la hanche et le genou (Fig.10).

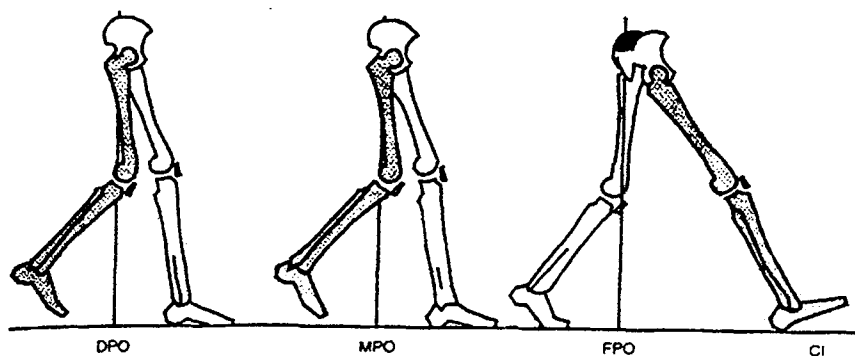


Fig.10-La phase oscillante (68)

Pendant cette phase, le membre se comporte comme un pendule. La durée de cette phase dépend donc du moment d'inertie de ce segment. Il n'y a pas de force de réaction du sol pour le membre qui oscille. C'est au cours de cette phase que se produit l'avancée du membre inférieur. Elle permet donc le retour des segments à leur position de départ.

3.1-Temps de double appui postérieur d'élan

Il occupe la partie moyenne du cycle débutant à **40% du cycle de la marche** et se terminant à **75% du cycle de la marche**.

Dans le **plan sagittal**, le membre inférieur droit situé en arrière propulse le corps en avant. On assiste à un déroulement progressif de l'articulation talo-crurale et à une diminution de l'appui qui est transféré au niveau de l'avant-pied. Celui-ci est parfois comparé à un talon antérieur. L'articulation talo-crurale passe alors en flexion plantaire d'environ 15 degrés et l'appui est transféré à la tête du premier métatarsien.

L'hallux perd le contact avec le sol: cette phase est appelée le "**Toe-off**".

On assiste alors au soulèvement du talon et au passage du poids du corps au-dessus de l'avant-pied.

Dans le **plan frontal**, le pied initialement en varus passe au cours de l'impulsion en valgus. Une combinaison pronation-valgus fait passer le poids du corps de tout l'avant-pied à la tête du premier métatarsien.

Dans le **plan horizontal**, le talus effectue une torsion externe au-dessus du calcaneus. Le bassin revient dans le plan transversal et le tronc tourne dans le sens opposé.

On conçoit aisément que l'arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux va entraver le bon déroulement de cette phase.

3.2-Phase oscillante propre

Elle débute à **75% du cycle de la marche** et se termine à **100% du cycle de marche**.

Le membre inférieur droit n'est plus en appui et oscille d'arrière en avant. Il croise le membre inférieur gauche.

Dans le **plan sagittal**, on peut décomposer cette phase oscillante propre en un pas postérieur pendant lequel le membre inférieur droit est en triple flexion et un pas antérieur où la hanche est fléchie, le genou progressivement en extension (jusqu'à l'extension complète avant le "Heel-strike") et la cheville en flexion plantaire ou dorsale neutre.

Dans le **plan frontal**, il existe une obliquité inverse de la ceinture

scapulaire. Les deux ceintures se retrouvent parallèles à la fin de la phase oscillante.

Dans le plan **horizontal**, le bassin et la ceinture scapulaire passent d'une obliquité à l'autre et ce dans le sens inverse.

D-Activités musculaires durant le cycle de la marche (24, 68)

1-Généralités

Durant le cycle de la marche, on accorde le plus souvent aux muscles un rôle d'accélérateur des différents segments des membres inférieurs. Loin d'avoir un rôle unique, les muscles impliqués dans la marche ont un quadruple rôle:

Freinage des segments de membre;

Amortissement des chocs et des vibrations;

Accélération des segments de membre;

Équilibration.

1.1-Freinage des segments de membre

Les muscles utilisent leurs propriétés de **visco-élasticité** pour freiner une action en cours, sans totalement l'interrompre. C'est le cas des muscles ischio-jambiers freinant l'extension du genou en fin de phase oscillante.

1.2-Amortissement des chocs et des vibrations

C'est au moment du contact talon-sol que ce rôle est majeur. Les muscles dissipent les contraintes et amortissent une grande partie du choc. C'est notamment le cas des muscles de la loge antérieure de jambe qui retardent l'abatement de l'avant-pied au sol. De façon concomitante, les stabilisateurs du bassin limitent la chute latérale du bassin.

1.3-Accélération des segments de membre

Dans une assez faible mesure, les muscles contribuent à donner une impulsion vers l'avant du membre inférieur oscillant. On pense notamment aux muscles adducteurs de cuisse permettant la flexion de la hanche.

1.4-Équilibration

Le marcheur doit contrôler des déséquilibres de deux ordres.
Dans le plan frontal, il existe des déséquilibres en abduction-adduction.
Dans le plan sagittal, il existe des déséquilibres liés aux accélérations vers l'avant.

2-Action des muscles lors du cycle de la marche

2.1-Généralités

Pendant la phase d'appui, tout le poids du corps repose sur un seul pied.
Les actions musculaires comportent l'amortissement des chocs, le freinage

élastique de stabilisation, l'accélération des segments et des contractions stabilisatrices.

Les muscles intervenant lors de cette phase sont appelés «Stance Phase Muscles» ou muscles de l'appui.

Pendant la phase d'oscillation, on assiste au mouvement vers l'avant du pied ayant quitté le sol. La longueur du membre inférieur est réduite pour permettre le passage du pied.

Les actions musculaires consistent en un freinage, un réglage de raideur active en anticipation de la nécessité d'assurer l'amortissement d'un choc et la prévention d'une instabilité potentielle.

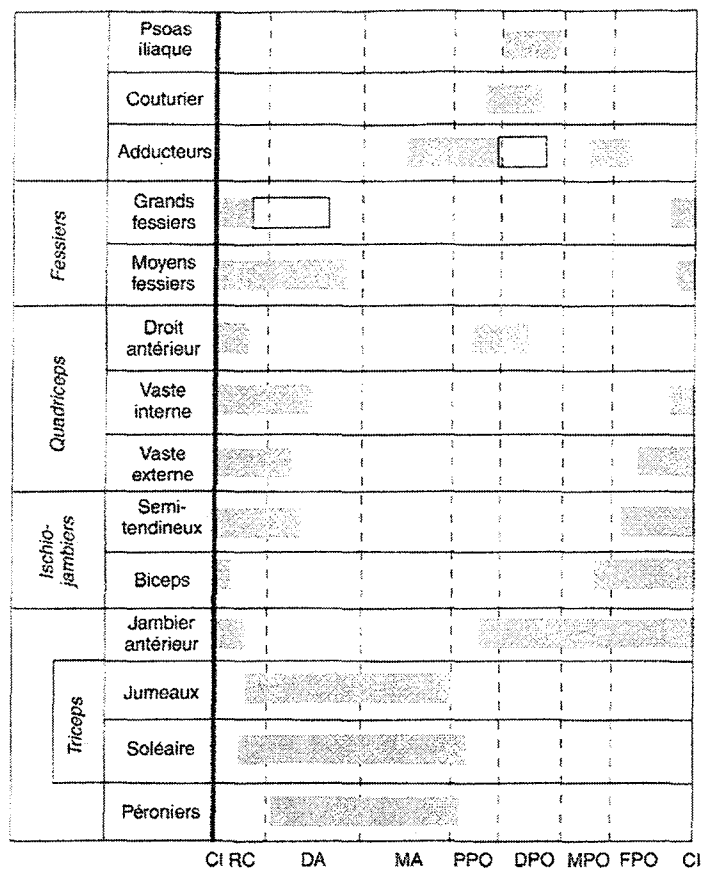
Les muscles intervenant dans cette phase sont nommés «Swing Phase Muscles» ou muscles de l'oscillation.

2.2-Électromyographie télémétrée

L'électromyographie télémétrée permet d'objectiver la durée et l'intensité des contractions musculaires lors de la déambulation (Fig.11).

Ainsi l'on a pu identifier quatre temps majeurs de l'activité des muscles pendant la marche:

- ***Contact au sol et choc du talon;**
- ***Équilibre sur un seul pied;**
- ***Séparation du pied avec le sol;**
- ***Passage du pied libre en avant.**



Appui de CI à DPO, oscillation de DPO au second CI.

CI : contact initial; RC; réponse à la charge; DA : début d'appui; MA : milieu d'appui; PPO : préphase oscillante; DPO : début phase oscillante; MPO : milieu de phase oscillante; FPO : fin de phase oscillante.

Fig.11-Chronométrie d'action des muscles selon les phases (88)

2.2.1-Contact au sol et choc du talon

Avant que le talon ne touche le sol, les muscles de la loge antérieure sont en pré-tension, contribuant à amortir l'impact et empêchant l'avant-pied de frapper sèchement le sol.

Le muscle quadriceps «verrouille» le genou et empêche une flexion trop marquée.

La stabilisation du bassin est assurée par l'action des muscles latéraux que sont le muscle moyen fessier et le deltoïde de FARABEUF (bandelette ilio-tibiale soumise à la traction des fibres du muscle grand fessier et du muscle tenseur du fascia lata).

2.2.2-Équilibre sur un seul pied

Il s'agit pour les muscles, lors de ce temps, d'assurer la stabilité tant dans le plan frontal que dans le plan sagittal.

Stabilité sagittale:

Le genou reste fléchi à 15-20° pendant toute cette phase. Le muscle quadriceps stabilise le genou lorsque le membre inférieur supporte tout le poids du corps. Son action est fugace.

Jusqu'au moment où le talon se soulève, le genou s'étend progressivement jusqu'à 3-5° de flexion.

Lorsque les orteils sont prêts à quitter le sol, le genou fléchit jusqu'à 7-10°. Le muscle triceps sural stabilise alors le genou en prenant le relai du muscle quadriceps, en utilisant le pied comme insertion d'ancrage et en agissant par visco-élasticité sur le pilon tibial.

Stabilité frontale:

Il convient de distinguer la stabilité frontale distale et proximale.

Au niveau distal, les muscles **fibulaires**, et en particulier le muscle court fibulaire, stabilisent la cheville. Leur action s'étend de 30 à 55% du cycle de la marche. Ils agissent en synergie avec le muscle tibial postérieur pour stabiliser

le pied.

Au niveau proximal, la stabilité du bassin est assurée par deux systèmes musculaires:

*D'une part, le **deltoïde fessier de Farabeuf** composant un système bi-articulaire;

*D'autre part, le muscle **moyen fessier**, composant un système mono-articulaire.

2.2.3-Séparation du pied avec le sol

Lorsque le talon se soulève, les muscles adducteurs de la hanche entraînent le segment cuisse vers l'avant en le faisant passer de la rotation interne à la rotation externe. Le muscle iliopsoas est aussi actif durant cette phase. La tension exercée par le muscle triceps sural se transmet à la base des orteils par le biais de l'aponévrose plantaire. Cette tension est majorée par la dorsiflexion passive des orteils, en raison de l'insertion de la nappe fibreuse et des muscles intrinsèques du pied à la base des orteils.

2.2.4-Passage du pied libre en avant

La flexion du genou correspond à une action balistique en double pendule: l'accélération vers l'avant du segment "cuisse" déclenche une contre-accélération vers l'arrière du segment "jambe", elle-même freinée par un bref pic d'activité du muscle quadriceps.

Après cette période de raccourcissement du membre inférieur oscillant, le genou

s'étend. Les muscles ischio-jambiers, conjointement au muscle quadriceps, se contractent pour freiner le genou et le stabiliser afin de protéger l'intégrité articulaire et ligamentaire du genou.

E-Le pied lors de la marche

1-Rôle de chacune des parties du pied au cours de la marche

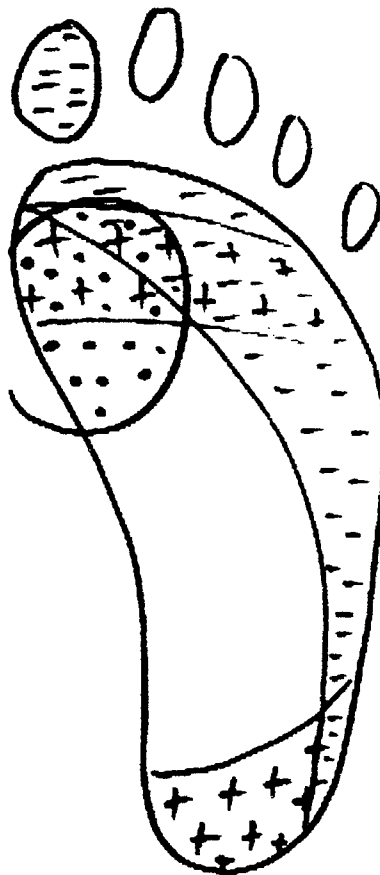


Fig.12-Les trois régions identifiables du pied (88)

Le pied peut être divisé en trois régions dont le rôle mécanique est différent (Fig.12):

Les **régions postérieure et antérieure**, ayant un rôle d'amortissement;

Le **bord externe du pied**, ayant un rôle dans l'équilibre et la propulsion;

La **première articulation métatarso-phalangienne**, ayant un rôle de pivotement.

2-Déroulement du pied au sol

Quatre roulements se succèdent lors du déroulement du pied au sol.

Lors de la prise de contact avec le sol, **le talon roule** pendant que le pied s'abat pour se trouver à plat.

Le segment jambier roule sur le dôme du talus passant de la flexion plantaire à la flexion dorsale (45% du cycle).

Au soulèvement du talon, **l'avant-pied roule autour de la première articulation métatarso-phalangienne** (50% du cycle).

Un dernier roulement s'effectue **sous la pulpe de l'hallux** (60% du cycle).

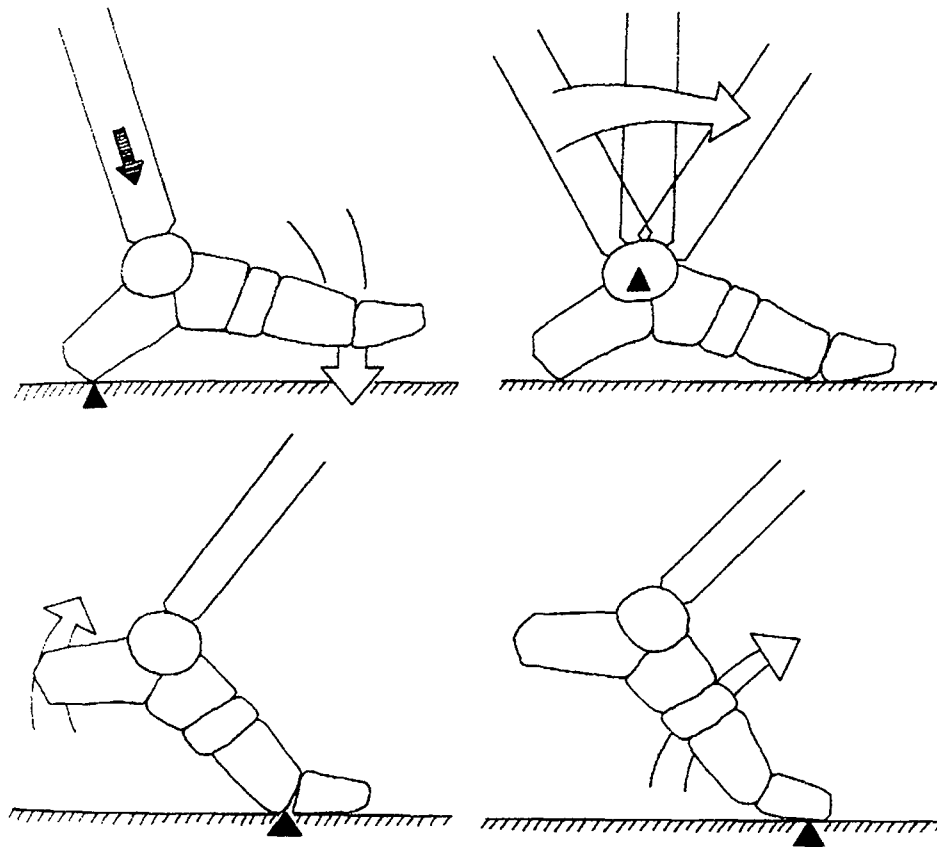


Fig.13-Déroulement du pas (88)

3-Déformation de la voûte plantaire pendant la marche

Après le "Heel-strike", la voûte plantaire, sous l'effet du passage du corps d'arrière en avant, s'écrase et s'allonge dans le plan sagittal. Cet allongement maximal lorsque le corps passe à la verticale du pied est dû dans un premier temps à un avancement de l'appui antérieur puis secondairement à un recul de l'appui postérieur.

Lors de l'impulsion motrice, la voûte effectue une rotation autour de l'appui antérieur. L'avant-pied s'étale latéralement. Puis seuls les trois premiers orteils

sont en contact avec le sol et finalement l'hallux seul restera en contact avec le sol.

Le pied quitte ensuite le sol. La voûte plantaire reprend sa forme initiale.

F-Facteurs influençant le déplacement du centre de gravité (88)

Le débattement du centre de gravité, qui se situe approximativement en regard de la deuxième vertèbre sacrée, est fortement diminué par l'ajustement de la longueur des membres et la disposition particulière des pièces squelettiques. Ainsi, ce débattement passe de 75 mm si les membres étaient rigides à 45 mm.

Les facteurs biomécaniques intervenant afin de garantir la stabilité de l'unité locomotrice et de permettre un synchronisme mobilité-stabilité sont au nombre de six, cinq dans le plan sagittal et un dans le plan frontal.

Il s'agit de:

- *La rotation du bassin autour de l'axe vertical;**
- *La bascule du bassin du côté non porteur;**
- *La flexion du genou pendant l'appui;**
- *Les mouvements du pied et de la cheville;**
- *La coordination des mouvements du genou et de la cheville;**
- *Le déplacement latéral du bassin dans un plan frontal.**

Nous envisagerons pour terminer les rotations opposées des deux ceintures ainsi que les mouvements des membres supérieurs.

1-Rotation du bassin autour de l'axe vertical

La rotation du bassin s'effectue au niveau des têtes fémorales. Lors du passage du pas, il se produit une rotation de 4° .

Durant l'appui, le bassin passe d'une rotation externe relative à une rotation interne relative. L'amplitude de ce mouvement est de 8° .

Le déplacement théorique du centre de gravité s'en trouve diminué de 10 mm.

2-Basculer du bassin du côté non porteur

Le bassin bascule vers le bas du côté non porteur au moment du passage du pas. L'amplitude du pas est de 5° à mi-appui.

Afin de permettre sans difficulté le passage du pas en raison de l'abaissement de la hanche du côté de l'oscillation, l'adaptation de la longueur du pas se fait grâce à une flexion de genou.

Le déplacement théorique du centre de gravité s'en trouve diminué de 5 mm.

3-Flexion du genou pendant l'appui

Le genou n'atteint jamais l'extension complète lors de la phase d'appui.

La flexion du genou diminue le déplacement du centre de gravité de 11 mm.

4-Mouvements du pied et de la cheville

À l'attaque du talon, la cheville décrit un arc de cercle au-dessus du talon. Lors du passage à la verticale, le pied est brièvement placé à plat au sol.

Lorsque le talon se soulève, la cheville décrit un arc au-dessus de la tête des métatarsiens.

5-Coordination des mouvements du genou et de la cheville

Au moment du contact talonier, le genou se plie alors que la cheville s'abaisse.

Au moment de la propulsion, le genou se plie à nouveau et la cheville s'élève.

Couplés, les mouvements du genou et de la cheville éliminent l'ascension ou la descente brutale du centre de gravité.

6-Déplacement latéral du bassin

C'est grâce au valgus physiologique du genou, qui permet de rapprocher les segments jambiers restant ainsi verticaux, que le déplacement latéral du bassin est moindre. Il est corrigé de ± 75 à ± 50 mm.

Au total, afin d'obtenir une marche la plus économique possible, le centre de gravité doit avoir un déplacement symétrique, que ce soit dans le plan frontal ou sagittal, et décrire une sinusoïde aplatie de ± 50 mm d'amplitude.

7-Rotation opposée des deux ceintures

Lors de la marche, les ceintures scapulaire et pelvienne effectuent des rotations de sens inverse.

Les amplitudes de ces rotations ont été déterminées dans certaines études, ainsi

que le niveau rachidien où se trouvait le maximum de mouvement.

Pour un demi-cycle de marche, les valeurs obtenues sont les suivantes:

*5° de rotation au niveau de D1;

*8° de rotation au niveau de L5, du côté opposé.

