

Université de Montréal

La torsion des métatarses :  
étude de sa plasticité chez l'humain

Par

Judith Forgues-Marceau

Département d'anthropologie  
Faculté des Arts et Sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures et postdoctorales  
en vue de l'obtention du grade de M.Sc. en Anthropologie

Août 2013

© Judith Forgues-Marceau, 2013

Université de Montréal  
Faculté des études supérieures et postdoctorales

Ce mémoire intitulé :

La torsion des métatarses :  
étude de sa plasticité chez l'humain

Présenté par :

Judith Forgues-Marceau

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Isabelle Ribot

président-rapporteur

Michelle Drapeau

directrice de recherche

Bernard Chapais

membre du jury

## RÉSUMÉ

Il a été démontré que la torsion des têtes métatarsiennes est influencée par le mode de locomotion chez les primates et peut être utilisée pour déterminer la présence ou non d'une arche longitudinale chez les ancêtres hominines. Chez l'humain moderne, l'arche longitudinale rend le pied plus inversé que chez les grands singes, provoquant un léger basculement de l'axe dorsoplantaire de l'articulation proximale des métatarses. Ainsi, les têtes métatarsiennes subissent une torsion par rapport à l'axe de la diaphyse pour que leur surface plantaire reste parallèle au sol. Comme les femmes ont une arche longitudinale plus haute que les hommes et comme le port du soulier à semelles rigides provoque des changements morphologiques au niveau du pied, rendant l'arche longitudinale plus haute et l'hallux moins divergeant, il est attendu que la torsion métatarsienne soit différente selon le sexe et le type de soulier porté. Ce mémoire examine donc l'effet du contexte environnemental du pied et de la plasticité de la torsion des têtes métatarsiennes en comparant différentes populations humaines. L'échantillon disponible pour cette étude est constitué de 166 individus provenant de 18 sites archéologiques différents comprenant 57 hommes, 35 femmes et 74 individus de sexe indéterminé qui ont été divisés en quatre grands groupes : Amérindiens, Inuits, Militaires et Euro-canadiens. Il n'y a aucune différence de torsion entre les hommes et les femmes, ce qui suggère que la différence de hauteur de l'arche longitudinale entre les hommes et les femmes n'est pas assez importante pour être perçues au niveau de la torsion des têtes métatarsiennes. La topographie ne semble pas provoquer assez de modifications au niveau du pied pour provoquer une torsion différentielle des têtes métatarsiennes. Cependant, la surface du sol, plat ou accidenté, pourrait être un facteur modifiant ce trait. Finalement, le port de souliers constrictif à semelles dures comparativement aux souliers souples, tels les mocassins, provoque une torsion différentielle des têtes métatarsiennes. Les individus chaussant des souliers à semelles souples ont un premier métatarsien présentant une plus grande éversion et un troisième, quatrième et cinquième métatarsien présentant une plus petite éversion comparativement aux individus chaussant des souliers constrictifs. Ces résultats viennent appuyer l'hypothèse de la capacité plastique de la torsion des têtes métatarsiennes.

**Mots clés : Anthropologie, Métatarses, Torsion, Arche longitudinale, Plasticité osseuse**

## ABSTRACT

It has been shown that the metatarsals head torsion can be influenced by the mode of locomotion in primates and can be used to determine the presence or absence of a longitudinal arch in hominin ancestors. In modern humans, the longitudinal arch results in a foot more inverted than in apes, causing a slight tilting of the dorsoplantary axis of the metatarsals proximal joints. Thus, the metatarsal heads undergo torsion relative to the axis of the shaft so their plantar surface lie parallel to the ground. Since women have a higher longitudinal arch than men and since wearing hard sole shoes causes morphological changes in the foot, making the longitudinal arch higher and the hallux less abducted, it is expected that torsion will be different according to sex and type of shoes worn. By comparing different human populations, this paper examines whether metatarsal torsion is a plastic trait that can be influenced by the loading environment. The sample available for this study, consists of 166 individuals from 18 different archaeological sites including 57 men, 35 women and 74 of indetermined sex that were divided into four groups: Amerinds, Inuits, Military and Euro-canadian. There is no significant difference in torsion between men and women, suggesting that the slight difference in longitudinal arch height between men and women is not sufficient to be perceived in metatarsal variation torsion. The topography of the land does not seem to cause significant changes in the foot such as torsion. However, the surface of the ground, flat or irregular, could be a factor modifying torsion. Finally, wearing constrictive shoes with hard soles compared to flexible shoes, such as moccasins, increased variation in torsion angles. Individuals known to wear moccasins present more eversion of the first metatarsal and less eversion of the third, fourth and fifth metatarsals compared to individuals who used to wear constrictive footwear. These results support the hypothesis that metatarsal torsion is a relatively plastic feature.

**Keywords : Anthropology, Metatarsal, Torsion, Longitudinal arch, Bone plasticity**

## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>ix</b>
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>xii</b>
<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 2 : CADRE THÉORIQUE ET HYPOTHÈSES DE RECHERCHE .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1) Le système osseux .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2) Croissance et plasticité osseuse.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2.1) La croissance.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2.2) L’adaptation biomécanique.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3) Le pied humain .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3.1) Morphologie du pied .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3.1.1) La voûte plantaire.....</b>	<b>10</b>
<b>2.4) La marche.....</b>	<b>13</b>
<b>2.5) Variation morphologique du pied .....</b>	<b>14</b>
<b>2.5.1) Dimorphisme sexuel du pied .....</b>	<b>14</b>
<b>2.5.2) Variation interpopulationnelle du pied.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5.3) Adaptations culturelles du pied .....</b>	<b>16</b>
<b>2.6) Problématique et hypothèses de recherche .....</b>	<b>19</b>
<b>2.6.1) Problématique .....</b>	<b>19</b>
<b>2.6.2) Hypothèses de recherche .....</b>	<b>19</b>
<b>CHAPITRE 3 : MATÉRIEL ET MÉTHODES.....</b>	<b>21</b>

3.1) Description du matériel de recherche.....	21
3.1.1) Nunavut : Native Point (KkHh-1).....	21
3.1.2) Ontario : McIvor (BfFv-1), Crystal Rock (BeFv-2), Mclean Farm .....	22
3.1.3) Manitoba : Sourisford Moud-mid Antler Plain (DgMg-42), Sourisford Mound River (DgMg-60), Snowflake (DgLp-1), Stott Mound (DlMa-1) .....	23
3.1.4) Colombie-Britannique : Dodge Island (GbTo-18), Parizeau Point (GbTo-30), Boardwalk (GbTo-31), Lachane (GbTo-33), Baldwin (GbTo-36), Bella Coola ...	23
3.1.5) Québec : Cimetière Notre-Dame (BjFj-112), Cimetière St-Matthew (CeEt-41), Longueuil, Bastion des Ursulines de Québec .....	24
3.1.6) Les souliers.....	25
3.2) Méthodes.....	29
3.2.1) Collecte des données.....	29
3.2.2) Traitement des données .....	30
CHAPITRE 4 : RÉSULTATS .....	32
4.1) Regroupement des différentes populations .....	32
4.1.1) Topographie : plaine (Ontario/Manitoba) et mixte (Colombie-Britannique)	32
4.1.2) Amérindiens et Inuits.....	33
4.1.3) Les Euro-canadiens .....	34
4.2) Différences entre les sexes .....	37
4.3) Différences entre les groupes .....	38
4.4) Résumé des résultats .....	40
CHAPITRE 5 : DISCUSSION ET CONCLUSION .....	42
5.1) Topographie et dimorphisme sexuel.....	42
5.2) Différences entre les groupes .....	43
5.2.1) Amérindiens et Euro-canadiens.....	44
5.2.2) Les Militaires .....	46
5.2.3) Les Inuits.....	47
5.3) Conclusion et perspectives de recherche .....	48