C'est au niveau de D6-D8 que les rotations s'annulent.

8-Mouvements des membres supérieurs

Ils sont modulés par le système nerveux en fonction de l'âge et de la vitesse du sujet.

Les membres supérieurs sont pendant le long du corps à l'initiation de la marche.

Ils entrent en mouvement au deuxième cycle de la marche.

Lors de l'attaque du talon droit au sol, le bras droit est en extension et l'avant-bras en flexion.

Lors de l'attaque du talon gauche au sol, bras et avant-bras sont en flexion maximale par rapport respectivement au tronc et au bras.

C'est à la fin de la phase d'appui du pied droit que le bras droit débute son oscillation vers l'arrière.

À la fin du cycle de la marche, le bras se trouve en extension maximale et l'avant-bras en déflexion maximale.

G-La marche rapide

La marche rapide consiste en une augmentation de la cadence et de la longueur des enjambées permises par une augmentation des amplitudes de

flexion/extension de hanche et de rotation pelvienne.

De plus, une légère flexion du tronc situe la ligne gravitaire un peu plus en avant des appuis.

Si la vitesse augmente, on observe une disparition de la phase de double appui: on se trouve alors dans un état transitionnel entre la marche et la course.

H-Montée et descente des pentes et des escaliers

Le marcheur doit fournir un travail supplémentaire pour monter un escalier ou une côte. En effet, le mécanisme de récupération de l'énergie cinétique devient insuffisant pour permettre la progression du marcheur. Ce travail supplémentaire est fourni par les extenseurs de la hanche, et en particulier le grand fessier, les extenseurs du genou et les fléchisseurs plantaires de la cheville et du pied.

Lors de la montée, le membre oscillant est en flexion, le pied prenant contact avec le sol par la plante ou seulement l'avant-pied.

Lors de la descente, un travail musculaire est nécessaire afin de freiner la chute du corps en avant. Ceci est permis par une extension du tronc qui permet de reculer la ligne gravitaire et qui est associée à un travail du système fléchisseur de hanche/extenseur de genou qui retient l'affaissement de ces articulations.

Les moments articulaires induits par la marche lors de la montée ou la descente des escaliers sont très différents de ceux retrouvés lors d'une marche sur terrain plat. Concernant le genou et la hanche, ils sont plus élevés lors de la descente que lors de la montée des escaliers.

DESCRIPTION DES TECHNIQUES CHIRURGICALES

Après consolidation, la position de l'hallux est définitivement fixée. Il convient donc de prendre un soin particulier au bon réglage de la position de l'arthrodèse pendant l'intervention.

Dans un **plan horizontal**, un certain valgus doit être respecté, correspondant à l'orientation physiologique de l'hallux.

Chez l'homme, un valgus de 15° est acceptable.

Chez la femme, le valgus préconisé par l'ensemble des auteurs est de 20 à 25°.

Ce valgus plus important est dicté par le caractère parfois contraignant de certaines chaussures féminines. Cependant, un valgus supérieur à 25° ne semble pas tolérable de même qu'un valgus insuffisant, celui-ci pouvant être gênant dans des chaussures trop triangulaires.

Dans un **plan sagittal**, la position de l'hallux varie aussi selon le sexe. Chez l'homme, une flexion dorsale de 20° est préconisée. Chez la femme, la flexion dorsale doit être de 25 à 30°, compte tenu du port de talons de 3 à 4 cm de hauteur.

Une flexion dorsale excessive peut entraîner un conflit avec la chaussure à la face dorsale de l'articulation interphalangienne. De plus, l'appui pulpaire est absent ou trop limité et l'articulation interphalangienne a tendance à se placer en griffe. Au contraire, une flexion dorsale insuffisante fait souffrir l'extrémité plantaire de la première phalange où apparaîtra un durillon d'appui, conséquence de l'excès de charge appliquée en ce point.

Dans le **plan frontal**, un soin particulier doit être apporté à l'orientation de la pulpe du gros orteil. On s'efforcera de corriger toute dysrotation axiale.

A-Technique utilisée dans le service (21)

L'incision est longitudinale, médiale, à la jonction des peaux plantaire et dorsale. Débutée dans l'axe de la diaphyse de la première phalange, elle dépasse l'articulation métatarso-phalangienne puis s'incline vers la plante. On reprendra l'ancienne cicatrice lorsqu'il s'agira d'une chirurgie de reprise.

Une hémostase soigneuse des veines sous-cutanées est effectuée.

L'incision du plan capsulaire se fait dans l'axe de la cicatrice. Elle prolonge l'incision du périoste phalangien en aval et l'incision du périoste métatarsien qui ne doit pas remonter trop loin, permettant de ménager le pédicule nourricier inférieur. L'articulation métatarso-phalangienne est alors exposée après soulèvement du plan capsulo-fibreux et du périoste. À ce stade, l'ablation d'ostéophytes et la résection de synoviale sont effectuées.

Un avivement des surfaces articulaires métatarsienne et phalangienne est pratiqué, supprimant totalement le cartilage et mettant en vis-à-vis des surfaces purement osseuses. Il s'effectue à l'aide de fraises à os ou à l'aide d'une petite scie à os.

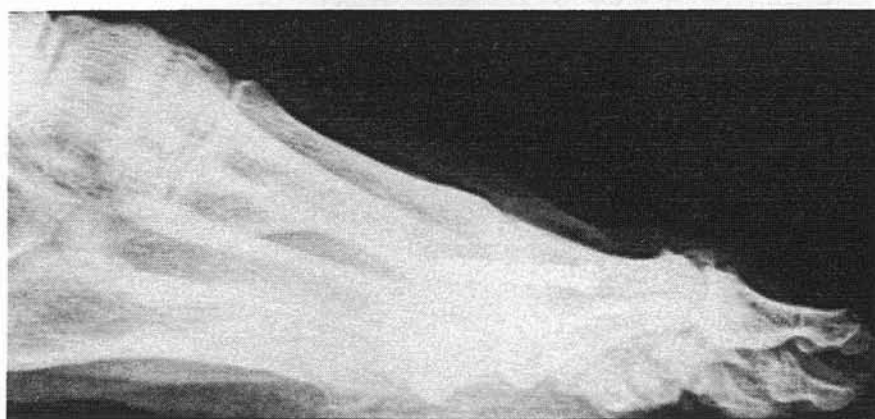
Il convient de conserver la convexité de la tête métatarsienne et la concavité de la base phalangienne, en recherchant un contact le plus large et précis possible des deux surfaces.

L'attitude varie selon la formule de l'avant-pied. La résection osseuse sera plus importante en cas d'avant-pied égyptien, le but étant d'obtenir un avant-pied de type carré ou grec.

La position de l'arthrodèse est transitoirement maintenue par une broche.
Elle est définitivement fixée par une vis corticale de 3,5 mm de diamètre, mise en place de proximal en distal, à partir du bord médial du métatarsien.
Le plan capsulo-fibreux et le périoste sont refermés soigneusement. La suture cutanée est assurée par des points séparés de fils non résorbables.



-a



-b

Fig.14a et b-Aspect radiologique post-opératoire
après arthrodèse par vissage



-a



-b

Fig.15a et b-Aspect radiologique de face et de profil
après ablation du matériel

B-Autres techniques d'arthrodèse

La première description d'arthrodèse métatarso-phalangienne a été donnée par Broca en 1852 (6). Clutton rapporte une série de 7 arthrodèses en 1892.

De nombreuses techniques chirurgicales ont été décrites depuis.

Trois critères principaux les différencient:

- *La **préparation des surfaces articulaires**;
- *La **position des pièces osseuses** l'une par rapport à l'autre;
- *Les **moyens de maintien de l'arthrodèse**.

1-Arthrodèse à l'aide d'agrafes et de clous (55)

Cette technique permet l'arthrodèse de la métatarso-phalangienne de l'hallux grâce à l'utilisation concomitante d'agrafes en Titane pur T40 de 1,6 mm de diamètre et de différentes tailles (7 et 8 mm d'entraxe) et de clous sans tête en Titane T40 de même diamètre et de 50 mm de longueur.

Différents montages sont possibles. Quatre sont essentiellement utilisés:

***Arthrodèse par deux agrafes**, l'une proximo-distale, l'autre disto-proximale à la face médiale du métatarsien et de la phalange;

***Arthrodèse** similaire à la précédente mais avec **en plus une agrafe** pontant l'articulation;

***Arthrodèse par une agrafe coaxiale et une agrafe** pontant l'articulation;

***Arthrodèse par un clou** jouant le rôle d'un tuteur central et **deux agrafes** pontantes dans des plans orthogonaux.

L'appui est autorisé en post-opératoire immédiat, soit limité par la douleur, soit protégé par une semelle plâtrée moulée pendant 3 semaines.

La consolidation survient en moyenne dans les 6 semaines post-opératoires.

Le taux de fusion est de 99,3% selon les auteurs.

2-Arthrodèse par plaque et greffon iliaque cortico-spongieux (7, 64)

Cette technique permet d'obtenir l'arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux grâce à l'**interposition d'un greffon iliaque** entre métatarsien et phalange, greffon ensuite maintenu par une **plaque** positionnée en dorsal. Ces plaques sont en Vitallium ou en Titane.

Cette chirurgie est utilisée dans les cas de défaut osseux lorsque le patient a déjà bénéficié d'une chirurgie première (arthroplasties, échec d'arthrodèse, chéilectomie).

L'appui est proscrit pendant 4 semaines.

La consolidation survient en moyenne dans les 12 à 15 semaines.

Le taux de fusion est d'environ 90%.

3-Arthrodèse par vissage et plaque (82)

Cette technique associe après maintien temporaire par une broche axiale la mise en place d'une **vis spongieuse** de 4 mm de diamètre mettant en compression le site d'arthrodèse, partant de la face plantaire de la première phalange, orientée en arrière, en dehors et en avant.

Le montage est ensuite complété par la pose d'une **plaque quart de tube** à la face dorsale de l'articulation métatarso-phalangienne maintenue par des vis de 2,7 mm (2 en amont et 2 en aval).

L'appui talonier est autorisé en post-opératoire immédiat. L'appui pied à plat est autorisé à 6 semaines.

Cette technique est aussi bien utilisée pour la cure chirurgicale des hallux rigidus que des hallux valgus sévères, des échecs de chirurgie antérieure ou de pieds rhumatologiques.

La consolidation osseuse survient en moyenne à 8 semaines.

Le taux de fusion est de 93,5%.

4-Arthrodèse par deux broches croisées (14)

Cette technique est citée par COPIN et semble n'être utilisée que faute de pouvoir arthrodéser l'articulation métatarso-phalangienne d'une autre façon.

5-Arthrodèse en cône (43, 91)

Cette technique permet, par une incision dorsale, de pratiquer l'arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux par la confection, à l'aide d'un ancillaire spécial, d'un **cône** au niveau de la tête du métatarsien et d'une **excavation** à la base de la phalange. Une fois métatarsien et phalange interpénétrés, ils sont maintenus par un **cerclage métallique**.

L'appui est repris à 6 semaines.

La consolidation est acquise en 12 semaines.

Le taux de fusion est d'environ 96%.

6-Arthrodèse par fixateur externe (8, 36)

Cette technique utilise la mise en compression de l'articulation métatarso-

phalangienne de l'hallux par un **petit fixateur externe** agissant par l'intermédiaire de deux broches de 1,6 mm de diamètre, l'une fichée dans le col du premier métatarsien et l'autre dans la diaphyse de la première phalange. Le fixateur est laissé en place pendant trois semaines, un relai est pris par une botte de marche pendant trois semaines.

Si l'intervention a été effectuée de façon bilatérale, l'auteur conseille au patient de rester alité trois semaines en attendant le retrait du fixateur externe!

Le fixateur externe garde pour certains comme Calderone des indications dans les échecs de la chirurgie du premier rayon. Il préconise en plus du maintien par fixateur externe l'utilisation de greffon cortico-spongieux. Le fixateur externe est alors laissé en place six semaines et l'appui est autorisé à partir de la douzième semaine. Le cas exposé dans son étude a présenté après fusion de la métatarso-phalangienne une arthrose majeure puis une ankylose de l'interphalangienne aboutissant à l'indolence au recul de six ans.

7-Arthrodèse selon la technique de BROCKMAN (36)

Il s'agit de la transposition de la technique de l'auteur pour obtenir la fusion de l'articulation radio-carpienne au niveau de l'articulation métatarso-phalangienne de l'hallux. Elle consiste à **impacter** la tête du premier métatarsien taillée en biseau dans la base de la première phalange. Une immobilisation plâtrée est laissée en place pour un mois. Aux dires de l'auteur, les résultats ne sont pas concluants et appartiennent à l'histoire.

C-Alternatives à l'arthrodèse

Il s'agit du traitement médical et des techniques chirurgicales conservatrices et radicales.

1-Traitement médical (77, 86)

Il s'agit des médications **anti-inflammatoires et antalgiques**, qu'elles soient locales ou générales.

Le rôle de l'**adaptation du chaussage** est fondamental. Le port de chaussures à talons plat est fortement conseillé. Tout conflit avec des ostéophytes saillants est évité par le port de chaussures larges.

On peut y ajouter une **barre transversale** dite de roulement sous la semelle permettant de compenser la limitation de la dorsi-flexion. L'efficacité de cette barre est majorée par un chaussage dont la semelle est rigide.

2-Traitement chirurgical conservateur

2.1-Techniques à visée biomécanique(16, 19, 21, 33, 70, 80)

2.1.1-Ostéotomie de raccourcissement phalangien

Il s'agit d'effectuer, grâce à la résection d'environ 5 mm médiodiaphysaires de la phalange, une décompression articulaire par:

*Détente des muscles fléchisseurs et extenseurs;

*Diminution du bras de levier de l'hallux;

*Correction d'un éventuel excès de longueur de l'hallux.

2.1.2-Ostéotomie d'extension phalangienne

Il s'agit d'effectuer une ostéotomie cunéiforme à base dorsale de la métaphyse proximale de la première phalange.

2.1.3-Ostéotomie du premier métatarsien (3)

L'ostéotomie cunéiforme dorsale est réalisée à l'extrémité distale du premier métatarsien.

L'ostéotomie d'abaissement du premier métatarsien vise à corriger le metatarsus elevatus. Certains auteurs préfèrent une ostéotomie verticale (Weil), d'autres une ostéotomie oblique en bas et en arrière (Barouk).

2.2-Ablation des ostéophytes (18, 19, 21, 22, 25, 28, 38, 42, 50, 55, 56, 57, 84, 87)

Ce geste chirurgical vise à supprimer le conflit entre un ostéophyte dorsal situé au niveau de la tête du premier métatarsien traumatisant le pied à l'intérieur de la chaussure.

Une variante est la cheilectomie associant l'exérèse des ostéophytes et une arthroplastie modelante supprimant le tiers dorsal de la tête métatarsienne. Les berges sont ensuite émoussées à la rape.

Certains proposent d'effectuer par arthroscopie l'ablation de l'ostéophyte au niveau de la face dorsale de la tête du premier métatarsien, avec cependant un

recul insuffisant actuellement pour juger de l'efficacité à long terme de ce geste.

3-Traitement chirurgical radical

3.1-Résections arthroplastiques (16, 21, 34)

3.1.1-Intervention de Keller-Brandes

Il s'agit d'effectuer la résection arthroplastique d'environ 1 cm de la base de la première phalange.

3.1.2-Intervention de Valenti (47)

Il s'agit d'effectuer la résection arthroplastique des surfaces articulaires de la base de la première phalange et de la tête du premier métatarsien, selon un dièdre de 90° ouvert en dorsal.

3.1.3-Diastasis et arthroplastie (11)

Il s'agit d'effectuer la résection de la base de la première phalange, le diastasis étant maintenu par un petit fixateur externe pendant trois semaines. Le fixateur externe peut être remplacé par du péricarde bovin recouvrant et la surface phalangienne, et la surface métatarsienne.

3.1.4-Arthroplastie au muscle plantaire (2)

Il s'agit d'effectuer en plus d'une chéilectomie une résection de la base

phalangienne selon un angle de 20 à 30°. On fixe ensuite le tendon du plantaire prélevé grâce à des points transosseux au sein d'une cavité creusée dans la première phalange. Cette intervention donne selon l'auteur une indolence et permet de préserver la mobilité de la métatarso-phalangienne de l'hallux.

3.2-Arthroplasties prothétiques

3.2.1-Prothèses en élastomères de silicone (30, 74, 78, 79)

L'usage de ces prothèses développées par Swanson a été fortement réduit depuis l'apparition de nombreux cas de siliconite.

3.2.2-Prothèses totales à glissement (67, 83)

Cimentées ou non, ces prothèses comprennent une partie métallique destinée au métatarsien et une partie en polyéthylène destinée à la phalange.

INDICATIONS D'ARTHRODÈSE MÉTATARSO-PHALANGIENNE DE L'HALLUX

A-Généralités

Les indications d'arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux se sont progressivement élargies.

Elle est réservée dans notre service quasi exclusivement à la cure chirurgicale de l'hallux rigidus sévère. L'autre indication majeure d'arthrodèse métatarso-phalangienne, mais que nous avons exclue de l'étude, est la polyarthrite rhumatoïde.

D'autres indications que nous énumérerons ci-dessous peuvent être retenues.

B-Hallux rigidus (16, 21, 75, 90, 93)

Bien qu'elle soit tantôt attribuée à Davies-Colley (17), tantôt à Cotterill (15) en 1887, il semble que la première description de l'hallux rigidus soit à l'actif de Nicoladoni (65).

De nombreux synonymes ont été employés dans la littérature:

Hallux limitus;

Hallux flexus;

Dorsal bunion;

Metatarsus primus elevatus (49);

Localized arthrosis.

1-Épidémiologie (75)

La littérature fait classiquement état d'une atteinte à prédominance masculine. Cette prédominance masculine est actuellement remise en cause. La tranche d'âge la plus atteinte semble être celle des plus de 50 ans, puisque l'hallux rigidus touche une personne sur 45 âgées de plus de 50 ans.

2-Étiologies (16, 21, 56, 61, 93)

2.1-Hallux rigidus primitif

En règle générale, l'hallux rigidus est idiopathique car aucune étiologie n'apparaît évidente.

L'hallux rigidus semble causé par des micro-traumatismes répétés, occasionnés par le choc de l'extrémité distale de l'hallux contre la chaussure.

L'arthrose semble ne se développer que si le premier métatarsien est aligné avec l'hallux. Ainsi, ceci est plus souvent le cas chez l'homme que chez la femme, celle-ci portant plus fréquemment des talons hauts.

L'hallux rigidus semble survenir plus fréquemment chez les patients présentant une certaine rigidité du premier métatarsien, ne se laissant pas dévier en varus.

Il n'y a pas de certitude concernant la relation entre longueur du premier métatarsien et hallux rigidus, les résultats variant selon les auteurs.

En revanche, le morphotype de l'avant-pied prédisposant à l'hallux rigidus semble accepté par la grande majorité des auteurs: il s'agit des morphotypes égyptien ou carré.

2.2-Échecs d'une chirurgie antérieure

L'hallux rigidus peut être la conséquence directe d'une correction chirurgicale antérieure d'une pathologie du premier rayon, notamment l'hallux valgus.

2.3-Autres étiologies

Nous ne ferons que les citer:

- *Post-traumatique;
- *Pathologie inflammatoire (telle que la polyarthrite rhumatoïde);
- *Pathologie métabolique (telle que la goutte);
- *Juvénile (ostéochondrite disséquante (48)).

3-Clinique (16, 21)

Si l'on considère la définition de Régnault (69), l'hallux rigidus est une arthrose ostéophytique, dégénérative et ankylosante, qui affecte de manière simultanée les trois éléments de l'articulation métatarso-phalangienne: tête métatarsienne, base de la première phalange et sésamoïdes, ainsi que les téguments et la capsule articulaire.

L'hallux rigidus se manifeste le plus souvent au début par des douleurs et des craquements articulaires. Il s'agit du stade d' "**hallux dolorosus**". Les douleurs sont maximales lors de la phase de propulsion, juste avant que l'hallux ne décolle du sol.

Puis la douleur peut s'atténuer mais la mobilité de l'orteil diminue, notamment



-a



-b

Fig.16a et b-Hallux rigidus.Aspect radiologique de face et de profil

en dorsiflexion. Il s'agit du stade d' "**hallux limitus**".

On note l'apparition progressive d'une tuméfaction à la face dorsale de la métatarso-phalangienne, en rapport avec la formation d'une collerette ostéophytique. Lapidus a ainsi baptisé l' hallux rigidus "**dorsal bunion**".

Les patients ressentent parfois des brûlures ou des paresthésies en rapport avec l'irritation au contact de l'exostose par traction ou compression d'un nerf dorsal.

Si le blocage de l'articulation est complet, **une compensation s'effectue au niveau des articulations interphalangienne et talo-crurale.**

Apparaît alors un durillon à la face plantaire de l'articulation interphalangienne.

Afin d'esquiver l'appui en regard de ce durillon, le patient va marcher en posant le pied en varus ou en rotation externe. Il est donc classique de voir apparaître des **douleurs** et une **hyperkératose** sous la tête du cinquième métatarsien.

C-Autres indications de l'arthrodèse métatarso-phalangienne

Elles se confondent en partie avec les étiologies d'hallux rigidus et nous ne ferons que les citer:

- *Hallux valgus majeurs;
- *Arthrites infectieuses ou dans le cadre d'une maladie rhumatismale;
- *Échec d'une chirurgie antérieure.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

A-Patients

1-Critères d'inclusion

Chaque patient a été inclus dans l'étude à la seule condition de satisfaire aux différents critères d'inclusion.

*Le patient doit avoir bénéficié d'une ou de deux arthrodèses métatarso-phalangiennes de l'hallux dans un délai minimal de six mois avant l'examen optoélectronique;

*Le patient doit marcher dans la vie quotidienne sans l'aide d'une (ou de deux) cannes ou d'une tierce personne;

*La marche ne doit en aucun cas être douloureuse, à quelque niveau que ce soit;

*Le patient ne doit avoir bénéficié d'aucune chirurgie préalable au niveau des hanches, des genoux, des chevilles et du rachis;

*Le patient ne doit pas présenter de pathologie de type inflammatoire, telle une polyarthrite inflammatoire.

2-Âge

Au moment de l'arthrodèse, l'âge moyen des patients était de 60,7 ans, avec des extrêmes allant de 50 à 77 ans (Tableau n°1).

3-Sexe

Notre étude comporte 10 femmes et 2 hommes. Les deux hommes sont les deux patients les plus âgés de la série (77 et 72 ans) (Tableau n°1).

4-Côté

Au total, on note 7 côtés gauches et 8 côtés droits si l'on inclut les trois cas d'arthrodèse métatarso-phalangienne bilatérale de l'hallux (Tableau n°1).

5-Profession

*8 patients étaient sans profession (1 patiente) ou retraités (7 patients).
Aucun d'eux n'avait été travailleur de force;

*4 patients exerçaient des professions ne nécessitant pas de travail de force.

6-Activité sportive

Aucun patient n'exerçait d'activité sportive à proprement parler. La moitié d'entre eux pratiquait la marche en tant que loisir.

7-Étiologies

8 hallux chez 6 patients, tous de sexe féminin, étaient le siège d'une arthrose post-opératoire. Les patients avaient bénéficié d'une cure chirurgicale d'hallux valgus (Intervention de Keller, ostéotomie métatarsienne et phalangienne,

SCARF) entre 15 et 25 ans avant l'arthrodèse.

7 hallux rigidus chez 6 patients étaient considérés comme primitif.

8-Délai de consolidation

La totalité des patients ayant bénéficié d'un examen optoélectronique de leur marche ont présenté une fusion osseuse effective.

Le délai moyen de fusion du foyer d'arthrodèse est de 2,7 mois, avec des extrêmes allant de 2,5 à 4 mois.

9-Délai entre l'arthrodèse et l'étude de la marche

Le délai moyen entre l'arthrodèse et l'examen optoélectronique est en moyenne de 32 mois, avec des extrêmes allant de 9 à 63 mois (Tableau n°1).

B-Bilan clinique: Cotation de l'AOFAS

Les bilans cliniques pré-opératoire et post-opératoire ont été effectués en utilisant la cotation de l'avant-pied de l'American Orthopedic Foot and Ankle Society (AOFAS).

Le score maximal obtenu grâce à cette cotation est de 100/100 lors du bilan pré-opératoire. Il a été établi rétrospectivement d'après l'interrogatoire et d'après les données de l'examen clinique pré-opératoire figurant dans le dossier médical (Tableau n°2).

Il est de 90/90 lors du bilan post-opératoire puisque 10 points sont accordés à la mobilité de l'articulation métatarso-phalangienne.

Ceci implique soit de normaliser les scores post-opératoires afin d'obtenir une cotation sur 100, soit de comparer les scores pré- et post-opératoires sans tenir compte des 10 points manquant au score post-opératoire.

Les points sont répartis selon trois critères:

Douleur: 40 points;

Fonction: 45 points;

Alignement: 15 points.

DOULEUR (40 points)

Aucune: 40

Occasionnelle: 30

Modérée, quotidienne: 20

Sévère, permanente: 0

FONCTION (45 points)

Limitation des activités

*Pas de limitation: 10

*Limitation dans les activités de loisir: 7

*Limitation modérée dans les activités de loisir et
de la vie quotidienne: 4

*Limitation sévère dans les activités de loisir et
de la vie quotidienne: 0

Chaussage

- *Chaussage sans particularité: 10
- *Chaussage de confort, semelle orthopédique: 5
- *Chaussage modifié ou plâtre: 0

Mobilité métatarso-phalangienne (flexion dorsale et plantaire)

- *Normal ou limitation minime (75° ou plus): 10
- *Limitation modérée (30-74°): 5
- *Limitation sévère (0-29°): 0

Mobilité interphalangienne (flexion plantaire)

- *Normale: 5
- *Limitation sévère (10° ou moins): 0

Stabilité des articulations métatarso-phalangienne et interphalangienne

- *Stables: 5
- *Instables ou susceptibles de se luxer: 0

Exostose en regard de la MP ou de l'IP

- *Pas d'exostose ou exostose asymptomatique: 5
- *Exostose symptomatique: 0

ALIGNEMENT (15 points)

- *Alignement correct: 15
- *Désaxation asymptomatique: 8
- *Désaxation symptomatique: 0

C-Bilan radiologique

La lecture des radiographies pré- et post-opératoires a été effectuée de façon systématique.

Elle a nécessité des clichés de pied de face et de profil en charge.

Les résultats figurent dans les tableaux n°3 et 4.

1-Clichés de pied de face en charge

Les clichés de pied de face en charge ont permis de déterminer:

1.1-Le degré d'arthrose

De nombreuses classifications sont utilisées. Nous en retiendrons deux: celle de Hattrup (37) et celle de Régnault (69).

Selon Hattrup, trois grades radiologiques peuvent être individualisés:

Grade 1: Arthrose débutante:

Pincement articulaire absent;

Ostéophytose dorsale et médiale absente.

Grade 2: Arthrose modérée:

Pincement articulaire modéré;

Ostéophytose dorsale et médiale marquée;

Condensation sous-chondrale et géodes.

Grade 3: Arthrose sévère:

Pincement articulaire important;

Ostéophytose importante;

Condensation sous-chondrale et géodes importantes;

Aspects dégénératifs des articulations métatarso-sésamoïdiennes.

La classification de Régnault comprend trois degrés:

Degré 1: Arthrose débutante;

Degré 2: Arthrose constituée;

Degré 3: Ankylose.

D'autres auteurs tels Hanft (35) incluent le metatarsus primus elevatus dans leur classification. Nous n'avons pas utilisé cette classification.

1.2-L'angle MP

Il s'agit de l'angle formé par l'intersection des axes du premier métatarsien et de la première phalange.

Il est normalement compris entre 8 et 12°. Sa valeur post-opératoire est variable selon les auteurs comme nous le verrons plus loin.

1.3-L'angle MV

Il s'agit de l'angle formé par l'intersection des axes du premier et du deuxième métatarsiens. Il mesure le varus du premier rayon.

Il est normalement inférieur à 10°.

1.4-L'angle oméga

Il s'agit de l'angle formé par l'intersection des axes du premier et du cinquième métatarsiens. Il est aussi nommé angle d'ouverture du pied. Il est normalement compris entre 20 et 28°.

1.5-La ligne de Maestro (54)

Cette ligne part du centre de la tête du sésamoïde latéral. Elle est perpendiculaire à l'axe longitudinal du deuxième métatarsien. Elle doit théoriquement passer par le centre de la tête du quatrième métatarsien. Lorsque cette ligne est légèrement plus distale, l'équilibre du pied n'est pas compromis. En revanche, si elle est plus proximale, elle peut expliquer une métatarsalgie centrale.

1.6-La courbe ou parabole de Lelièvre

Cette courbe concave vers l'arrière, relie les interlignes métatarso-phalangiens.

Le pied idéal comporterait un premier métatarsien de longueur égale à celle du second métatarsien, les métatarsiens diminuant de longueur du second au cinquième métatarsien selon une progression géométrique de raison 2.

Ainsi, les différences de longueur entre les métatarsiens doivent théoriquement s'établir à: 3 mm entre M2 et M3, 6 mm entre M3 et M4, et 12 mm entre M4 et M5.

La formule de l'avant-pied est dite:

***Index plus-minus** si le premier métatarsien est de longueur sensiblement égale à celle du deuxième métatarsien, les trois autres métatarsiens décroissant de longueur de façon régulière;

***Index plus** si le premier métatarsien est plus long que le second, les trois autres métatarsiens décroissant de longueur de façon régulière;

***Index minus** si le premier métatarsien est plus court que le second, les trois autres métatarsiens décroissant de longueur façon régulière.

Selon Viladot, l'association d'une formule index plus et d'un morphotype égyptien prédisposerait à l'hallux rigidus.

En revanche, l'association d'une formule index minus avec metatarsus varus et d'un morphotype égyptien prédisposerait à l'hallux valgus.

2-Clichés de pied de profil en charge

Les clichés de pied de profil en charge ont permis de déterminer:

2.1-Angle d'attaque de M1 au sol

Il s'agit de l'angle formé par l'horizontale définie par la surface d'appui au sol avec l'axe du premier métatarsien (ligne parallèle à la corticale supérieure passant par le centre de la tête).

Il est normalement compris entre 17 et 22°.

2.2-Angle de Djian-Annonier

Il s'agit de l'angle formé par l'intersection de deux droites:

L'une unissant le pôle inférieur du sésamoïde médial au point inférieur de l'articulation talo-naviculaire;

L'autre unissant ce dernier point au point d'appui inféro-postérieur du calcaneus.

Il est normalement compris entre 120 et 125°.

Notons que son calcul est d'intérêt mineur dans notre étude.

2.3-Angle métatarso-phalangien

Il s'agit de l'angle formé par l'axe longitudinal du premier métarsien et l'axe longitudinal de la première phalange. Il n'a été déterminé qu'en phase post-opératoire. Sa valeur varie selon les auteurs comme nous le verrons plus loin.

C-Protocole d'étude de la marche en optoélectronique

1-Déroulement de l'enregistrement

Chaque patient convoqué était invité à se dévêtir et ne garder que ses sous-vêtements. L'examen était réalisé pieds nus.

Toutes les mires décrites ci-dessous étaient alors minutieusement positionnées sur le patient et l'enregistrement pouvait débuter. Le patient ainsi "équipé" se familiarisait avec la marche lors de quelques passages non enregistrés.

Trois enregistrements valables étaient retenus pour chacune des parties d'examen suivantes:

Marche sur terrain plat, par convention effectuée de gauche à droite. Le patient devait marcher le plus normalement possible, en essayant au maximum de faire abstraction des conditions de marche;

Marche avec escaliers (trois marches mises en place au milieu de la salle d'enregistrement), effectuée par convention de gauche à droite. Les trois marches étaient matérialisées par six marqueurs placés à leurs angles libres.

2-Les paramètres du cycle de la marche

2.1-Généralités

Les paramètres mesurés caractérisent les mouvements mis en jeu lors de la marche dans les trois plans de l'espace, sans se préoccuper des forces à l'origine de ces mouvements (Tableau n°5).

Concernant la marche, les mouvements angulaires du pelvis, des hanches, des genoux, des chevilles et des pieds sont à analyser. L'objectif est d'estimer les

mouvements angulaires des articulations à partir des marqueurs placés à la surface de la peau. Pour ce faire, un modèle est utilisé par le logiciel VICON Clinical Manager (VCM), simplifiant la représentation du pelvis ainsi que des membres limités chacun à trois segments (cuisse, jambe, pied) et trois centres articulaires (hanche, genou, cheville).

Les articulations sont réduites à des points de rotation simplifiant l'étude des mouvements angulaires dans les trois plans de l'espace. Le calcul de la position des centres articulaires repose sur un positionnement conventionnel de quinze marqueurs sur la peau et sur certaines mesures anthropomorphiques (taille, longueur des membres inférieurs, largeur des genoux et des chevilles).

*Le **centre articulaire de la hanche** est calculé à partir de la taille du pelvis et de la longueur du membre inférieur;

*Les **centres articulaires du genou et de la cheville** sont calculés à partir des marqueurs et de la largeur de l'articulation correspondante;

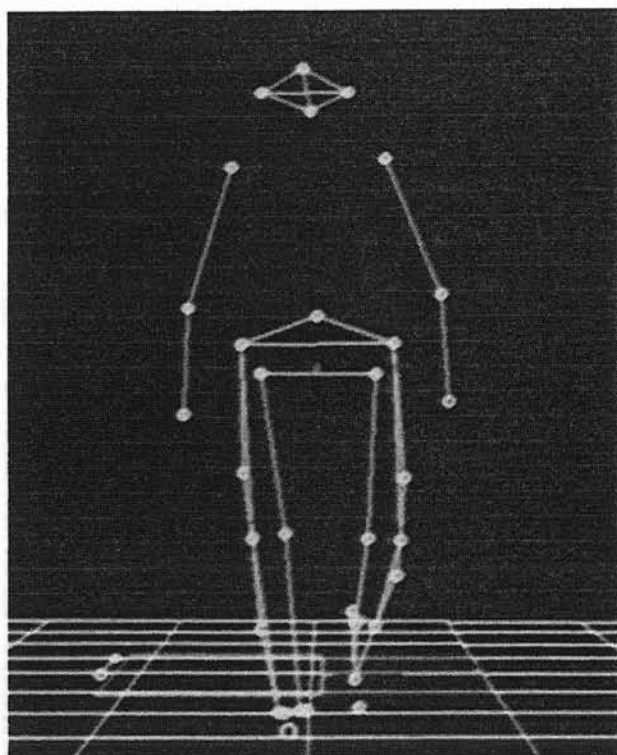
*Le **pelvis** est modélisé à partir de trois marqueurs:

Un sur chaque épine iliaque antéro-supérieure;

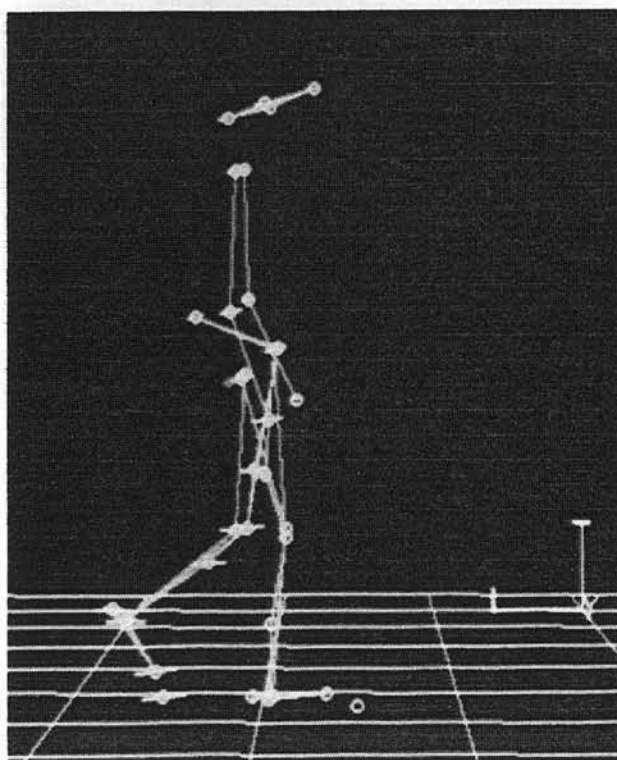
Un au niveau sacré.

*La **cuisse** est modélisée à partir des centres articulaires de la hanche et du genou (matérialisé par une mire) et d'un marqueur placé à mi-cuisse, face externe. Cet axe peut être précisé avec une plus grande fiabilité en utilisant un outil annexe (Knee Alignment Device ou KAD) lors de la position statique du sujet.

*La **jambe** est modélisée à partir des centres articulaires du genou et de la cheville (matérialisé par une mire située sur la malléole externe) et d'un marqueur placé à mi-jambe, face externe, orientant l'axe de flexion de la cheville.

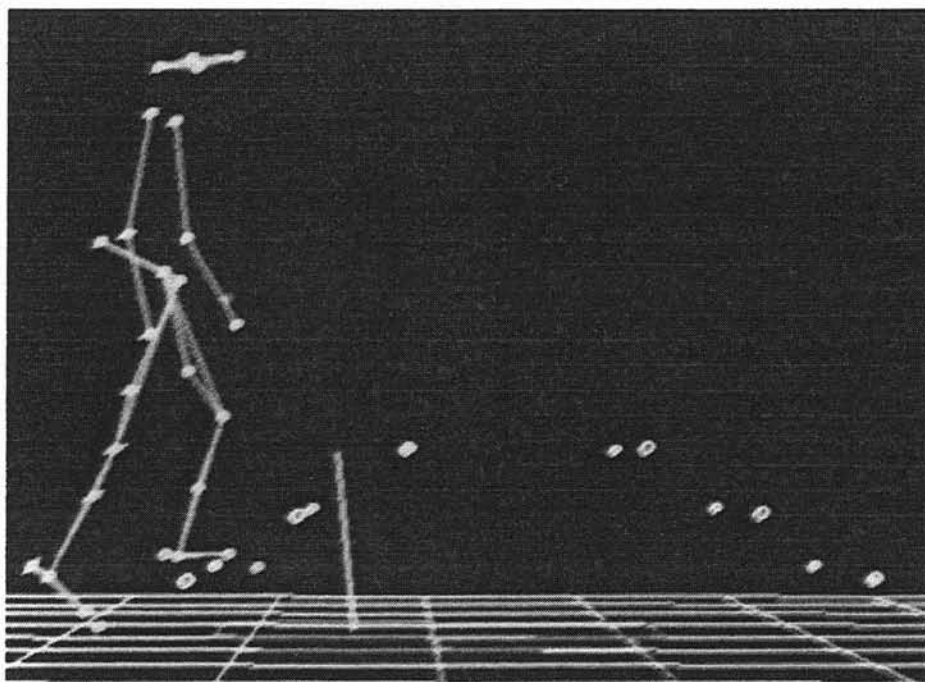


a-

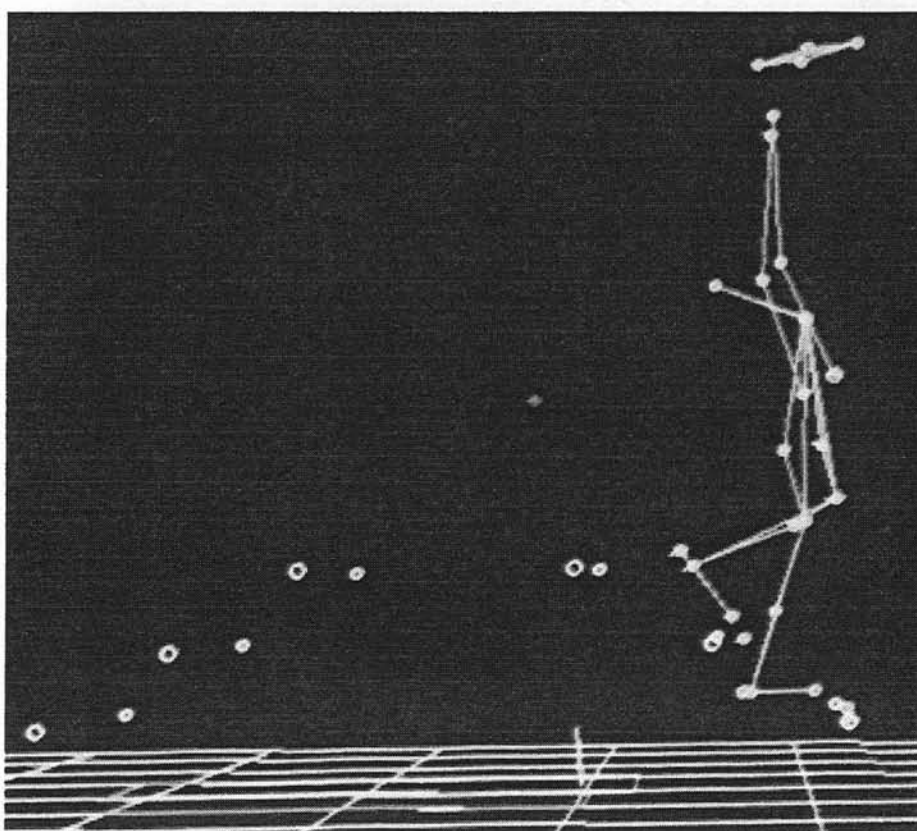


b-

Fig.17a et b-Exemple de modélisation d'un patient
grâce au logiciel VICON



-a



-b

Fig.18a et b-Modélisation d'un patient lors de la montée
et la descente de marches

*Le **pied** est défini par trois marqueurs:

L'un au niveau du talon;

L'autre au niveau de la tête du premier métatarsien;

Un troisième au niveau de la face dorsale de la deuxième phalange de l'hallux. La mire située à ce niveau est d'un plus petit calibre que les précédentes, miniaturisation rendue nécessaire pour des raisons d'encombrement spatial et de distinction des mires par les caméras infra-rouges.