<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>52</b>
<b>ANNEXE 1.....</b>	<b>xiii</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Synthèse des informations relatives aux sites archéologiques. ....	28
Tableau II. Résultats du test de T de Student pour la latéralité de chacun des métatarses. ....	31
Tableau III. Résultats du test U de Mann-Whitney entre les individus vivant sur les plaines de l'Ontario et du Manitoba et les individus vivant sur le terrain à topographie mixte de la Colombie-Britannique.....	32
Tableau IV. Résultats du test T de Student pour les moyennes de torsion des cinq têtes métatarsiennes entre les Amérindiens et les Inuits. Les différences significatives sont en gras. ....	33
Tableau V. Moyenne de torsion des cinq têtes métatarsiennes chez les quatre groupes d'origine euro-canadienne.....	35
Tableau VI. Résultats des tests T de Student ou U de Mann-Whitney (dépendamment de la grosseur de l'échantillon) pour les moyennes de torsion des cinq têtes métatarsiennes entre les populations euro-canadiennes. Les différences significatives sont en gras. ....	35
Tableau VII. Résultats des tests T de Student pour échantillons appariés entre les moyennes de la torsion des cinq têtes métatarsiennes entre les hommes et les femmes. ....	37
Tableau VIII. Résultats des tests ANOVA et du test Post-Hoc avec correction Bonferroni pour les moyennes de torsion des cinq têtes métatarsiennes entre les quatre groupe de l'échantillon. Les différences significatives sont en gras. ....	39
Tableau IX. Moyenne de torsion des cinq têtes métatarsiennes chez les quatre groupes de l'échantillon.....	40
Tableau X. Tableau X. Métatarsiens ayant des différences significatives dans leur moyenne de torsion des têtes métatarsiennes entre les groupes. ....	44
Tableau XI. Liste des spécimens de l'échantillon avec les valeurs d'angles pour chacun des métatarsiens disponibles.....	xiii

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 (modifiée de Shefelbine et coll., 2002) Schématisation de l'effet du stress hydrostatique (à gauche) et du stress de cisaillement (à droite). En gris foncé : forme préalable de la cellule, ligne noire foncée : forme de la cellule après déformation. ....	5
Figure 2 (modifiée de Maggiano, 2012) Schématisation du modelage sur une section osseuse transverse d'un fémur droit .....	6
Figure 3 (modifiée de Bénichou et Libotte, 2002) Pied droit, vue supérieure .....	7
Figure 4 (modifiée de White, 2005) Métatarses droits, vue supérieure.....	9
Figure 5 (modifiée de White, 2005) Métatarses droits, vue inférieure.....	9
Figure 6 (modifiée de White, 2005) Métatarses droits, vue latérale.....	10
Figure 7 (modifiée de White, 2005) Métatarses droits, vue médiale .....	10
Figure 8 (modifiée de Fontaine et Demondion, 2011) Arche longitudinale. a : squelette du pied droit, vue médiale ; b : coupe anatomique sagittale, vue médiale (Ca : calcaneus, T : talus, N : os naviculaire, CM : os cunéiforme médial, M1 : métatarsien I, P1 : phalange proximale de l'hallux, P2 : phalange distale de l'hallux).....	11
Figure 9 (modifiée de Fontaine et Demondion, 2011) Arche latérale. a : squelette du pied droit, vue latérale ; b : coupe anatomique sagittale, vue latérale (Ca : calcaneus, T : talus, Cu: os cunéiforme cuboïde, M5 : métatarsien V).....	11
Figure 10 (Modifiée de Ward et coll., 2011) Schématisation de l'arche transverse du pied en vue antérieure. Ligne pointillée : Arche transverse ; En bleu moyen : orientation de la base des métatarses ; En bleu pâle : tête métatarsienne. Les lignes au niveau de métatarsien IV (bleu foncé) représentent les axes dorsoplantaires de la tête et de la base du métatarses qui forme l'angle de torsion des têtes métatarsiennes. ....	12
Figure 11 (modifiée de Hoffman, 1905) Comparaison de la morphologie générale du pied entre un individu non chaussé (en haut à gauche) et un individu chaussé (en haut à droite). Différence entre l'orientation de l'articulation métatarso-phalangienne de l'hallux (en bas). A : enfant Bagobo (groupe ethnique des Philippines) qui a porté des souliers pendant quelques mois ; B : Adulte Bagobo n'ayant jamais été chaussé.. ....	17