Douze autres marqueurs ont été mis en place afin de compléter l'étude de la marche:

*Quatre marqueurs sur le pourtour de la région céphalique;

*Un marqueur à la face externe de chaque épaule;

*Un marqueur à la face externe de chaque coude;

*Un marqueur à la face dorsale de chaque poignet.

Ce sont donc au total 27 marqueurs qui ont été à chaque examen mis en place sur chaque patient.

2.2-Paramètres généraux du cycle de la marche

Un ensemble de variables, calculé systématiquement par le logiciel VICON, caractérise la marche d'un patient.

2.2.1-Vitesse de marche

Il s'agit de la distance parcourue par unité de temps.
Sa valeur théorique est de **901+/- 120 mm/s**.

2.2.2-Longueur du cycle

Il s'agit de la distance parcourue par le patient lors d'un cycle de marche complet.

Sa valeur théorique est de **1069+/-76,6 mm**.

2.2.3-Cadence

Elle correspond au nombre de pas effectués par le patient en une minute, valeur rapportée à une seconde.

Sa valeur théorique est de **0,84+/- 0,077/s**.

2.2.4-Durée du cycle

Il s'agit du temps mis par le patient pour effectuer un cycle de marche complet. Nous ne prendrons pas en compte cette donnée car nous étudions uniquement la phase d'appui. C'est la durée de l'appui qui sera prise en compte (voir ci-dessous).

Sa valeur théorique est de **1,19+/- 0,12s**.

2.2.5-Durée de l'appui

Il s'agit de la durée de la totalité de la phase d'appui, exprimée en pourcentage du cycle de la marche ou en secondes.

Sa valeur théorique est de **63,2+/- 2,55%**.

2.2.6-Durée du simple appui

Il s'agit de la durée du simple appui, exprimée en pourcentage du cycle de la marche.

Sa valeur théorique est de **36,9+/- 2,97 %**.

2.2.7-Durée du double appui

Il s'agit de la durée du double appui, exprimée en pourcentage du cycle de la marche.

Sa valeur théorique est de **26,3+/- 3,81 %**.

2.3-Autres paramètres

Nous nous sommes restreints à l'étude de la phase d'appui, l'arthrodèse métatarso-phalangienne ne perturbant théoriquement pas la phase oscillante.

Différents paramètres ont été étudiés:

- *Les variations des **valeurs cinétiques et cinématiques**;

- *Les variations des **forces de réaction du sol**.

Trois enregistrements valides ont été effectués pour chaque côté. Seuls les deux derniers ont été retenus, permettant ainsi au patient de s'habituer aux différentes étapes de l'enregistrement "équipé" des mires.

Un enregistrement est considéré comme valide si l'on peut observer une phase d'appui complète sur une seule plate-forme.

Les valeurs prises en compte correspondent à la moyenne des valeurs trouvées lors de ces deux derniers enregistrements.

2.3.1-Valeurs cinétiques et cinématiques

Nous avons pris en compte les caractéristiques de ces valeurs cinétiques et cinématiques dans les trois plans de l'espace.

Pour chaque patient, la recherche de modifications de ces valeurs a été effectuée par superposition des courbes concernant le pied siège de l'arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux et le pied sain (ou le second pied arthrodésé le cas échéant). Tout graphique présentant une non-superposition des deux courbes a été analysé statistiquement afin d'affirmer si la différence était significative.

Pour une meilleure lisibilité des résultats, les courbes obtenues dans les trois dimensions de l'espace (antéro-postérieur, latéro-latéral, vertical) ont été regroupées par site anatomique (Fig.19 et 20).

Ainsi, on considérera successivement:

- *Le pelvis;
- *La hanche;
- *Le genou;
- *La cheville.

2.3.1.1-Pelvis

Plan antéro-postérieur: **Obliquité du pelvis**

Plan latéro-latéral: **Bascule du pelvis**

Plan vertical: **Rotation du pelvis**

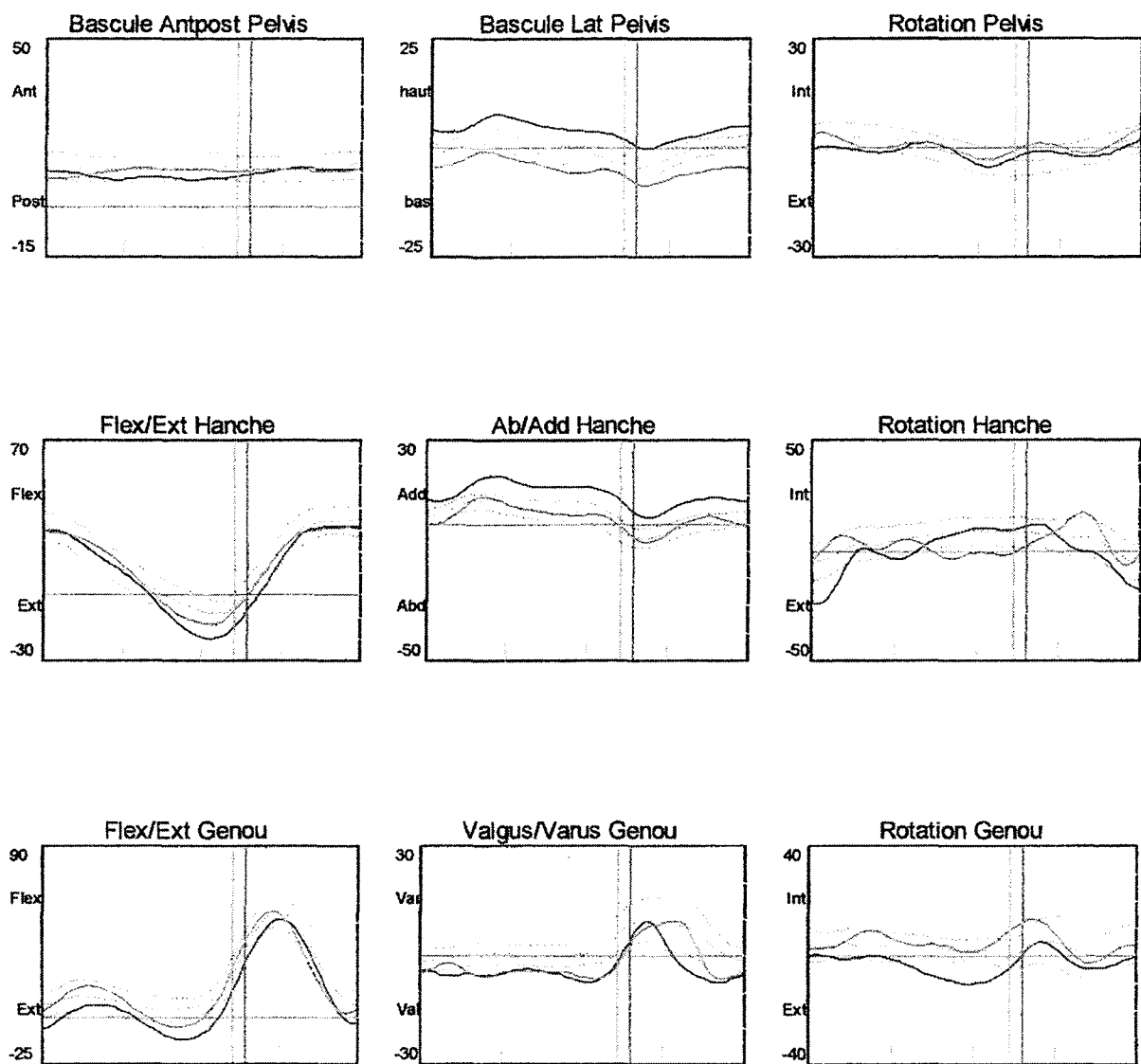


Fig.19-Cinétique générale de la marche 1

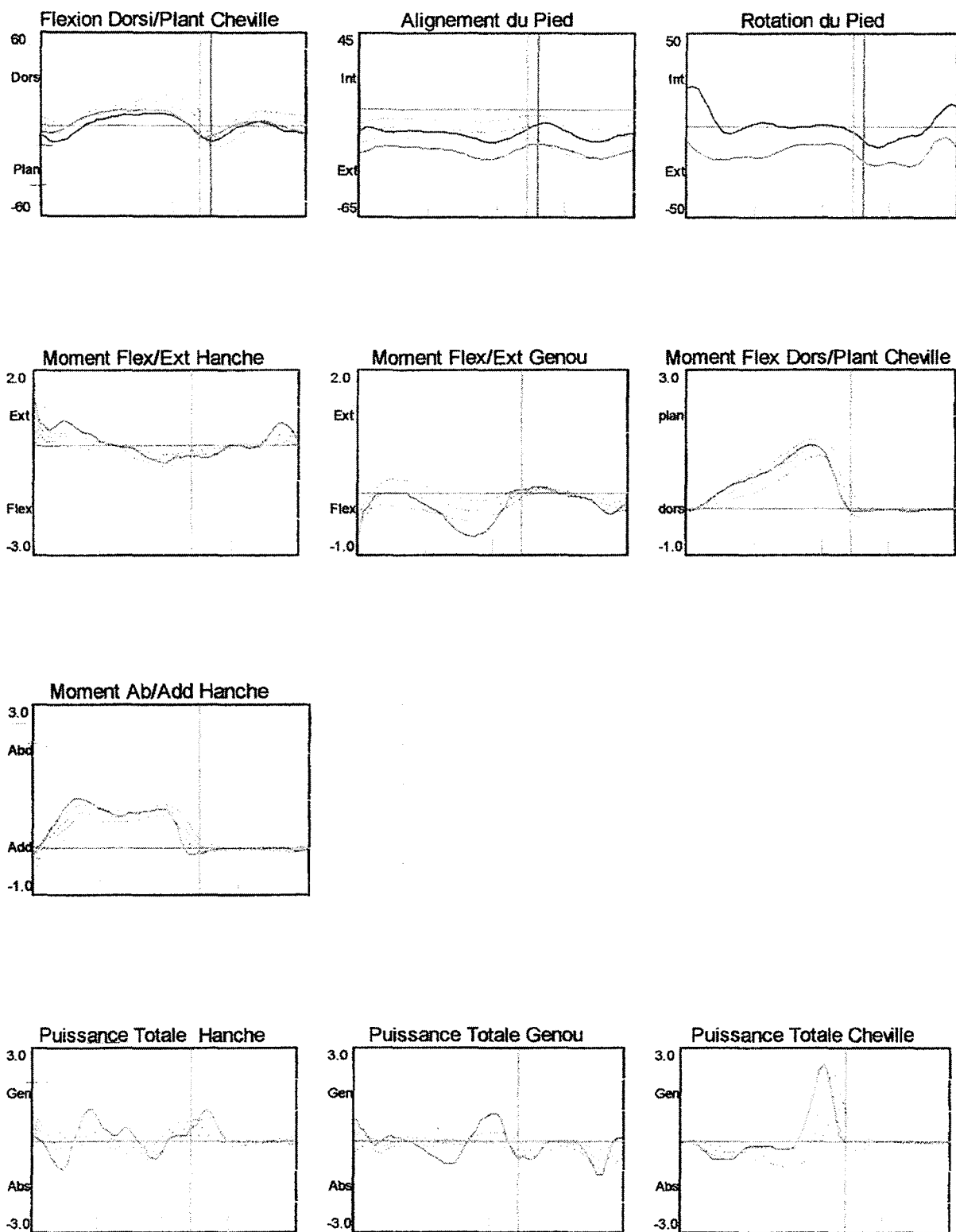


Fig.20-Cinétique générale de la marche 2

2.3.1.2-Hanche

Plan antéro-postérieur: **Flexion/Extension de hanche**

Moment de Flexion/Extension de hanche

Plan latéro-latéral: **Abduction/Adduction de hanche**

Moment d'Abduction/Adduction de hanche

Plan vertical: **Rotation de la hanche**

Moment de rotation de la hanche

Puissance totale de la hanche

2.3.1.3-Genou

Plan antéro-postérieur: **Flexion/Extension du genou**

Moment de Flexion/Extension du genou

Plan latéro-latéral: **Varus/Valgus du genou**

Moment de Varus/Valgus du genou

Plan vertical: **Rotation du genou**

Moment de rotation du genou

Puissance totale du genou

2.3.1.4-Cheville

Plan antéro-postérieur: **Flexion dorsale/Flexion plantaire de la cheville**
Moment de Flexion dorsale/Flexion plantaire de la cheville

Plan latéro-latéral: **Alignement du pied**
Puissance de la cheville

Plan vertical: **Rotation externe du pied**

Puissance totale de la cheville

Seules les amplitudes de cheville semblaient être différentes selon que l'on se situait du côté arthrodésé ou non. Elles ont donc fait l'objet d'une analyse statistique (Tableau n°6).

2.3.2-Forces de réaction du sol

La notion de force de réaction du sol a été définie dans un chapitre précédent.

Nous avons pris en compte les caractéristiques de la force de réaction du sol dans les trois plans de l'espace (Tableaux n°7, 8, 9).

Dans le **plan antéro-postérieur**, nous avons déterminé l'instant où débute la phase d'appui (**Td**), ainsi que l'instant où elle se termine (**Tf**), permettant de calculer la durée totale de la phase d'appui.

Nous avons aussi recherché le point d'inversion de la courbe (**Ti**), permettant de déterminer ainsi le temps de freinage $((T_i - T_d) \cdot 20 \text{ ms})$ et le temps de propulsion $((T_f - T_i) \cdot 20 \text{ ms})$.

Afin de simplifier la lecture des tableaux, nous avons choisi de ne pas faire apparaître T_d , T_f , T_i .

Nous avons par ailleurs déterminé la valeur du pic de freinage (**F1**) et du pic de propulsion (**F2**). L'apparition du pic de propulsion a été caractérisée en l'exprimant en pourcentage de la phase d'appui (Tableau n°10).

Dans le **plan latéro-latéral**, compte tenu de la grande variabilité caractérisant cette courbe, nous avons uniquement déterminé les pic de force positif (**F3**) et négatif (**F4**) maximaux.

Dans le **plan vertical**, nous avons déterminé trois pics de force:

- Le premier correspondant à l'attaque du talon (**F5**);

- Le second correspondant au passage du tronc à la verticale (**F6**);

- Le troisième correspondant à la propulsion (**F7**).

Pour chacune de ces valeurs, nous avons déterminé leur délai d'apparition (**T1 à T7**).

Nous avons enfin tenter de localiser la force de réaction du sol par rapport à la mire TOE, en déterminant si elle passait, et le cas échéant quand, en avant de la mire TOE (Tableau n°11).

3-Autres données de l'étude de la marche

Nous tenterons de répondre à plusieurs questions:

Existe-t'il une modification de la dissociation des ceintures scapulaire et pelvienne?

Nous avons recherché si l'arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux entraînait des modifications des mouvements d'une ceinture par rapport à l'autre. Nous avons pris en compte l'angulation moyenne et l'écart-type existant au cours du cycle de la marche entre la ceinture scapulaire et la ceinture pelvienne. Nous avons aussi noté les valeurs maximales lors des phases d'appui gauche et droite. Les résultats figurent dans le tableau n°12.

À quel moment s'effectue le décollement du talon?

Du côté de l'arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux, on peut supposer que le décollement du talon s'effectue plus tardivement du fait que le roulement ne se fait plus sous la tête du premier métatarsien mais au niveau de l'inter-phalangienne.

Pour tous les patients, nous avons donc analysé chaque phase d'appui valide (deux enregistrements pour chaque pied) et déterminé l'instant précis où s'amorçait le décollement du talon (**Tt**). Nous avons ensuite exprimé cette valeur en pourcentage de la phase d'appui et fait la moyenne des deux valeurs trouvées pour chaque pied. Nous avons choisi de ne pas faire apparaître Tt pour simplifier la lecture du tableau n°13.

Existe-t'il une plus grande mobilité de l'interphalangienne du côté arthrodésé?

Un des buts principaux de ce travail est de déterminer les phénomènes d'adaptation de la marche après arthrodèse de l'hallux. Celle-ci peut être compensée soit au niveau de l'articulation talo-crurale, soit au niveau de l'interphalangienne, soit aux deux niveaux. La mise en place d'une mire à l'extrémité distale de l'hallux nous a permis de déterminer plusieurs paramètres afin d'apporter une solution au problème posé.

Le premier est la distance entre la mire apposée au niveau de la métatarso-phalangienne de l'hallux (nommée **TOE**) et celle apposée au niveau de l'interphalangienne de l'hallux (nommée **FIN**).

Cette distance a été mesurée lors de la phase d'appui, quand le pied reposait complètement sur le sol correspondant à la plus longue distance entre les deux mires (**MAX**). Nous avons aussi déterminé la plus petite distance existant entre les deux mires à la phase de propulsion (**MIN**).

Un artifice a été utilisé afin de déterminer précisément ces distances.

On connaît en effet à chaque instant la position et la valeur de la force de réaction du sol (nommée **FDR**). Nous avons donc additionné la distance **TOE-FDR** et la distance **FDR-FIN** et ainsi obtenu les distances TOE-FIN minimales (**MIN**) et maximales (**MAX**). La différence **MAX-MIN** nous permettait de déterminer le rapprochement entre les deux mires et d'affirmer si celui-ci était plus important du côté arthrodésé dans le tableau n°14.

Si tel était le cas, et si la fonction de l'articulation talo-crurale était normale, cela permettrait de supposer que c'est au niveau de l'articulation inter-phalangienne que s'effectue la plus grande partie de la prise en charge de l'arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux.

Nous avons choisi de ne faire figurer que les valeurs des distances TOE-FIN maximales et minimales, ainsi que la différence entre ces deux valeurs.

Existe-t'il des modifications de la marche lors de la montée ou la descente des escaliers?

L'étude de la montée et de la descente des escaliers est rendue difficile par le fait que les marches mises en place masquent le plus souvent les deux mires TOE et FIN. En effet, les orteils sont souvent quasiment au contact de la marche supérieure lors de la montée des escaliers. Nous avons cependant visionné cette partie de l'examen en l'absence quasi-complète des deux mires de l'hallux et tenté de déceler toute anomalie en rapport avec l'arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux. Aucune mesure n'a été relevée au cours de cette partie de l'examen car les forces de réaction du sol sont réparties sous les marches sans correspondance avec la réalité des appuis plantaires. Il s'agit donc d'une partie de l'examen effectuée visuellement de façon exclusive.

E-Analyse statistique des résultats

Le test de Wilcoxon permettant de comparer deux séries appariées et de taille comprise entre 6 et 20 a été utilisé. Nous préciserons pour chaque paramètre testé si les différences entre le côté sain et le côté arthrodésé sont statistiquement significatives.

RÉSULTATS

A-Bilan clinique

Comme nous l'avons vu précédemment, nous avons utilisé la cotation de l'AOFAS (Tableau n°2).

En phase pré-opératoire, le score n'a pu être établi que de façon rétrospective.

En phase post-opératoire, le score a été établi par l'interrogatoire, l'examen clinique et l'analyse radiographique.

1-Bilan clinique pré-opératoire

La totalité des patients présentaient des douleurs très invalidantes.

Les patients étaient limités dans leurs activités de loisir et leur vie quotidienne dans la grande majorité des cas (12 cas).

Les patients ont modifié leur mode de chaussage dans 12 cas, optant soit pour des chaussures d'une taille supérieure, soit pour des chaussures plus larges. Le chaussage difficile était une des plus importantes doléances des patients.

Dans 7 cas, la mobilité métatarso-phalangienne était très altérée ($<30^\circ$). Elle était modérément altérée dans 6 cas et normale dans 1 cas.

La mobilité interphalangienne était constamment conservée, condition nécessaire à la décision de l'arthrodèse métatarso-phalangienne.

Les articulations métatarsophalangienne et interphalangienne étaient constamment stables.

Une exostose dorsale douloureuse était présente dans 13 cas.

L'alignement de la première colonne était correct dans 11 cas.
Dans 1 cas, il existait une désaxation asymptomatique et dans 3 cas, il existait une désaxation symptomatique.

2-Bilan clinique post-opératoire

L'arthrodèse métatarso-phalangienne a permis d'obtenir l'indolence totale dans 10 cas. Dans 5 cas, les douleurs étaient occasionnelles ou causée par la présence de matériel d'arthrodèse gênant.

Une reprise des différentes activités de la vie courante sans limitation a été possible dans 7 cas. Dans 8 cas, les patients avaient renoncé à effectuer des randonnées, seule activité "sportive" qu'ils pratiquaient.

Dans 8 cas, les patients pouvaient se chausser à nouveau sans difficulté particulière. Un chaussage de confort était adopté dans 7 cas.

Dans la totalité des cas, les patients avaient conservé une mobilité normale et une bonne stabilité interphalangienne. Ils ne se plaignaient plus de douleur en rapport avec l'exostose dont l'ablation avait été pratiquée lors de l'intervention chirurgicale.

L'alignement était correct dans la totalité des cas.

3-Synthèse

Le score pré-opératoire moyen est de 33,3/100, avec des extrêmes allant de 19 à 44.

Le score post-opératoire moyen est de 82,1/90, avec des extrêmes allant de 67 à 90.

Le gain moyen est de 47,8 points, avec des extrêmes allant de 31 à 63.

Ce gain est considérable, et est à mettre à l'actif de l'indolence complète et souvent immédiate secondaire à l'arthrodèse, mais aussi à l'amélioration du chaussage qui était un critère décisif poussant les patients à opter pour la solution chirurgicale.

B-Bilan radiologique

1-Bilan radiologique pré-opératoire

Bien que la détermination du type d'avant-pied soit clinique, nous la faisons figurer dans le bilan radiologique afin de pouvoir comparer les résultats à ceux de la formule métatarsienne (Tableaux n°3 et n°4).

12 patients présentaient un avant-pied de **type égyptien** dont:

- 5 étaient associés à un index plus;
- 3 étaient associés à un index plus minus;
- 4 étaient associés à un index minus.

L'articulation métatarso-phalangienne de l'hallux était le siège d'une **arthrose** sévère dans tous les cas.

Selon Hattrup, 14 patients étaient classés grade 3 et 1 patient grade 2.

Selon Régnault, 14 patients étaient classés stade 2 et 1 patient stade 3.

Dans le Tableau n°3, le grade selon Hattrup est précédé d'un H et le stade selon Régnault est précédé d'un R.

La ligne de Maestro passait:

- En aval de la tête du quatrième métatarsien dans 7 cas;
- Au centre de la tête dans 4 cas;
- En amont de la tête dans 4 cas.

Le **valgus phalangien MP** était en moyenne de 12,23°, avec des extrêmes allant de 0 à 22°.

Un varus phalangien était retrouvé dans deux cas, chez une même patiente présentant un hallux varus bilatéral post-opératoire.

Le **metatarsus varus MV** était considéré comme normal dans 14 cas, supérieur à la normale dans 1 cas (16°).

Il était en moyenne de $8,6^{\circ}$, avec des extrêmes allant de 4 à 16° .

L'**angle d'ouverture du pied** était considéré comme normal dans 11 cas, supérieur à la normale dans 1 cas (30°) et inférieur à la normale dans 3 cas (18°).

Il était en moyenne de $23,8^{\circ}$, avec des extrêmes allant de 18 à 30° .

L'**angle d'attaque de M1 au sol** était considéré comme normal dans 11 cas.

Il était supérieur à la normale dans 4 cas.

Il était en moyenne de $22,2^{\circ}$, avec des extrêmes allant de 18 à 31° .

L'**angle de Djian-Anonnier** était considéré comme normal dans 3 cas, inférieur à la normale dans 9 cas et supérieur dans 3 cas.

Il était en moyenne de $118,5^{\circ}$, avec des extrêmes allant de 106 à 150° .

2-Bilan radiologique post-opératoire

Le morphotype le plus souvent retrouvé est l'**avant-pied** carré (7 cas), dont:

5 étaient associés à un index minus;

2 étaient associés à un index plus.

Le morphotype égyptien est retrouvé 4 fois, ainsi que le morphotype grec.

Si l'on ne considère que les 12 avant-pieds de type égyptien:

4 sont restés égyptiens;

6 sont devenus carrés;

2 sont devenus grecs.

Sur les 8 avant-pieds égyptiens ayant changé de canon:

2 sont restés index Plus;

3 sont passés d'un index Plus-Minus à un index Minus;

3 étaient index Minus.

Le **valgus phalangien** était en moyenne de $12,06^\circ$, avec des extrêmes allant de 4° à 22° .

Le **metatarsus varus** était en moyenne de 9° , avec des extrêmes allant de 6° à 18° .

L'**angle d'ouverture du pied** était de $24,7^\circ$, avec des extrêmes allant de 18° à 30° .

L'**angle d'attaque de M1 au sol** était en moyenne de $23,13^\circ$, avec des extrêmes allant de 18° à 32° .

L'**angle de Djian-Annonier** était en moyenne de $119,6^\circ$, avec des extrêmes allant de 109° à 152° .

L'**angle métatarso-phalangien** de profil était en moyenne de $16,9^\circ$, avec des extrêmes allant de 4° à 45° .

3-Synthèse

Le degré d'**arthrose** métatarso-phalangienne était toujours sévère, mais un seul cas atteignait le stade de l'ankylose. Ce degré d'arthrose était en corrélation avec les importantes douleurs présentées par les patients et avec les constatations opératoires. L'indication d'arthrodèse était retenue devant une détérioration importante des surfaces articulaires, une ostéotomie phalangienne étant préférée dans les cas moins évolués.

Le morphotype de l'**avant-pied** des patients était modifié dans 9 cas.

La formule métatarsienne était modifiée dans 7 cas.

L'arthrodèse métatarso-phalangienne est une opération raccourcissante comme on le sait, mais elle semble se faire surtout aux dépens de la première phalange de l'hallux.

Le **valgus phalangien** a semblé peu modifié par l'intervention, et restait en moyenne supérieur à la normale.

Le **metatarsus varus** n'a pas été modifié par l'arthrodèse, et était normal dans la majorité des cas.

L'**angle d'ouverture du pied** ne semble pas avoir été modifié par l'intervention.

L'**angle d'attaque de M1 au sol** a été peu modifié par l'intervention.

Comme nous le verrons plus loin, nous ne retrouvons pas la notion de metatarsus primus elevatus pré-opératoire. Au contraire, il semble même que dans notre série, le premier métatarsien ait tendance à être plus verticalisé

qu'horizontalisé.

Les valeurs de l'**angle de Djian-Annonier** ne sont pas modifiées par l'intervention.

C-Analyse de la marche par le système optoélectronique

Pour simplifier l'analyse des résultats, nous utiliserons l'ordre suivi précédemment pour décrire les paramètres de la marche.

Ainsi, nous considérerons successivement les paramètres généraux, les variations des valeurs cinétiques et cinématiques, les variations des forces de réaction du sol.

Nous terminerons par l'analyse de données précises fournies par l'étude optoélectronique de la marche:

Existe-t'il une modification de la dissociation des ceintures scapulaire et pelvienne?

À quel moment s'effectue le décollement du talon?

Existe-t'il une plus grande mobilité interphalangienne du côté arthrodésé?

Existe-t'il des modifications de la marche lors de la montée et la descente des escaliers?

1-Étude des paramètres généraux de la marche

L'ensemble des paramètres généraux de la marche figure dans le tableau n°5.

Ces tableaux donne pour chaque patient et chaque paramètre les valeurs moyenne de deux enregistrements valides concernant le pied arthrodésé et le pied sain.

Le côté arthrodésé est symbolisé par une astérisque.

Il semble que la vitesse, la longueur du pas et les durées de la phase d'appui complète, du simple appui et du double appui ne soient pas modifiées par l'arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux (résultats statistiquement non

significatifs). En revanche, la cadence semble ralentie du côté arthrodésé (résultats statistiquement significatifs pour $\alpha < 1\%$). Nous préférons ne pas tenir compte des variations de ce paramètre car il nous est difficile de concevoir une marche dont le pas gauche serait plus rapide que le droit (ou inversement). Par conséquent, l'arthrodèse métatarso-phalangienne ne modifie quasiment pas les paramètres de la marche.

2-Étude des valeurs cinétiques et cinématiques

Les valeurs cinétiques et cinématiques concernant la hanche et le genou n'ont pas montré de différence significative lors de la lecture des courbes. En revanche, on note une diminution de la dorsiflexion maximale de la cheville (résultats statistiquement non significatifs)(Tableau n°6), que nous considérerons plus loin, présente chez tous les patients. La puissance de la cheville n'est quant à elle pas modifiée.

3-Étude des variations de la force de réaction du sol

Les valeurs de la force de réaction du sol sont résumées dans les tableaux n°7, n°8 et n°9.

Il existe une diminution de la force de propulsion du côté arthrodésé chez la majorité des patients. En effet, dans le plan antéro-postérieur, la valeur du pic de propulsion F2 est moindre du côté arthrodésé (résultats significatifs pour $\alpha < 1\%$). De même, dans le plan vertical, il existe une diminution de la valeur de la force F7 du côté arthrodésé (résultats significatifs pour $\alpha < 5\%$).

Nous avons par ailleurs étudié le délai d'apparition du pic de propulsion (Tableau n°10).

Celui-ci ne semble pas retardé du côté arthrodésé (résultats statistiquement non significatifs).

Nous avons enfin constaté que la force de réaction du sol était située, en fin de la phase d'appui, en avant de la mire TOE chez tous les patients arthrodésés (Tableau n°11). Ceci ne s'observe pas chez les patients non opérés. Nous tenterons de donner une explication à cette particularité plus loin.

4-Existe-t'il des perturbations au niveau des ceintures pelviennes et scapulaires?

Les résultats montrent de minimes modifications sans qu'elles soient forcément latéralisées du côté de l'arthrodèse (résultats statistiquement non significatifs)(Tableau n°12).

5-À quel moment s'effectue le décollement du talon?

Chez tous les patients, y compris ceux ayant bénéficié d'une arthrodèse bilatérale, le décollement du talon s'effectue plus précocément du côté arthrodésé (résultats statistiquement significatifs pour $\alpha < 1\%$)(Tableau n°13).

6-Existe-t'il une mobilité accrue de l'articulation interphalangienne du côté arthrodésé?

La distance maximale entre la mire située en regard de l'articulation métatarso-phalangienne et celle située à l'extrémité distale de l'hallux est toujours moins importante du côté arthrodésé (Tableau n°14). Ceci s'explique par le fait que l'arthrodèse métatarso-phalangienne est une intervention raccourcissante.

La distance minimale entre les deux mires est toujours moins importante du côté arthrodésé et la différence entre les distances maximales et minimales est toujours plus importante du côté arthrodésé (résultats statistiquement significatifs pour $\alpha < 1\%$). Cette amplitude de mouvement est à considérer plus que la distance minimale seule, car on doit tenir compte du raccourcissement du côté arthrodésé.

Nous avons par ailleurs considéré la mobilité de l'articulation talo-crurale (Tableau n°6) afin d'évaluer s'il existait des modifications des amplitudes pouvant compenser la perte de mobilité au niveau de l'articulation métatarso-phalangienne.

L'analyse des valeurs trouvées ne montre pas de différence entre les deux côtés, sauf une diminution de la dorsiflexion maximale statistiquement non significative comme nous l'avons vu précédemment.

Ainsi, on peut supposer que l'essentiel de la compensation de l'arthrodèse se situe au niveau de l'articulation interphalangienne et non au niveau de l'articulation talo-crurale. D'où la nécessité de s'assurer de la bonne fonction de l'articulation interphalangienne en pré-opératoire et d'évaluer si l'arthrodèse métatarso-phalangienne n'entraîne pas à distance une détérioration accrue de l'articulation interphalangienne.

7-Existe-t'il des modifications de la marche lors de la montée et la descente des escaliers

Le visionnement répété et attentif de la montée et de la descente des escaliers n'a pas montré d'anomalie ni d'asymétrie. Par ailleurs, et comme on

pouvait s'y attendre, les mires situées à l'extrémité distale de l'hallux ont souvent été masquées par les marches, rendant leur utilisation notamment pour l'estimation de la mobilité de l'articulation interphalangienne impossible.

DISCUSSION

Dans notre étude, nous avons choisi comme référence le pied sain pour les sujets ayant bénéficié d'une arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux unilatérale.

Cependant, nous savons que la modification de la marche du côté arthrodésé induit des perturbations du côté controlatéral. Il s'agira plus d'étudier le caractère asymétrique de la marche que de comparer le déroulement du pas avec celui d'une population saine.

Notre effectif est limité, comprenant 15 pieds arthrodésés chez 12 patients, mais il est, à notre connaissance, le plus important sur lequel ait été réalisée une étude optoélectronique; l'étude de De Frino (20) ne comprend que 10 pieds arthrodésés chez 9 patients.

Nos patients devaient, pour être inclus dans l'étude, être indemnes de toute pathologie susceptible de perturber le cycle de la marche. Rappelons que cette condition entraîne l'exclusion des patients atteints d'une polyarthrite rhumatoïde qui représentent le plus fort contingent de candidats à une arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux.

L'étude de la marche par le système VICON utilise de petites mires collées sur la peau des patients, réfléchissant le rayonnement infra-rouge émis par des caméras. Il s'agit donc d'un système n'ayant aucun caractère invasif. Les mires sont collées de façon très minutieuse sur différents sites anatomiques. Ceux-ci ont été choisis parce que leur repérage manuel était simple et reproductible, mais aussi en raison de la faible épaisseur du tissu sous-cutané sous-jacent et de sa relative immobilité par rapport aux reliefs osseux. On minimise ainsi le risque d'erreur lié au déplacement des mires lors du cycle de la marche.

L'étude a été pratiquée en demandant aux patients de marcher en sous-vêtements et pieds nus. Nous évitons ainsi tout biais lié au chaussage (raideur et forme de la semelle, hauteur du talon). En revanche la marche ne se fait pas dans les conditions habituelles et des modifications peuvent survenir. Le but de cette étude n'était pas de rechercher ces modifications. Nous avons simplement laissé les patients équipés des mires s'adapter à la marche pieds nus en effectuant quelques essais non enregistrés.

Il nous a paru essentiel d'analyser les résultats de l'étude optoélectronique de la marche en tenant compte des examens cliniques et radiologiques pré- et post-opératoires.

A-Résultats cliniques

L'évaluation clinique a été fondée sur le score de l'AOFAS.

Cette classification tient compte avant l'intervention de la mobilité métatarso-phalangienne de l'hallux. Cela obligerait, après l'intervention, à normaliser le score, le maximum devant être 100 et non 90 points. Nous ne l'avons pas fait car cela nous a permis de comparer les scores relatifs à chaque item dans les mêmes proportions en phase pré- et post-opératoire.

Il est difficile de comparer les résultats cliniques des différentes études car les méthodes d'évaluation sont très différentes. De plus, l'arthrodèse métatarso-phalangienne y est souvent pratiquée pour différentes indications, et souvent les cas d'hallux valgus sévère et d'hallux rigidus sont confondus voire comparés. Toutes les communications semblent cependant faire état d'une nette amélioration, tant sur le caractère douloureux, le mode de chaussage, que la reprise des activités professionnelles ou de loisir. Elles soulignent aussi les raisons des mauvais résultats et les éventuelles complications post-opératoires.

Déjà, les auteurs des plus anciennes communications considéraient les résultats de l'arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux comme très bons. Ainsi:

*Harrison et Harvey en 1963 (36) ont analysé 72 cas d'arthrodèse métatarso-phalangienne chez 66 patients, avec un recul de quelques mois à vingt ans. L'indolence a été obtenue dans 86% des cas. La douleur persistante des 10 cas restants était due à la présence d'une pseudarthrodèse (7 cas), à une arthrose interphalangienne (2 cas) ou à une cause non explicitée par les auteurs dans un cas.

*Wilson en 1967 (91) effectuant l'arthrodèse en cône trouve 100% de patients satisfaits, quelques-uns signalant des douleurs occasionnelles.

*Moynihan en 1967 (63) grâce à l'arthrodèse soit en cône, soit par vissage, chez 108 patients avec un recul minimum de cinq ans, trouve 86% patients très satisfaits et satisfaits. Les douleurs post-opératoires étaient soit dues à la présence de la vis d'arthrodèse, soit à la présence d'une pseudarthrodèse. Certains patients satisfaits présentaient une pseudarthrodèse, se manifestant par une micromobilité de l'articulation métatarso-phalangienne, asymptomatique et ne nécessitant par conséquent pas de reprise chirurgicale.

*Fitzgerald en 1981 (29) qui a pratiqué l'arthrodèse chez 49 patients avec un recul minimum de 10 ans, trouve 98% de résultats cliniquement satisfaisants. Les mauvais résultats de sa série sont liés à une mauvaise position de l'arthrodèse, à une pseudarthrodèse (3% des cas), à une fracture de fatigue du premier métatarsien dans 2 cas et à des douleurs post-opératoires liées au matériel (et cédant à son ablation). Il signale par ailleurs 2 cas d'arthrose interphalangienne après arthrodèse métatarso-phalangienne. Ces 2 cas sont survenus chez des patients âgés dont l'arthrodèse était fixée avec un degré de dorsiflexion insuffisant.

*O'Doherty en 1990 (66) a effectué une étude prospective concernant 50 cas d'arthrodèse, comportant un recul minimum de 2 ans. Il trouve 98% de patients satisfaits, malgré un taux important de pseudarthrodèses (22 cas) dues au mode d'arthrodèse actuellement abandonné (par cerclage).

*Copin en 1992 (14) rapporte 57 cas d'arthrodèse soit par vissage, soit par brochage en croix. Les résultats sont considérés comme excellents dans 20 cas et bons dans 22 cas, soit 77% de résultats satisfaisants.

*Tourné en 1993 (82) a colligé 62 cas d'arthrodèse par vissage et plaque. L'indolence est obtenue dans 78% des cas et 75% des patients sont satisfaits de l'arthrodèse. Les deux causes principales de douleurs post-opératoires sont la présence du matériel d'arthrodèse (9% des cas) et une dégénérescence arthrosique de l'articulation interphalangienne (9% des cas).

*Wu en 1993 (92) effectuant l'arthrodèse à l'aide d'une vis de Herbert chez 27 patients, relève 92,6% de résultats satisfaisants. Les échecs de sa série sont liés à une malposition de l'arthrodèse métatarso-phalangienne (dorsiflexion insuffisante, valgus phalangien excessif).

*Groulier et en 1994 (32), dans une série comprenant 225 arthrodèses métatarso-phalangiennes dont 20% pour hallux rigidus, obtient 89,6% de résultats satisfaisants. Il note 25 pseudarthrodèses (13% des cas) dont seulement 2 étaient symptomatiques et ont nécessité une reprise chirurgicale. Par ailleurs, il signale dans 15% des cas des douleurs modérées au niveau interphalangien.

Certaines communications, telles celle de Toméno (81), soulignent le fait que l'arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux soulage dans certains cas les métatarsalgies des quatre derniers rayons existant en période pré-opératoire. Notre étude ne nous a pas permis d'établir cette relation entre la cure chirurgicale de l'hallux rigidus et l'amélioration de la symptomatologie douloureuse au niveau des autres rayons, cette association étant rare dans notre série.

B-Résultats radiologiques

L'arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux est indiquée lorsqu'aucune possibilité de traitement médical ou de traitement chirurgical conservateur n'est envisageable. Ceci est confirmé par l'analyse radiologique des 15 cas de notre étude présentant tous, au niveau métatarso-phalangien, un stade arthrosique évolué. En revanche, tous avaient un aspect radiologique strictement normal au niveau interphalangien.

Pour estimer le degré arthrosique métatarso-phalangien de nos patients, nous avons utilisé deux classifications parmi celles trouvées dans la littérature, en raison de leur simplicité: celle de Régnault (69) et celle de Hatstrup (37).

Les principaux points discutés dans les différents articles sont:

- *Le degré du valgus métatarso-phalangien;
- *Le degré de la dorsiflexion métatarso-phalangienne;
- *L'existence d'un metatarsus primus elevatus;
- *Les alternatives à l'exploration radiologique standard.

1-Le degré du valgus métatarso-phalangien

Le valgus métatarso-phalangien idéal reste un sujet de débat. Delagoutte (21) et Toméno (81) préconisent un valgus de 10 à 20°. D'autres tels Weinfeld (90) préfèrent un valgus moins important, de 5 à 10°. Certains auteurs pensent qu'un valgus métatarso-phalangien aussi faible peut engendrer un valgus interphalangien ayant pour conséquence une dégénérescence arthrosique de l'articulation.

Globalement, le valgus métatarso-phalangien recommandé varie de 5 à 30°, et en moyenne est de 15°.