Figure 12 (modifiée de D’Août et coll., 2009) Représentation des points de pression sur trois populations. A : Indiens non chaussés ; B : Indiens chaussés Chaussent majoritairement des sandales ou non chaussés à la maison, mais portent des chaussures de type occidental pour le travail, mais ont grandi sans être chaussés ; C : Occidentaux .....	18
Figure 13 (modifiée de Boucher, 2012) Île de Southampton. Native Point est indiqué par le chiffre 7. ....	22
Figure 14 (modifiée de Cybulski, 2001) Carte géographie de l’emplacement des sites Dodge Island (GbTo-18), Parizeau Point (GbTo-30), Boardwalk (GbTo-31), Lachane (GbTo-33), Baldwin (GbTo-36) .....	24
Figure 15 (modifiée de Peabody Museum of Archaeology and Ethnology) En haut : mocassins à semelles souples du nord est du Canada (à gauche) et possiblement Huron (à droite). En bas : mocassins à semelles dures des plaines. ....	26
Figure 16 (modifiée du Musée de la civilisation (photo de gauche), modifiée du Musée virtuel du Canada (photo de droite) Types de souliers portés par les Euro-canadiens. Sabot de bois datant du 18 <sup>e</sup> siècle (à gauche) ; Chaussure à boucle (restauré) datant de 1760. ....	27
Figure 17 (Modifiée de Drapeau et Harmon, 2013) Démonstration des points pris à partir du Microscribe sur certaines bases et têtes métatarsiennes du pied gauche. La ligne reliant les deux points sur chaque métatarsien équivaut à l’axe dorsoplantaire de la tête et de la base des métatarses. Ligne blanche = 1 cm. ....	30
Figure 18 (modifiée de Drapeau et Harmon, 2013) Schématisation de l’angle de torsion entre la tête et la base des métatarses d’un pied gauche. La ligne continue = l’axe dorsoplantaire de la base et la ligne pointillée = l’axe dorsoplantaire de la tête des métatarses. Le premier métatarsien ne présente pas de torsion, le deuxième présente une inversion et les trois autres une éversion. ....	30
Figure 19. Graphique représentant les moyennes de la torsion des cinq têtes métatarsiennes chez les individus vivant sur les plaines de l’Ontario et du Manitoba et les individus vivant sur le terrain à topographie mixte de la Colombie-Britannique. L’axe des ordonnés représente le degré d’angle de torsion des têtes métatarsiennes. ....	33
Figure 20. Graphique représentant les moyennes de torsion des cinq têtes métatarsiennes entre les Amérindiens et les Inuits. La différence entre les métatarses III, IV et V est significative. L’axe des ordonnés représente le degré d’angle de torsion des têtes métatarsiennes. ....	34
Figure 21. Graphique représentant les moyennes de torsion des cinq têtes métatarsiennes entre les populations euro-canadiennes. La différence entre la moyenne du deuxième métatarsien du Bastion des Ursulines et de St-Matthew et du Bastion des Ursulines et Longueuil est significative. L’axe des ordonnés représente le degré d’angle de torsion des têtes métatarsiennes. ....	36

- Figure 22. Boîte à moustache représentant les valeurs de torsion du quatrième métatarse chez les individus de Longueuil (Lo), du Bastion des Ursulines (BU), du cimetière Notre-Dame (ND) et du cimetière St-Matthew (SM).  
Chaque boîte représente la distribution entre le percentile 25 et 75. La barre noire pour l'échantillon de Longueuil équivaut à la valeur de l'individu tandis que la barre noire dans les boîtes représente la médiane et les moustaches, l'étendue. Le cercle représente une valeur extrême. Les axes des ordonnés représentent le degré d'angle de torsion des têtes métatarsiennes. ....36
- Figure 23. Graphiques représentant les différences de moyennes de la torsion des cinq têtes métatarsiennes entre les hommes (en bleu) et les femmes (en rouge) pour l'échantillon complet, les Amérindiens, les Inuits et les Euro-canadiens.  
Les axes des ordonnés représentent le degré d'angle de torsion des têtes métatarsiennes.....38
- Figure 24. A : Graphiques représentant les différences de torsion des têtes métatarsiennes des quatre groupes de l'échantillon. B : Boîte à moustache représentant les valeurs de torsion des têtes métatarsiennes chez les Inuits (In), les Amérindiens (Am), les Militaires (Mi) et les Euro-canadiens (E-c).  
La ligne pointillée est à zéro et n'équivaut à aucune torsion, des valeurs positives étant une éversion et des valeurs négatives, une inversion. Chaque boîte représente la distribution entre le percentile 25 et 75. La barre noire dans les boîtes représente la médiane et les moustaches, l'étendue. Les cercles représentent les valeurs extrêmes. Les axes des ordonnés représentent le degré d'angle de torsion des têtes métatarsiennes. ....41
- Figure 25 (modifiée de Drapeau et Harmon, 2013)  
Schématisation de l'angle de torsion des têtes métatarsiennes et de la position des métatarses dans le pied .....45

## REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier ma directrice de recherche, Dre Michelle Drapeau. Merci pour votre disponibilité, votre écoute et vos conseils. Mais par-dessus tout, merci de m'avoir poussé à continuer.