2-Le degré de la dorsiflexion interphalangienne

Le degré de la dorsiflexion métatarso-phalangienne est aussi variable selon les auteurs. Il est très important car il détermine l'appui pulpaire de l'hallux, fondamental pour la phase terminale du pas.

Il varie entre 10 et 40°, et est différent en fonction du sexe de la personne. Ainsi, on préférera une dorsiflexion de 10° chez l'homme contre 20-25° chez la femme susceptible de porter des talons hauts.

3-L'existence d'un metatarsus primus elevatus

Le metatarsus primus elevatus (décrit pour la première fois en 1939 par Lambrinudi (49)) est parfois incriminé dans la génèse de l'hallux rigidus (9).

Horton (39) a récemment étudié la fréquence d'un metatarsus primus elevatus dans une population de 81 patients (100 pieds) porteurs d'un hallux rigidus. Cette fréquence a été comparée à celle trouvée chez 50 patients (100 pieds) volontaires sains et chez 64 patients (64 pieds) porteurs d'un névrome de Morton.

Le metatarsus primus elevatus a été quantifié par la mesure de la distance entre les corticales dorsales des cols des premier et deuxième métatarsiens, ainsi que l'angle d'attaque au sol du premier métatarsien et la différence entre l'angle d'attaque au sol des premier et deuxième métatarsiens. Les valeurs respectives étaient de 7,8 mm, 20,6° et 3,7° chez les patients porteurs d'un hallux rigidus.

Aucune différence significative n'a été trouvée entre les trois groupes étudiés, ceci étant confirmé par plusieurs autres études telles celle de Meyer (62).

Tous les auteurs ne partagent cependant pas cet avis et certains comme Green et Watermann (cités par Feldman (27)) ou Davies (18) proposent des ostéotomies

respectivement distale et proximale afin de corriger le metatarsus primus elevatus. Il est néanmoins fondamental de le prendre en compte, il expliquerait certains cas de dégénérescence arthrosique secondaire au traitement de l'hallux valgus.

4-Alternatives à l'exploration radiologique standard

Schweitzer (72) a effectué une étude en Imagerie par Résonance Magnétique chez 24 patients dont 4 étaient porteurs d'un hallux rigidus et 9 étaient porteurs d'un hallux rigidus associé à un hallux valgus. Cette étude a confirmé la présence d'un pincement de l'interligne métatarso-phalangien, d'ostéophytes dorsaux et latéraux au niveau de la tête du premier métatarsien, de géodes ainsi que d'un oedème médullaire. L'utilisation de l'IRM ne semble pas apporter de renseignements complémentaires par rapport à la radiologie standard permettant d'affiner les indications chirurgicales.

Shereff (75) cite le scanner et les tomographies, permettant de faire un bilan des surfaces articulaires notamment plantaires, en précisant toutefois que ces techniques sont d'usage exceptionnel.

C-Résultats de l'étude opto-électronique

Compte tenu de la difficulté à convaincre patients et sujets témoins de bénéficier d'un examen optoélectronique, nous avons choisi d'étudier le caractère symétrique de la marche. Nous avons donc comparé le côté arthrodésé au côté contro-latéral considéré comme sain.

Chez les patients ayant bénéficié d'une arthrodèse métatarso-phalangienne bilatérale, nous avons observé la marche dans sa globalité, et recherché toute anomalie sans qu'une asymétrie en soit obligatoirement la résultante.

L'étude de la marche du patient porteur d'une arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux a fait l'objet de peu de communications. À notre connaissance, il n'existe qu'une seule étude optoélectronique chez de tels patients. Il s'agit de l'étude de DeFrino & Coll.(20).

Cette étude concerne 10 arthrodèses métatarso-phalangiennes de l'hallux chez 9 patients (5 femmes et 4 hommes) âgés de 38 à 72 ans (en moyenne 56 ans). Les résultats obtenus chez ces 9 patients ont été comparés à ceux obtenus dans une population témoin de 9 volontaires indemnes de toute pathologie susceptible de modifier le schéma de leur marche.

Les patients équipés des mires positionnées en sites proximaux classiques, n'ont pas bénéficié de la mire miniaturisée située à l'extrémité distale de l'hallux contrairement à nos patients. Ainsi, aucune estimation de la fonction de l'interphalangienne n'était possible.

La mire située au niveau de l'interligne de la première articulation métatarso-phalangienne de l'hallux dans notre étude était située au niveau de l'articulation métatarso-phalangienne du troisième rayon dans l'étude de DeFrino.

Cinq enregistrements valides ont été effectués pour chaque patient contre trois

dans notre série.

Les conclusions de l'étude ont été les suivantes:

Diminution de la longueur du pas (de 2,4 cm avec des extrêmes allant de 5,5 à 0,2 cm) du côté arthrodésé statistiquement significative;

Diminution de la dorsiflexion de 4° au moment du "Toe-Off" du côté arthrodésé, statistiquement non significative;

Diminution du moment de dorsiflexion et de la puissance de la cheville au moment du "Toe-Off";

Absence d'anomalie au niveau du genou et de la hanche.

L'étude podobarographique pratiquée de façon concomitante a montré que l'arthrodèse permettait une meilleure répartition du poids du corps au niveau du premier rayon. Par ailleurs, la surface de contact sous le pied entier et sous l'hallux augmentaient de façon significative.

Nos résultats diffèrent en partie de ceux de l'étude de DeFrino.

Nous nous sommes limités à l'étude de la phase d'appui, l'arthrodèse métatarso-phalangienne entraînant théoriquement des modifications de la phase d'appui, et notamment de la phase de propulsion.

Nous résumons nos résultats de la façon suivante:

*Les durées relatives et absolues des deux phases secondaires de la phase d'appui ne sont pas modifiées.

*Le pic de propulsion est moindre du côté arthrodésé chez tous les patients. Il correspond à la force F2 de notre étude dans le plan antéro-postérieur et à la force F7 dans le plan vertical. La concordance des pics de force dans ces deux plans confirme la fiabilité de nos mesures.

*La force de réaction du sol passe en avant de la mire située au niveau de l'articulation métatarso-phalangienne pendant la phase d'appui, ce qui ne s'observe pas habituellement chez les sujets sains. À noter que la force de réaction du sol ne passe jamais en avant de la mire située à l'extrémité distale de l'hallux, ce qui paraît logique mais nous permet d'affirmer la fiabilité de notre système de mesure.

*Par ailleurs, on note un décollement plus tardif du talon du côté arthrodésé.

*Enfin, il existe une plus grande mobilité de l'articulation interphalangienne du côté arthrodésé.

À la lumière de ces résultats, nous pouvons tenter de donner une explication cohérente de ces différentes observations.

Il s'agit d'une modification de la cinétique du roulement s'effectuant normalement sous la tête du premier métatarsien.

La phase de double appui antérieur de réception n'est pas modifiée et seule la phase d'appui unilatéral présente des particularités.

Lorsque le pied est à plat sur le sol, au cours du roulement autour de la cheville, le transfert du poids du corps se fait de façon plus précoce et plus massive vers l'avant du pied; alors que chez le sujet sain, il se situe sous l'articulation métatarso-phalangienne de l'hallux, l'essentiel du poids du corps se situant sous l'articulation interphalangienne de l'hallux chez tous nos patients.

Il est intéressant de noter que les patients présentent cette caractéristique de façon bilatérale, moins marquée cependant du côté non arthrodésé. Cela laisse présager une adaptation de la marche du côté non arthrodésé au côté arthrodésé. Lorsque le roulement autour de la cheville est terminé, le roulement autour de l'articulation interphalangienne peut alors s'effectuer. Le centre du roulement

étant plus distal, les patients ont tendance à décoller le talon plus tardivement. Lors de la phase de propulsion, l'existence d'un bras de levier plus important limite l'importance de la force de propulsion expliquant la valeur moindre du pic de propulsion du côté arthrodésé.

Nous avons trouvé qu'il existait une plus grande mobilité de l'articulation interphalangienne du coté arthrodésé. Ceci a été rendu possible par la mise en place d'une mire à la surface de l'ongle de l'hallux. Le système VICON permet de discriminer deux mires aussi proches que les mires situées au niveau de l'articulation métatarso-phalangienne et à l'extrémité distale de l'hallux.

Nous avons par ailleurs pu montrer qu'il n'existait pas de modification majeure de la mobilité de l'articulation talo-crurale.

La suppression des mouvements d'une articulation entraîne des répercussions au niveau des articulations sus- et sous-jacentes, dans des proportions qui ne sont pas toujours connues. En ce qui concerne l'arthrodèse de l'articulation métatarso-phalangienne de l'hallux, la compensation semble s'effectuer essentiellement au niveau de l'articulation interphalangienne, comme pouvait le laisser présager l'hypermobilité de cette articulation constatée cliniquement.

Au recul moyen de 32 mois, nous n'avons pas constaté de dégénérescence arthrosique de l'articulation interphalangienne. Ceci pourrait s'expliquer, si l'évolution à long terme n'est pas péjorative, par l'existence d'un pic de propulsion moindre, entraînant une surcharge moins importante au niveau de l'hallux.

L'étude de la montée et de la descente des escaliers a montré les limites de l'examen optoélectronique. En effet, le système de caméras infrarouges n'a pu

détecter de façon continue les mires situées à l'extrémité distale de l'hallux, celles-ci étant cachées par les marches. Nous n'avons pas pu déterminer les modifications de la cinétique du dérouler du pas dans ces conditions. Cependant, les patients n'ont fait part d'aucune doléance concernant la montée ou la descente des escaliers et l'on peut penser que s'il existe des modifications lors de la pratique de ces actions, elles ne sont pas ressenties par le patient

CONCLUSION

Le but de notre étude était d'évaluer les répercussions de l'arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux sur la marche.

Notre série comprend 15 observations d'arthrodèse métatarso-phalangienne chez 12 patients (10 femmes et 2 hommes) soit 9 arthrodèses unilatérales et 3 arthrodèses bilatérales.

Chaque patient a bénéficié d'un examen clinique, radiologique et optoélectronique au Laboratoire de la marche de Gondreville.

*Le bilan clinique a montré une nette augmentation du score de l'AOFAS de 47,8 points en moyenne, notamment due à l'indolence et à l'amélioration du chaussage liés à l'intervention chirurgicale.

*Le bilan radiologique a montré que le degré d'arthrose est toujours important lorsque l'intervention chirurgicale est retenue. Les articulations talo-crurale et interphalangienne ne présentaient aucun signe de dégénérescence arthrosique.

L'arthrodèse modifie le type d'avant-pied car c'est une intervention raccourcissante, et il semble que ceci se fasse surtout aux dépens de la phalange. Elle ne modifie pas par ailleurs les autres paramètres mesurés.

*L'examen optoélectronique montre que l'arthrodèse ne modifie pas les paramètres généraux de la marche.

L'arthrodèse ne modifie ni les paramètres cinétiques, ni les paramètres cinématiques de la marche.

Le décollement du talon est plus tardif du côté arthrodésé.

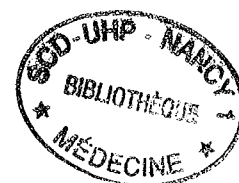
La force de propulsion est moindre du côté arthrodésé tant dans le plan antéro-postérieur que vertical.

En revanche, il existe une plus grande mobilité au niveau interphalangien du côté arthrodésé. Comme la fonction de l'articulation talo-crurale n'est pas modifiée, l'essentiel de la compensation de l'arthrodèse métatarso-phalangienne se fait par l'intermédiaire de l'articulation inter-phalangienne.

Il n'existe pas de modifications notables lors de la montée et de la descente des escaliers.

Toutes ces données confirment les résultats cliniques de l'arthrodèse métatarso-phalangienne de l'hallux et laisse une place très restreinte aux indications d'arthroplastie, dont les résultats sont d'ailleurs, jusqu'à ce jour, décevants. Cette technique n'est pas encore prête à "relever le défi" de l'arthrodèse, mais constitue une voie de recherche qui sera le challenge de ces prochaines années en matière de chirurgie de l'avant-pied.

BIBLIOGRAPHIE



1-AHN TK, KITAOKA HB, LUO ZP, AN KN:

Kinematics and contact characteristics of the first metatarsophalangeal joint.

Foot Ankle Int. 1997 Mar; 18(3): 170-4.

2-BARCA F:

Tendon arthroplasty of the first metatarsophalangeal joint in hallux rigidus: preliminary communication.

Foot Ankle Int. 1997 Apr; 18(4): 222-8.

3-BAROUK LS:

Techniques of osteotomies of the forefoot.

In: Monographie des Journées de Bordeaux. 20, 21, 22 Octobre 1994.

4-BEJJANI FJ, SAILLARD P, DIEBOLD P:

Biomécanique du gros orteil.

Encycl Méd Chir (Elsevier, Paris), Podologie, 27-010-A-50, 1999, 6p.

5-BONNEL F, NICOLEAU F, BRIAND D, MONTAGNE J:

Anatomie radiologique et biométrie des métatarsiens.

Méd. Chir. Pied 1995; 11(3): 138-141.

6-BROCA P:

Des difformités de la partie antérieure du pied produite par faction de la chaussure.

Bull. Soc. Anat. 1852; 27: 60-67.

7-BRODSKY JW, PTASZEK AJ, MORRIS SG:

Salvage first metatarsophalangeal arthrodesis utilizing ICBG: clinical evaluation and outcome.

Foot Ankle Int. 2000 Nov; 21(4): 290-296.

8-CALDERONE DR, WERTHEIMER SJ:

First metatarsophalangeal joint arthrodesis utilizing a mini-Hoffman External Fixator.

J Foot Ankle Surg. 1993 Sep-Oct; 32(5): 517-25.

9-CAMINEAR DS:

Role of metatarsus primus elevatus in the pathogenesis of hallux rigidus.
Foot Ankle Int. 2000 Nov; 21(11): 967.

10-CHÈZE L, LAVIGNE A:

Analyse tridimensionnelle de la marche. Application en podologie.
In: Podologie 2001, Paris, Expansion Scientifique Française: 18-22.

11-CHIAPPARA P, VERRINA F, DAGNINO G, PEDRONI MENCONI F:

Hallux rigidus: traitement par diastasis et arthroplastie.
Med. Chir. Pied 1986; 6: 13-15.

12-CLANTON TO, FORD JJ:

Turf toe injury.
Clin. Sports Méd. 1994; 13: 731-741.

13-CLANTON TO, SCHON LC:

Athletic injuries to the soft tissues of the foot and ankle.
In: MANN RA, COUGHLIN MJ: Surgery of the foot and ankle.
Éd 6, Saint Louis, Mosby-Year Book Inc 1993: 1095-1224.

14-COPIN G, DAHMANI O:

L'arthrodèse métatarso-phalangienne du gros orteil.
In: HÉRISSON C, SIMON L: Actualités en Médecine et Chirurgie du Pied. 7^e
série, 1992, Masson.

15-COTTERILL JM:

Condition of stiff great toe in adolescents.
Edinburgh Med. J. 1887; 33: 459-462.

16-CURVALE G:

Hallux rigidus.
Cahiers d'Enseignement de la SOFCOT n°54. Chirurgie de l'avant-pied. 1996.

17-DAVIES-COLLEY N:

Contraction of the metatarso-phalangeal joint of the great toe (hallux flexus).
Br. Med. J. 1887; 1: 728.

18-DAVIES GF:

Plantarflexory base wedge osteotomy in the treatment of functional and structural metatarsus primus elevatus.

Clin. Podiatr. Med Surg. 1989; 6: 93-102.

19-DAVIES MS, SAXBY TS:

Arthroscopy of the hallux metatarsophalangeal joint.

Foot Ankle Clin. 2000 Sep; 5(3): 715-24.

20-DEFRINO PF, BRODSKY JW, POLLO FE, CRENSHAW SJ,
BEISCHER AD:

First metatarsophalangeal arthrodesis: a clinical, pedobarographic and gait analysis study.

Foot Ankle Int. 2002 Jun; 23(6): 496-502.

21-DELAGOUTTE JP, BONNEL F:

Le Pied. Pathologie et techniques chirurgicales.

Masson, Paris, 1989.

22-DIEBOLD P:

Arthroscopie du pied et de la cheville.

Encycl Méd Chir (Elsevier, Paris), Podologie, 27-040-A-50, 1999, 7p.

23-DUCROQUET RJ, DUCROQUET P:

La marche et les boiteries. Étude des marches normales et pathologiques.

Masson, Paris, 1989

24-DUJARDIN F, WEBER J:

Anatomie et physiologie de la marche, des positions assises et debout.

Encycl Méd Chir (Elsevier, Paris), Appareil Locomoteur, 14-010-A-10, 1998, 16p.

25-EASLEY ME, DAVIS WH, ANDERSON RB:

Intermediate to long-term follow-up of medial approach dorsal cheilectomy for hallux rigidus.

Foot Ankle Int. 1999 Mar; 20(3): 147-52.

26-FEDERATIVE COMMITTEE ON ANATOMICAL TERMINOLOGY:

Terminologia Anatomica.

Stuttgart- New-York: Thieme (1998).

27-FELDMAN KA:

The Green-Watermann procedure: geometric analysis and preoperative radiographic template technique.

J. Foot Surg. 1992; 31: 182-185.

28-FELTHAM GT, HANKS SE, MARCUS RE:

Age-based outcomes of cheilectomy for the treatment of hallux rigidus.

Foot Ankle Int. 2001 Mar; 22(3): 192-7.

29-FITZGERALD JAW, WILKINSON JR:

Arthrodesis of the metatarsophalangeal joint of the great toe.

Clin. Orthop. 1981; 157: 70-77.

30-FREED JB:

The increasing recognition of medullary lysis, cortical osteophytic proliferation, and fragmentation of implanted silicone polymer implants.

J Foot Ankle Surg. 1993 Mar-Apr; 32(2): 171-9.

31-GRIGNON B, MAINARD D, HENNION D, ROLAND J:

Terminologie anatomique internationale des structures ostéo-articulaires et musculo-tendineuses du pied: mode d'emploi.

In: Imagerie du pied et de la cheville.

Monographie du GETROA 2002, n°29: 513-518.

32-GROULIER P, CURVALE G, PICLET-LEGRE B, KELBERINE F:

Arthrodèse de la première articulation métatarso-phalangienne.

Rev Chir Orthop 1994; 80(5): 436-44.

33-HADDAD SL:

The use of osteotomies in the treatment of hallux limitus and hallux rigidus.

Foot Ankle Clin. 200 Sep; 5(3): 629-61.

34-HAMILTON WG, HUBBARD CE:

Hallux rigidus. Excisional arthroplasty.

Foot Ankle Clin. 2000 Sep; 5(3): 663-71.

35-HANFT JR, MASON ET, LANDSMAN AS, KASHUK KB:

A new radiographic classification of hallux limitus.

J. Foot Ankle Surg. 1993; 32(4): 397-410.

- 36-HARRISSON MHM, HARVEY FJ:
Arthrodesis of the first metatarsophalangeal joint for hallux valgus and rigidus.
J.Bone Joint Surg. 1963; 45A: 471-480.
- 37-HATTRUP SJ, JOHNSON KA:
Subjective results of hallux rigidus following treatment with cheilectomy.
Clin. Orthop. 1988; 226: 182-191.
- 38-HELLER WA, BRAGE ME:
The effects of cheilectomy on dorsiflexion of the first metatarsophalangeal joint.
Foot Ankle Int. 1997 Dec; 18(12): 803-8.
- 39-HORTON GA, PARK YW, MYERSON MS:
Role of metatarsus primus elevatus in the pathogenesis of hallux rigidus.
Foot Ankle Int. 1999 Dec; 20(12): 777-80.
- 40-HUGHES J, CLARK P, KLENERMAN L:
The importance of the toes in walking.
J Bone Joint Surg 1990 Mar; 72-B: 245-251.
- 41-HULET H:
Étude des mécanismes d'adaptation fonctionnelle d'une douleur invalidante de l'articulation coxo-fémorale par l'analyse du mouvement.
Mémoire de DEA "Biomécanique et Biomatériaux" Option Orthopédie
Université de Rennes, 1995.
- 42-IQBAL MJ, CHANA GS:
Arthroscopic cheilectomy for hallux rigidus.
Arthroscopy. 1998 Apr; 14(3): 307-310.
- 43-JOHANSSON JE, BARRINGTON TW:
Cone arthrodesis of the first metatarsophalangeal joint.
Foot Ankle. 1984 Mar-Apr; 4(5): 244-8.
- 44-JOSEPH J:
Range of motion of the great toe in men.
J. Bone Joint Surg. 1954 Aug; 36B: 450-457.
- 45-KAMINA P, FRANCKE JP:
Anatomie- Arthrologie des membres. Description et fonction.
Éd Maloine, Paris, 1988.

46-KARASICK D, WAPNER KL:

Hallux rigidus deformity: radiologic assessment.

AJR 1991 Nov; 157(5): 1029-33.

47-KURTZ DH, HARRILL JC, KACZANDER BI, SOLOMON MG:

The Valenti procedure for hallux limitus: a long-term follow-up and analysis.

J Foot Ankle Surg. 1999 Mar-Apr; 38(2): 123-30.

48-LACANT G, DENIS A:

Hallux rigidus et ostéochondrite de la tête du premier métatarsien.

Méd. Chir. Pied 1986; 6: 21-23.

49-LAMBRINUDI C:

Metatarsus primus elevatus.

Proc. R. Soc. Med. 1938; 31: 1273.

50-LAU JT, DANIELS TR:

Outcomes following cheilectomy and interpositional arthroplasty in hallux rigidus.

Foot Ankle Int. 2001 Jun; 22(6): 462-70.

51-LIPSCOMB PR:

Arthrodesis of the first metatarso-phalangeal joint for severe bunions on hallux rigidus.

Clin. Orthop. 1979; 142: 48-54.

52-LOMBARDI CM, SILHANEK AD, CONNOLY FG, DENIS LN:

The effect of first metatarsophalangeal joint arthrodesis on the first ray and the medial longitudinal arch: a radiographic study.

J Foot Ankle Surg 2002 Mar-Apr; 41(2): 96-103.

53-LOMBARDI CM, SILHANEK AD, CONNOLY FG, DENIS LN, KESLONSKY AJ:

First metatarsophalangeal arthrodesis for treatment of hallux rigidus: a retrospective study.

J Foot Ankle Surg. 2001 May-Jun; 40(3): 137-43.

54-MAESTRO M, AUGOYARD M, BAROUK LS, BENICHO M, PEROT J, RAGUSA M, VALTIN B:

Biomécanique et repères radiologiques du sésamoïde latéral de l'hallux par rapport à la palette métatarsienne.

Méd. Chir.Pied 1995; 11(3): 145-54.

55-MAESTRO M, AUGOYARD M, PEYROT J, VALTIN B, RAGUSA M, BÉNICHOU M, BAROUK S:

Arthrodèse de la première articulation métatarso-phalangienne. Ostéosynthèse au titane pur T40.

Méd. Chir. Pied 1997; 1: 41-49.

56-MANN RA:

Disorders of the first metatarsophalangeal joint.

J Am Acad Orthop Surg. 1995 Jan; 3(1): 34-43.

57-MANN RA:

Intermediate to long-term follow-up of medial approach dorsal cheilectomy for hallux rigidus.

Foot Ankle Int. 2000 Feb; 21(2): 156.

58-MANN RA, CLANTON TO:

Hallux rigidus: treatment by cheilectomy.

J Bone Joint Surg. 1988 Mar; 70-A: 400-6.

59-MAZAS Y:

Historique et étude critique de l'exploration instrumentale de la marche en pratique clinique.

In: Podologie 2001. Paris, Expansion Scientifique Française: 7-17.

60-McKEEVER DC:

Arthrodesis of the first metatarsophalangeal joint for hallux valgus, hallux rigidus and metatarsus primus varus.

J. Bone Joint Surg. 1952; 32A: 129-134.

61-McMASTER MJ:

The pathogenesis of hallux rigidus.

J. Bone Joint Surg. 1978 Feb; 60-B: 82-7.

62-MEYER JO, NISHON LR, WEISS L, DOCKS G:

Metatarsus primus elevatus and the etiology of hallux rigidus.

J. Foot Surg. 1987; 26: 237-241.

63-MOYNIHAN FJ:

Arthrodesis of the metatarsophalangeal joint of the great toe.

J. Bone Joint Surg. 1967; 49B: 544-551.

64-MYERSON MS, SCHON LC, McGUIGAN FX, OZNUR A:

Result of arthrodesis of the hallux metatarsophalangeal joint using bone graft for restauration of length.

Foot Ankle Int. 2000 Apr; 21(4): 297-306.

65-NICOLADONI C:

Über Zehenkontrakturen.

Wiener Klin. Wochenschrift 1881; 51: 1418-1419.

66-O'DOHERTY DP, LOWRIE IG, MAGNUSSEN PA, GREGG PJ:

The management of the painful first metatarsophalangeal joint in the older patient. Arthrodesis or Keller's arthroplasty.

J. Bone Joint Surg. 1990; 72-B: 839-842.

67-OLMS K, DIETZE A:

Replacement arthroplasty for hallux rigidus. 21 patients with a 2-year follow-up.

Int. Orthop. 1999; 23(4): 240-3.

68-PLAS F, VIEL E, BLANC Y:

La marche humaine. Kinésiologie dynamique, biomécanique et pathomécanique.

Monographie de Bois-Larris, 4^e édition, Paris, Masson, 1989.

69-RÉGNAULT B:

Le pied.

Paris, Springer-Verlag, 1986.

70-RONCONI P, MONACHINO P, BALEANU PM, FAVILLI G:

Distal oblique osteotomy of the first metatarsal for the correction of hallux limitus and rigidus deformity.

J Foot Ankle Surg. 2000 May-Jun; 39(3): 154-60.

71-ROUVIÈRE H:

Anatomie humaine, tome 3, 12^e édition, Paris, Masson.

72-SCHWEITZER ME, MAHESHWARI S, SHABSHIN N:

Hallux valgus and hallux rigidus: MRI findings.

Clinical Imaging 1999; 23(6): 397-402.

73-SELVA O:

Variabilité inter-individuelle de la cinématique coxo-fémorale au cours de la marche normale.

Mémoire de DEA "Biomécanique et Biomatériaux" Option Orthopédie

Université de Rennes, 1995.

74-SHANKAR NS:

Silastic single-term implants in the treatment of hallux rigidus.

Foot Ankle Int. 1995 Aug; 16(8): 487-91.

75-SHEREFF MJ, BAUMHAUER JF:

Hallux rigidus and osteoarthritis of the first metatarsophalangeal joint.

J Bone Joint Surg. 1998 Jun; 80(6): 898-908.

76-SHEREFF MJ, BEJJANI FJ, KUMMER FJ:

Kinematics of the first metatarsophalangeal joint.

J Bone Joint Surg. 1986 March; 68-A: 392-8.

77-SMITH RW, KATCHIS SD, AYSON LC:

Outcomes in hallux rigidus patients treated nonoperatively: a long-term follow-up study.

Foot Ankle Int. 2000 Nov; 21(11): 906-13.

78-SWANSON AB:

Implant arthroplasty in disabilities of the great toe.

Instr. Course Lect. 1972; 21: 227-235.

79-SWANSON AB:

Silastic single-term implants in the treatment of hallux rigidus.

Foot Ankle Int. 1995 Dec; 16(12): 809.

80-THOMAS PJ, SMITH RW:

Proximal phalanx osteotomy for the surgical treatment of hallux rigidus.

Foot Ankle Int. 1999 Jan; 20(1): 3-12.

81-TOMÉNO B, KADDEM SE:

L'arthrodèse métatarso-phalangienne du gros orteil. Réflexion à propos de 93 interventions.

Rev. Chir. Orthop. 1982; 68: 379-384.

82-TOURNE Y, LEROY JM, MAIRE JP, SARAGAGLIA D:

L'arthrodèse du premier rayon dans la chirurgie du gros orteil. À propos de 62 cas.

In HÉRISSON C, SIMON L: Actualités en Médecine et Chirurgie du pied. 8^e série. 1993, Masson.

83-TOWNLEY CO, TARANOW WS:

A metallic hemiarthroplasty resurfacing prosthesis for the hallux metatarsophalangeal joint.

Foot Ankle Int. 1994 Nov; 15(11): 575-80.

84-TRANTALIS JJ:

The role of cheilectomy in the treatment of hallux rigidus.

J Foot Ankle Surg. 1998 Mar-Apr; 37(2): 171.

85-TRNKA HJ:

Arthrodesis procedures for salvage of the hallux metatarsophalangeal joint.

Foot Ankle Int. 2000 Sep; 5(3): 673-86.

86-UCHAN JL, WEISS C:

Conduite médico-chirurgicale à tenir devant un hallux rigidus.

In: Podologie 2001. Paris, Expansion Scientifique Française: 31-34.

87-VAN DIJK CN, VEENSTRA KM, NUESCH BC:

Arthroscopic surgery of the metatarsophalangeal first joint.

Arthroscopy. 1998 Nov-Dec; 14(8): 851-5.

88-VIEL E:

La marche humaine, la course et le saut.

Collection Le point en rééducation et en APS. 2000. Éditions MASSON.

89-VILADOT A:

Pathologie de l'avant-pied.

Expansion Scientifique Française. 1979.



90-WEINFELD SB, SCHON LC:
Hallux metatarsophalangeal arthritis.
Clin Orthop. 1998 Apr; 349: 9-19.

91-WILSON JN:
Cone arthrodesis of the first metatarsophalangeal joint.
J Bone Joint Surg. 1967 Feb; 49(1): 98-101.

92-WU KK:
Arthrodesis of the metatarsophalangeal joint of the great toe with Herbert
screws: a clinical analysis of 27 cases.
J Foot Ankle Surg. 1993 Jan-Feb; 32(1): 47-52.

93-WÜLKER N, RUDERT M:
Hallux rigidus.
Foot Ankle Surg. 1999; 5(2): 61-71.

94-ZOLLINGER H, JACOB H:
Forces in the fore foot during walking and their clinical relevance.
Biomechanical aspect of fore foot surgery.
Symposium SICOT, Amsterdam, 1996.

Nom	Sexe	Âge	Taille (en m)	Poids (en kg)	Côté	Délai
COS	M	77 ans	1,64	71,00	D	26 mois
COU	F	50 ans	1,52	50,60	D	43 mois
DUS	F	66 ans	1,56	85,30	D	16 mois
MON	F	65 ans	1,52	55,70	D	31 mois
PIN	M	72 ans	1,62	86,10	D	39 mois
CLO	F	51 ans	1,60	67,60	G	21 mois
SAB	F	51 ans	1,48	56,10	G	14 mois
SAR	F	64 ans	1,54	52,30	G	9 mois
SEI	F	64 ans	1,62	69,60	G	38 mois
COS	M	77 ans	1,64	71,00	D	26 mois
COU	F	50 ans	1,52	50,60	D	43 mois
DIÉ	F	53 ans	1,60	71,00	G	51 mois
					D	34 mois
DOL	F	53 ans	1,55	60,40	G	23 mois
					D	41 mois
DUS	F	66 ans	1,56	85,30	D	16 mois
HOU	F	59 ans	1,57	53,40	G	63 mois
					D	31 mois
MON	F	65 ans	1,52	55,70	D	31 mois
PIN	M	72 ans	1,62	86,10	D	39 mois
SAB	F	51 ans	1,48	56,10	G	14 mois
SAR	F	64 ans	1,54	52,30	G	9 mois
SEI	F	64 ans	1,62	69,60	G	38 mois

Tableau n°1: Caractéristiques générales des patients et
délai entre l'intervention chirurgicale
et l'examen optoélectronique

Patient	Côté	Douleur	Fonction	Alignement	Scores pré- et post- opératoires	Gain
COS	D	0 / 30	29 / 35	15 / 15	44 / 80	31
COU	D	0 / 40	25 / 35	8 / 15	33 / 90	52
DUS	D	0 / 40	24 / 32	15 / 15	39 / 87	48
MON	D	0 / 40	19 / 30	15 / 15	34 / 85	51
PIN	D	0 / 40	32 / 35	15 / 15	42 / 90	48
CLO	G	0 / 40	24 / 30	15 / 15	39 / 85	46
SAB	G	0 / 30	15 / 27	15 / 15	30 / 72	42
SAR	G	0 / 40	24 / 32	0 / 15	24 / 87	63
SEI	G	0 / 30	19 / 32	15 / 15	34 / 67	33
DIÉ	G	0 / 40	19 / 32	15 / 15	34 / 87	53
	D	0 / 30	29 / 32	15 / 15	44 / 77	33
DOL	G	0 / 40	15 / 30	15 / 15	30 / 85	50
	D	0 / 40	19 / 30	15 / 15	34 / 85	51
HOU	G	0 / 30	19 / 27	0 / 15	19 / 72	53
	D	0 / 40	19 / 27	0 / 15	19 / 82	63

Tableau n°2: Scores de l'AOFAS pré- et post-opératoires

Patient	Côté	Arthrose	Ligne de Maestro	Formule pré-opératoire	Formule post-opératoire	Index pré-opératoire	Index post-opératoire
COS	D	H3 R2	Aval	Égyptien	Carré	Plus Minus	Minus
COU	D	H3 R3	Centre	Grec	Grec	Minus	Minus
DUS	D	H3 R2	Amont	Égyptien	Carré	Plus	Plus
MON	D	H3 R2	Amont	Carré	Carré	Minus	Minus
PIN	D	H2 R2	Centre	Égyptien	Égyptien	Plus	Plus Minus
CLO	G	H3 R2	Aval	Égyptien	Carré	Plus	Plus
SAB	G	H3 R2	Aval	Carré	Grec	Plus Minus	Minus
SAR	G	H3 R2	Amont	Égyptien	Grec	Minus	Minus
SEI	G	H3 R2	Centre	Égyptien	Grec	Minus	Minus
DIÉ	G	H3 R2	Aval	Égyptien	Carré	Plus Minus	Minus
	D	H3 R2	Aval	Égyptien	Carré	Plus Minus	Minus
DOL	G	H3 R2	Amont	Égyptien	Égyptien	Minus	Minus
	D	H3 R2	Centre	Égyptien	Carré	Minus	Minus
HOU	G	H3 R2	Aval	Égyptien	Égyptien	Plus	Plus Minus
	D	H3 R2	Aval	Égyptien	Égyptien	Plus	Plus Minus

Tableau n°3: Bilan radiologique 1

Patient	Côté	Angle MP	Angle MV	Angle oméga	Angle M1 au sol	Angle de Djian-Annonier	Angle MP de profil
COS	D	12°/8°	6°/6°	18°/20°	21°/20°	114°/116°	12°
COU	D	0°/10°	6°/7°	22°/23°	21°/22°	110°/110°	26°
DUS	D	12°/16°	10°/10°	18°/18°	18°/19°	116°/118°	4°
MON	D	22°/13°	9°/8°	18°/20°	19°/19°	138°/138°	10°
PIN	D	16°/7°	8°/8°	26°/26°	22°/24°	150°/152°	26°
CLO	G	16°/8°	8°/9°	28°/30°	21°/22°	110°/110°	18°
SAB	G	22°/20°	8°/8°	20°/23°	21°/22°	120°/124°	12°
SAR	G	4°/4°	10°/10°	28°/28°	18°/18°	126°/125°	15°
SEI	G	8°/13°	10°/10°	20°/22°	22°/22°	118°/119°	8°
DIÉ	G	9°/8°	9°/8°	25°/24°	24°/26°	110°/109°	12°
	D	10°/15°	9°/10°	26°/26°	24°/25°	110°/110°	8°
DOL	G	16°/17°	16°/18°	30°/30°	21°/22°	120°/122°	8°
	D	12°/4°	10°/9°	26°/25°	20°/22°	120°/125°	20°
HOU	G	4°var/22°	4°/6°	26°/27°	30°/32°	110°/110°	30°
	D	10°var/16°	6°/8°	26°/28°	31°/32°	106°/106°	45°

Tableau n°4: Bilan radiologique 2

Patient	Côté	Vitesse	Longueur	Cadence	Durée de la phase d'appui	Durée du simple appui	Durée du double appui
COS	G	0,97	1,16	100,2	0,76	0,43	0,33
	D*	0,97	1,18	98,35	0,76	0,44	0,32
COU	G	1,38	1,315	126,5	0,715	0,39	0,325
	D*	1,39	1,32	126,5	0,56	0,35	0,21
DUS	G	0,825	0,94	105,5	0,73	0,4	0,33
	D*	0,79	0,92	103	0,76	0,41	0,35
MON	G	1,195	1,195	120	0,63	0,36	0,27
	D*	1,09	1,12	116,5	0,66	0,39	0,27
PIN	G	1,09	1,235	106	0,73	0,44	0,29
	D*	1,1	1,255	105	0,72	0,41	0,31
CLO	G*	1,165	1,2	116,5	0,64	0,4	0,24
	D	1,18	1,2	118	0,63	0,36	0,27
SAB	G*	1,125	1,22	107	0,64	0,41	0,23
	D	1,09	1,22	111	0,69	0,41	0,28
SAR	G*	1,15	1,1	123,5	0,58	0,37	0,21
	D	1,145	1,1	125	0,6	0,38	0,22
SEI	G*	1,12	1,13	119	0,65	0,38	0,27
	D	1,17	1,145	123	0,61	0,37	0,24
DIÉ	G*	1,31	1,375	114,5	0,64	0,4	0,24
	D*	1,265	1,33	114	0,66	0,42	0,24
DOL	G*	1,095	1,11	119	0,62	0,39	0,23
	D*	1,06	1,09	116,5	0,63	0,41	0,22
HOU	G*	1,275	1,215	126,5	0,56	0,38	0,18
	D*	1,275	1,215	126	0,57	0,39	0,18

Tableau n°5: Paramètres de la marche

Patient	Côté	Flexion plantaire maximale	Flexion dorsale maximale	Moyenne	Écart-type	Angle de cheville au TOE-OFF
COS	G	111,95°	77,05°	95,5°	8,83°	84,8°
	D*	110,4°	82,85°	95,1°	7,04°	86,75°
COU	G	103,05°	59,55°	89,5°	11,26°	75,3°
	D*	109,65°	77,85°	96,25°	8,47°	80,05°
DUS	G	111,4°	79°	95,35°	6,31°	97,05°
	D*	110,1°	86,3°	98,25°	5,88°	96,05°
MON	G	106,6°	71,5°	92,05°	14,39°	81,95°
	D*	107,75°	77,5°	92,4°	8,3°	82,85°
PIN	G	109,7°	81,35°	96,25°	7,77°	88,85°
	D*	112,7°	89,8°	99,75°	5,82°	90,95°
CLO	G*	95,65°	72,95°	85,6°	6°	78,6°
	D	95,6°	73,55°	87,35°	5,8°	78°
SAB	G*	100,15°	74,2°	91,3°	5,81°	77,4°
	D	103,45°	70,95°	90,6°	7,75°	76,85°
SAR	G*	105,05°	79,05°	93,45°	7,06°	79,6°
	D	105,55°	75,65°	92,6°	7,725°	79,35°
SEI	G*	107,45°	81,9°	93,7°	6,95°	86,7°
	D	105,9°	79,05°	94,2°	7,1°	87,1°
DIÉ	G*	102,95°	70,05°	92,45°	8,45°	73,85°
	D*	102,5°	68°	90,75°	8,15°	74,75°
DOL	G*	105,75°	79,55°	95,7°	6,97°	85,55°
	D*	106,3°	74,75°	94,2°	7,43°	85,05°
HOU	G*	97,5°	71,25°	87,4°	7,85°	74,2°
	D*	95,95°	70,9°	86,15°	6,54°	77,3°

Tableau n°6: Amplitudes de cheville

Patient	Côté	F1	F2	F3	F4
COS	G	-110,5	104	33,5	36
	D*	-92,5	74,5	38	31,5
COU	G	-124,5	127,5	30,5	34
	D*	-110	124,5	41	19,5
DUS	G	-94	107,5	24	62,5
	D*	-108	95,5	58,5	13
MON	G	-82	81,5	21,25	23,25
	D*	-84	47	28,45	17,9
PIN	G	-125,5	148	24,5	60,5
	D*	-116,5	138,5	26	66,5
CLO	G*	-99	108,5	31,5	46
	D	-109,5	111,5	44	27,5
SAB	G*	-76,5	94,5	11,9	30,55
	D	-79	102,5	31,9	12,05
SAR	G*	-72,5	90,5	9,05	28,7
	D	-73	97	27,65	14,45
SEI	G*	-86	108,5	46,65	6,35
	D	-79	133,5	23,9	28,7
DIÉ	G*	-127,5	163,5	22	19,15
	D*	-158	142	38	26
DOL	G*	-87	100	21,9	42,2
	D*	-79,5	92,5	38,8	10,45
HOU	G*	-82	103,5	14,8	31,2
	D*	-92	104,5	29,45	16,85

Tableau n°7: Forces de réaction du sol 1

Patient	Côté	F5	F6	F7
COS	G	-697	-600	-708,5
	D*	-700,5	-610	-670
COU	G	-650,5	-268,5	-623,5
	D*	-599,5	-267	-595,5
DUS	G	-850,5	-717,5	-824,5
	D*	-798,5	-764,5	-788,5
MON	G	-546,5	-411	-576,5
	D*	-532	-447,5	-551,5
PIN	G	-895,5	-621	-869
	D*	-880,5	-635,5	-871
CLO	G*	-654	-538	-707
	D	-700	-519	-689
SAB	G*	-564,5	-431	-617,5
	D	-557	-438	-622
SAR	G*	-518	-403	-523
	D	-530,5	-409	-565,5
SEI	G*	-686,5	-507,5	-696,5
	D	-679	-521,5	-714
DIÉ	G*	-715	-537	-706
	D*	-779	-488	-763
DOL	G*	-589,5	-504	-619
	D*	-578	-500,5	-647,5
HOU	G*	-590	-406	-567
	D*	-617,5	-382	-582