Merci également au Dre Isabelle Ribot et au Dr Bernard Chapais, membres du jury, pour vos commentaires sur ce mémoire.

Je tiens aussi à remercier le Nunavut Inuit Heritage Trust, Dr Jerome Cybulski du Musée canadien des civilisations et François Bélanger, archéologue à la ville de Montréal, d'avoir rendu ce projet possible. Un merci particulier au Dre Janet Young du Musée canadien des civilisations pour son aide durant mes recherches. Je voudrais aussi remercier le Diocèse Anglican de Québec de m'avoir donné l'autorisation de travailler sur la collection du cimetière St-Matthew ainsi que le Dr Réginald Auger et le Dr Jacques Chabot pour leur accueil chaleureux dans le laboratoire d'archéologie de l'Université Laval.

Je ne peux passer sous silence mes collègues du C-3041 et des bureaux avoisinants : Laurence, Ronan, Lauriane, Luc, Rémi, Marine et Jacinthe. Merci pour nos conversations parfois futiles, parfois très futiles qui m'ont bien fait rire. Le temps passé au bureau aurait été beaucoup plus long sans votre présence à mes côtés. Un merci particulier à Émeline pour tes encouragements, ta compréhension, ta patience et ton amitié.

Finalement, j'aimerais remercier ma famille : Jean-Guy, Suzanne, Sarah et Justine. Merci pour votre support tout au long de mon parcours scolaire, merci de croire en moi et merci de votre présence. Vos paroles transforment les obstacles en soucis et les réussites en triomphes!

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

La capacité plastique des os est un sujet fortement étudié. Toutes les espèces possèdent des caractéristiques morphologiques particulières partagées à divers degrés avec d'autres espèces plus ou moins lointaines. Chez l'humain, le pied s'est largement modifié de celui des autres primates en raison du mode de locomotion bipède. L'alignement de l'hallux, l'apparition de l'arche longitudinale, la diminution de la longueur de tous les orteils sauf de l'hallux sont autant d'exemples de toutes les caractéristiques morphologiques podales qui ont évoluées à travers le temps pour donner lieu à la bipédie.

Récemment, l'étude de Drapeau et Harmon (2013) a démontré que l'angle de torsion de la tête des métatarses peut être utilisé comme indicateur du mode de locomotion des primates. La torsion de la tête des métatarses se définit par l'angle formé entre l'axe dorsoplantaire de la base du métatarsien par rapport à l'axe dorsoplantaire de sa tête. Quel que soit le mode de locomotion, pour que celle-ci soit optimale, l'avant-pied doit être en parfaite synchronie avec la surface de locomotion et l'arrière-pied doit être morphologiquement adapté à sa fonction. Au niveau de l'avant-pied, les surfaces plantaires des cinq têtes métatarsiennes doivent être parallèles à la surface de locomotion puisque l'orientation de la surface articulaire de la tête des métatarses guide le mouvement des articulations métatarso-phalangiennes. Concernant l'arrière-pied, les différents modes de locomotion entraînent une modification de l'emplacement, de la dimension et de l'orientation des tarse. Ainsi, les articulations tarso-métatarsiennes peuvent être orientées dans une autre direction que les articulations métatarso-phalangiennes, nécessitant la torsion de la tête des métatarses. C'est donc une combinaison entre l'agencement morphologique du pied, le mode de locomotion et la surface de locomotion qui détermine le degré de torsion des têtes métatarsiennes. Ceci dit, bien que le degré de torsion des têtes métatarsiennes puisse refléter la locomotion de l'animal, cela ne signifie pas en soit la capacité plastique du trait qui pourrait fort bien être le résultat d'un héritage génétique ou phylogénétique. L'importance de la génétique et de la plasticité osseuse dans la morphologie d'un trait est difficile à établir et la part génétique très difficile à démontrer. Par contre, si à l'intérieur de l'espèce humaine le degré de torsion de la tête des métatarses révèle

des angles différents selon les pratiques culturelles ou une topographie du terrain différente, l'hypothèse de la plasticité du trait pourra alors être appuyée.