Tableau n°8: Forces de réaction du sol 2

Patient	Côté	Durée phase d'amortissement (en % durée de phase d'appui)	Différence	Durée phase d'amortissement (en % durée de phase d'appui)
COS	G	44,32%	4,40%	55,68%
	D*	48,72%		51,28%
COU	G	54,43%	-6,16%	45,57%
	D*	48,27%		51,73%
DUS	G	52,78%	-1,50%	47,12%
	D*	51,28%		48,72%
MON	G	47,68%	0,76%	52,32%
	D*	48,44%		51,56%
PIN	G	49,40%	1,99%	50,60%
	D*	51,39%		48,61%
CLO	G*	57,54%	0,19%	42,46%
	D	57,35%		42,65%
SAB	G*	56,73%	0,22%	43,27%
	D	56,51%		43,49%
SAR	G*	56,91%	3,64%	43,09%
	D	53,27%		46,73%
SEI	G*	56,70%	0,24%	43,30%
	D	56,46%		43,54%
DIÉ	G*	53,02%		46,98%
	D*	54,41%		45,59%
DOL	G*	55,54%		44,46%
	D*	53,03%		46,97%
HOU	G*	54,25%		45,75%
	D*	55,92%		44,08%

Tableau n°9: Durée des phases d'appui secondaires

Patient	Côté	Pic de propulsion	Durée de phase d'appui	Pic de propulsion (en % de phase d'appui)
COS	G	670	790	84,81%
	D*	670	780	85,89%
COU	G	510	570	89,47%
	D*	490	580	84,48%
DUS	G	630	760	82,89%
	D*	670	780	85,90%
MON	G	550	630	87,30%
	D*	580	680	85,29%
PIN	G	620	730	84,93%
	D*	590	720	81,94%
CLO	G*	540	660	81,81%
	D	570	680	83,82%
SAB	G*	560	670	83,58%
	D	570	690	82,60%
SAR	G*	500	580	86,20%
	D	500	600	83,33%
SEI	G*	560	690	81,15%
	D	530	620	85,48%
DIÉ	G*	540	660	81,81%
	D*	570	680	83,82%
DOL	G*	540	630	85,71%
	D*	560	660	84,85%
HOU	G*	500	590	84,74%
	D*	500	590	84,74%

Tableau n°10: Pics de propulsion

Patient	Côté	Passage de FDR en avant de TOE	Durée de phase d'appui	% de phase d'appui
COS	G	560	760	73,70%
	D*	640	740	86,49%
COU	G	400	580	68,96%
	D*	340	580	58,62%
DUS	G	720	800	90%
	D*	720	780	92,31%
MON	G	440	640	68,75%
	D*	460	900	51,11%
PIN	G	720	760	94,74%
	D*	600	720	83,33%
CLO	G*	400	680	58,82%
	D	340	680	50%
SAB	G*	320	660	48,48%
	D	360	700	51,43%
SAR	G*	320	560	57,14%
	D	360	620	58,06%
SEI	G*	400	660	60,61%
	D	320	600	53,33%
DIÉ	G*	600	920	65,22%
	D*	380	680	55,88%
DOL	G*	380	620	61,29%
	D*	540	660	81,82%
HOU	G*	560	580	96,55%
	D*	540	600	90%

Tableau n°11: Passage de la force de réaction du sol
en avant de la mire TOE

Patient	Moyenne	Écart-type	Valeur positive maximale	Valeur négative maximale
COS	-3,04	6,49	9,5	19,7
COU	2,63	4,84	10,5	6,6
DUS	-5,65	2,94	4	11,1
MON	3,75	5,19	12,5	6,2
PIN	-0,375	1,72	3,9	4,4
CLO	1,425	3,93	11	8,7
SAB	-6,2	3,96	3,4	14,4
SAR	1,45	2,61	7,5	3,2
SEI	-0,15	2,66	6,3	6,6
MOY _{pat}	-0,68	3,81		
DIÉ	-2,55	2,8	2,9	7,7
DOL	0,375	4,125	8,1	7,1
HOU	-1,5	6,31	8,7	12,9
MOY _{pat}	-1,23	4,41		

Tableau n°12: Dissociation des ceintures pelvienne et scapulaire

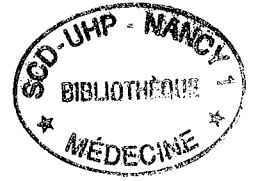
Patient	Côté	Décollement du talon (en % de phase d'appui)	Différence
COS	G	49,49%	14,39%
	D*	63,88%	
COU	G	52,65%	0,35%
	D*	53%	
DUS	G	55,14%	25,63%
	D*	80,77%	
MON	G	57,11%	13,46%
	D*	70,57%	
PIN	G	61,70%	2,19%
	D*	63,89%	
CLO	G*	57,75%	1,87%
	D	55,88%	
SAB	G*	56,73%	1,73%
	D	55%	
SAR	G*	56,91%	3,52%
	D	53,39%	
SEI	G*	59,60%	4,70%
	D	54,90%	
DIÉ	G*	50,00%	2,94%
	D*	52,94%	
DOL	G*	52,37%	0,66%
	D*	53,03%	
HOU	G*	49,14%	1,84%
	D*	50,98%	

Tableau n°13: Décollement du talon

Patient	Côté	Distance TOE-FIN minimale	Distance TOE-FIN maximale	Différence
COS	G	44,98	66,14	21,16
	D*	28,28	57,01	28,73
COU	G	34,8	55,05	20,25
	D*	21,74	54,98	33,24
DUS	G	22,53	48,28	25,75
	D*	19,74	45,7	25,96
MON	G	44,26	72,04	27,78
	D*	39,91	71,23	31,32
PIN	G	38,06	67,86	29,8
	D*	32,5	72,9	40,4
CLO	G*	51,66	82,1	30,44
	D	58,41	85,88	27,47
SAB	G*	46,19	65,6	19,41
	D	48,93	68,5	19,57
SAR	G*	29,56	67,5	37,94
	D	38,51	74,52	36,01
SEI	G*	22,03	62,96	40,93
	D	31,91	66,05	34,14
DIÉ	G*	22,29	67,45	45,16
	D*	26,76	64,89	38,13
DOL	G*	24,37	64,67	40,3
	D*	15,55	58,67	43,12
HOU	G*	22,36	50,52	28,16
	D*	29,69	52,27	22,58

Tableau n°14: Distance entre les mires TOE et FIN

TABLE DES MATIÈRES



SOMMAIRE	p.17
INTRODUCTION	p.18
ANATOMIE DE L'ARTICULATION MÉTA-TARSO-PHALANGIENNE DE L'HALLUX	p.19
A-Anatomie descriptive	p.19
<u>1-Généralités</u>	p.19
<u>2-Anatomie du premier métatarsien</u>	p.21
<u>3-Anatomie de la première phalange</u>	p.23
<u>4-Anatomie des os sésamoïdes</u>	p.23
<u>5-Innervation</u>	p.24
5.1-Innervation motrice	p.24
5.1.1-Face plantaire du pied	p.24
5.1.2-Face dorsale du pied	p.24
5.2-Innervation sensitive	p.24
<u>6-Vascularisation</u>	p.25
6.1-Artère plantaire latérale	p.28
6.2-Artère plantaire médiale	p.29
6.3-Interosseuse dorsale du premier espace	p.29

B-Anatomie fonctionnelle	p.29
BIOMÉCANIQUE	p.31
A-Notions de biomécanique	p.31
<u>1-Cinématique</u>	p.31
<u>2-Cinétique</u>	p.31
2.1-Forces	p.32
2.2-Moments	p.33
2.3-Équilibres statique et dynamique	p.34
2.4-Force de réaction du sol	p.35
B-Biomécanique de l'articulation métatarso-phalangienne de l'hallux	p.37
<u>1-Centres instantanés de rotation</u>	p.37
<u>2-Déplacement de la surface de l'articulation</u>	p.38
ÉTUDE DE LA MARCHE NORMALE	p.39
A-Historique	p.39
B-Le laboratoire de la marche	p.41

<u>1-Système d'analyse du mouvement en trois dimensions</u>	p.41
<u>2-Les plates-formes de force</u>	p.42
<u>3-La chaîne d'enregistrement vidéographique</u>	p.43
<u>4-Le dispositif d'électromyographie</u>	p.43

C-Déroulement du cycle de la marche p.44

<u>1-Initiation du pas</u>	p.45
<u>2-Première phase: la phase d'appui (ou Stand Phase)</u>	p.47
2.1-Temps de double appui antérieur de réception	p.47
2.2-Temps d'appui unilatéral	p.48
<u>3-Deuxième phase: la phase oscillante (ou Swing Phase)</u>	p.49
3.1-Temps de double appui postérieur d'élan	p.50
3.2-Phase oscillante propre	p.51

D-Activités musculaires durant le cycle de la marche p.52

<u>1-Généralités</u>	p.52
1.1-Freinage des segments de membre	p.52
1.2-Amortissement des chocs et des vibrations	p.53
1.3-Accélération des segments de membre	p.53
1.4-Équilibration	p.53

<u>2-Action des muscles lors du cycle de la marche</u>	p.53
2.1-Généralités	p.53
2.2-Électromyographie télémétrée	p.54
2.2.1-Contact au sol et choc du talon	p.55
2.2.2-Équilibre sur un seul pied	p.56
2.2.3-Séparation du pied avec le sol	p.57
2.2.4-Passage du pied libre en avant	p.57

E-Le pied lors de la marche p.58

<u>1-Rôle de chacune des parties du pied au cours de la marche</u>	p.58
<u>2-Déroulement du pied au sol</u>	p.59
<u>3-Déformation de la voûte plantaire pendant la marche</u>	p.60

F-Facteurs influençant le déplacement du centre de gravité p.61

<u>1-Rotation du bassin autour de l'axe vertical</u>	p.62
<u>2-Bascule du bassin du côté non porteur</u>	p.62
<u>3-Flexion du genou pendant l'appui</u>	p.62
<u>4-Mouvements du pied et de la cheville</u>	p.62
<u>5-Coordination des mouvements du genou et de la cheville</u>	p.63
<u>6-Déplacement latéral du bassin</u>	p.63
<u>7-Rotation opposée des deux ceintures</u>	p.63
<u>8-Mouvements des membres supérieurs</u>	p.64

G-La marche rapide p.64

H-Montée et descente des pentes et escaliers p.65

DESCRIPTION DES TECHNIQUES CHIRURGICALES p.66

A-Technique utilisée dans le service p.67

B-Autres techniques d'arthrodèse p.70

1-Arthrodèse à l'aide d'agrafes et de clous p.70

2-Arthrodèse par plaque et greffon iliaque et
cortico-spongieux p.71

3-Arthrodèse par vissage et plaque p.71

4-Arthrodèse par deux broches croisées p.72

5-Arthrodèse en cône p.72

6-Arthrodèse par fixateur externe p.72

7-Arthrodèse selon la technique de Brockman p.73

C-Alternatives à l'arthrodèse p.74

1-Traitement médical p.74

<u>2-Traitement chirurgical conservateur</u>	p.74
2.1-Techniques à visée biomécanique	p.74
2.1.1-Ostéotomie de raccourcissement phalangien	p.74
2.1.2-Ostéotomie d'extension phalangienne	p.75
2.1.3-Ostéotomie du premier métatarsien	p.75
2.2-Ablation des ostéophytes	p.75
<u>3-Traitement chirurgical radical</u>	p.76
3.1-Résections arthroplastiques	p.76
3.1.1-Intervention de Keller-Brandes	p.76
3.1.2-Intervention de Valenti	p.76
3.1.3-Diastasis et arthroplastie	p.76
3.1.4-Arthroplastie au muscle plantaire	p.76
3.2-Arthroplasties prothétiques	p.77
3.2.1-Prothèses en élastomères de silicone	p.77
3.2.2-Prothèses totales à glissement	p.77

INDICATIONS D'ARTHRODÈSE MÉTA-TARSO-PHALANGIENNE DE L'HALLUX

p.78

A-Généralités

p.78

B-Hallux rigidus

p.78

<u>1-Épidémiologie</u>	p.79
<u>2-Étiologies</u>	p.79
2.1-Hallux rigidus primitif	p.79
2.2-Échecs d'une chirurgie antérieure	p.80
2.3-Autres étiologies	p.80
<u>3-Clinique</u>	p.80

C-Autres indications	p.82
-----------------------------	------

MATÉRIEL ET MÉTHODES p.83

A-Patients	p.83
-------------------	------

<u>1-Critères d'inclusion</u>	p.83
<u>2-Âge</u>	p.83
<u>3-Sexe</u>	p.84
<u>4-Côté</u>	p.84
<u>5-Profession</u>	p.84
<u>6-Activité sportive</u>	p.84
<u>7-Étiologies</u>	p.84
<u>8-Délai de consolidation</u>	p.85
<u>9-Délai entre l'arthrodèse et l'étude de la marche</u>	p.85

B-Bilan clinique: Cotation de l'AOFAS	p.85
--	------

C-Bilan radiologique p.88

1-Clichés de pied de face en charge p.88

1.1-Le degré d'arthrose p.88

1.2-L'angle MP p.89

1.3-L'angle MV p.89

1.4-L'angle oméga p.90

1.5-La ligne de Maestro p.90

1.6-La courbe ou parabole de Lelièvre p.90

2-Clichés de pied de profil en charge p.91

2.1-Angle d'attaque de M1 au sol p.91

2.2-Angle de Djian-Annonier p.92

2.3-Angle métatarso-phalangien p.92

D-Protocole de l'étude de la marche en opto- électronique p.93

1-Déroulement de l'enregistrement p.93

2-Les paramètres du cycle de la marche p.93

2.1-Généralités p.93

2.2-Paramètres généraux du cycle de la marche p.97

2.2.1-Vitesse de marche p.97

2.2.2-Longueur du cycle p.98

2.2.3-Cadence p.98

2.2.4-Durée du cycle p.98

2.2.5-Durée de l'appui p.98

2.2.6-Durée du simple appui	p.99
2.2.7-Durée du double appui	p.99
2.3-Autres paramètres	p.99
2.3.1-Valeurs cinétiques et cinématiques	p.100
2.3.1.1-Pelvis	p.100
2.3.1.2-Hanche	p.103
2.3.1.3-Genou	p.103
2.3.1.4-Cheville	p.104
2.3.2-Forces de réaction du sol	p.104
<u>3-Autres données de l'étude de la marche</u>	p.106

E-Analyse statistique des résultats	p.108
--	-------

RÉSULTATS	p.109
------------------	-------

A-Bilan clinique	p.109
-------------------------	-------

<u>1-Bilan clinique pré-opératoire</u>	p.109
<u>2-Bilan clinique post-opératoire</u>	p.110
<u>3-Synthèse</u>	p.110

B-Bilan radiologique	p.112
-----------------------------	-------

<u>1-Bilan radiologique pré-opératoire</u>	p.112
<u>2-Bilan radiologique post-opératoire</u>	p.113
<u>3-Synthèse</u>	p.115

C-Analyse de la marche par le système

opto-électronique p.117

1-Étude des paramètres généraux de la marche p.117

2-Étude des valeurs cinétiques et cinématiques p.118

3-Étude des variations de la force de réaction du sol p.118

4-Existe-t'il des perturbations au niveau des ceintures
pelvienne et scapulaire? p.119

5-À quel moment s'effectue le décollement du talon? p.119

6-Existe-t'il une mobilité interphalangienne accrue du
côté arthrodésé? p.119

6-Existe-t'il des modifications de la marche lors de la
montée et la descente des escaliers? p.120

DISCUSSION p.122

A-Résultats cliniques p.123

B-Résultats radiologiques p.126

1-Le degré du valgus métatarso-phalangien p.126

2-Le degré de la dorsiflexion métatarso-phalangienne p.127

3-L'existence d'un metatarsus primus elevatus p.127

4-Alternatives à l'exploration radiologique standard p.128

C-Résultats de l'étude optoélectronique	p.129
CONCLUSION	p.134
BIBLIOGRAPHIE	p.136
TABLEAUX	p.147
TABLE DES MATIÈRES	p.161
ANNEXE 1: LISTE DES ILLUSTRATIONS	p.172
ANNEXE 2: LISTE DES TABLEAUX	p.174



LISTE DES ILLUSTRATIONS

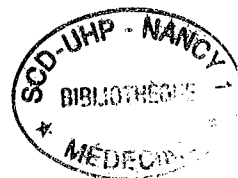
Fig.1-Système gléno-sésamoïdien	p.20
Fig.2-Systèmes trabéculaires du premier métatarsien	p.22
Fig.3-Aires sensibles du pied	p.25
Fig.4-Vascularisation de la face dorsale du pied	p.26
Fig.5-Vascularisation de la face plantaire du pied	p.27
Fig.6-Représentation graphique du moment d'une force	p.34
Fig.7-Force de réaction du sol	p.35
Fig.8-Les divisions du cycle de la marche	p.45
Fig.9-La phase d'appui	p.47
Fig.10-La phase oscillante	p.50
Fig.11-Chronométrie d'action des muscles selon les phases	p.55
Fig.12-Les trois régions identifiables du pied	p.58
Fig.13-Déroulement du pas	p.60
Fig.14-Aspect radiologique après arthrodèse par vissage	p.68
Fig.15-Aspect radiologique après ablation du matériel	p.69
Fig.16-Hallux rigidus. Aspect radiologique	p.81
Fig.17-Exemple de modélisation d'un patient grâce au logiciel VICON	p.95
Fig.18-Modélisation d'un patient lors de la montée et la descente des marches	p.96

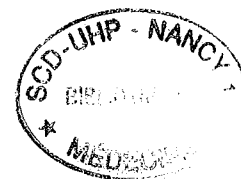
Fig.19-Cinétique générale de la marche 1

p.101

Fig.20-Cinétique générale de la marche 2

p.102





LISTE DES TABLEAUX

Tableau n°1: Caractéristiques générales des patients et délai entre l'intervention chirurgicale et l'examen optoélectronique	p.147
Tableau n°2: Scores de l'AOFAS pré- et post-opératoires	p.148
Tableau n°3: Bilan radiologique 1	p.149
Tableau n°4: Bilan radiologique 2	p.150
Tableau n°5: Paramètres de la marche	p.151
Tableau n°6: Amplitudes de cheville	p.152
Tableau n°7: Forces de réaction du sol 1	p.153
Tableau n°8: Forces de réaction du sol 2	p.154
Tableau n°9: Durée des phases d'appui secondaires	p.155
Tableau n°10: Pics de propulsion	p.156
Tableau n°11: Passage de la force de réaction du sol en avant de la mire TOE	p.157
Tableau n°12: Dissociation des ceintures	p.158
Tableau n°13: Décollement du talon	p.159
Tableau n°14: Distance entre les mires TOE et FIN	p.160

VU

NANCY, le 05 septembre 2002

Le Président de Thèse

NANCY, le 10 septembre 2002

Le Doyen de la Faculté de Médecine

Professeur J.P. DELAGOUTTE

Professeur J. ROLAND

AUTORISE À SOUTENIR ET À IMPRIMER LA THÈSE

NANCY, le 17 septembre 2002

LE PRÉSIDENT DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY 1

Professeur C. BURLET

RÉSUMÉ DE LA THÈSE:

À partir de l'étude optoélectronique de 15 arthrodèses métatarso-phalangiennes de l'hallux confrontée aux résultats cliniques et radiologiques, l'auteur se propose de répondre à trois questions:

*Quelles sont dans les trois plans de l'espace les modifications observées lors d'un cycle de marche sur terrain plat?

*L'essentiel de la compensation de l'arthrodèse métatarso-phalangienne s'effectue-t'il au niveau de l'articulation tibio-talienne ou de l'articulation inter-phalangienne?

*Comment le patient s'adapte-t'il à la montée et la descente des escaliers?

TITRE EN ANGLAIS:

Optoelectronic gait analysis after first metatarsophalangeal arthrodesis.
Review of 15 cases.

THÈSE: MÉDECINE SPÉCIALISÉE – ANNÉE 2002

MOTS CLEFS:

Optoélectronique- Marche- Articulation métatarso-phalangienne- Arthrodèse-
Hallux rigidus

UFR:

Faculté de Médecine de Nancy

9, avenue de la Forêt de Haye

54505 VANDOEUVRE LES NANCY Cedex