Afin d'établir une possible plasticité de la torsion des têtes métatarsiennes, ce mémoire compare les angles d'individus provenant de plusieurs populations amérindiennes et euro-canadiennes, marquées par une dichotomie tant au point de vue de la topographie de leur milieu de vie que de leur pratique culturelle concernant le port de la chaussure. Une comparaison sera aussi effectuée entre le degré de torsion des têtes métatarsiennes des hommes et des femmes car, tant le dimorphisme sexuel (bien qu'il ait considérablement diminué chez l'humain, les hommes restent généralement plus grands et robustes que les femmes) que la division sexuelle des tâches ainsi que les différentes activités typiquement associées à l'un ou l'autre sexe pourraient avoir une incidence sur la torsion des têtes métatarsiennes.

Ainsi, ce mémoire tentera de démontrer que la torsion de la tête des métatarses est un trait morphologique ayant les capacités plastiques pour s'adapter à l'environnement qui lui est imposé. Pour ce faire, le prochain chapitre sera un récapitulatif nécessaire pour décrire le pied humain, sa fonction, son fonctionnement lors de la marche ainsi que les différences morphologiques qui sont perceptibles à l'intérieur de l'espèce humaine en fonction du sexe et de l'origine ethnique, pour terminer avec la description de l'effet du soulier sur le pied. Ensuite, le troisième chapitre portera sur la description de l'échantillon, soit l'emplacement des sites archéologiques, leur datation et leur topographie, l'appartenance culturelle des individus et leur mode de subsistance ainsi que les informations concernant la collecte et le traitement des données. Le quatrième chapitre présentera les résultats obtenus, le cinquième sera une discussion de la signification de ces résultats et pour terminer ce mémoire, une conclusion et les perspectives de recherches seront énoncées.

## **CHAPITRE 2 : CADRE THÉORIQUE ET HYPOTHÈSES DE RECHERCHE**

### **2.1) Le système osseux**

Comme la majorité du tissu osseux adulte, les métatarsiens sont constitués principalement d'os cortical (ou os compact) au niveau de la diaphyse et d'os spongieux au niveau des épiphyses. Le tissu osseux est de deux types : l'os lamellaire et l'os réticulaire. L'os réticulaire est retrouvé principalement chez l'enfant et lors de la réparation de fractures chez l'adulte. De ce fait, c'est l'os lamellaire qui est étudié chez l'adulte. L'os lamellaire est caractérisé par une déposition lente et organisée de lamelles concentriques autour de la cavité médullaire de l'os (Currey, 2002) ou autour d'un canal de Havers. L'os spongieux peut être formé de deux façons différentes. Ses lamelles osseuses peuvent être déposées en treillis ou bien l'os compact subit une résorption importante résultant en un grand nombre de cavités de résorption, ce qui le rend spongieux. Cette densité réduite relative à l'os cortical le rend plus souple (Tortora et Grabowski, 2001). L'os étant soumis à différents stress causés par des charges biomécaniques, il se brise et se renouvelle constamment d'un point de vue microscopique. Ainsi, l'intégrité de la matrice osseuse sera maintenue par le travail constant et coordonné de quatre types de cellules : les cellules bordantes, les ostéoblastes et les ostéocytes qui sont essentiels à la formation osseuse, et les ostéoclastes qui sont essentiels à sa résorption (Platzer, 2007). Cette structure interne et externe des os donne au squelette trois fonctions principales. Sa fonction mécanique assure le support de l'individu tout en servant de protection des organes vitaux internes. Sa fonction métabolique permet la libération ou le stockage de sels minéraux provoqué par le remodelage osseux, assurant la préservation d'une homéostasie minérale. Finalement, grâce à sa fonction hématopoïétique, les os renferment les cellules hématopoïétiques de la moelle osseuse qui créent ou renouvellent les cellules sanguines (Platzer, 2007, Tortora et Grabowski, 2001).

## **2.2) Croissance et plasticité osseuse**

### **2.2.1) La croissance**

Chez les enfants, la transformation des os se fait par la croissance et le modelage. Durant la croissance, les os prennent de la masse, de la densité et augmentent en longueur (Olsen et coll., 2000). Il existe deux types d'ossification primaire : l'ossification intramembraneuse et l'ossification enchondrale. L'ossification intramembraneuse assure l'apposition et la résorption directe d'os au niveau du périoste et de l'endoste. Les ostéoblastes déposent de la matrice osseuse pour former des couronnes d'os lamellaire compact. L'ossification enchondrale, quant à elle, assure les premiers centres d'ossification au milieu de la diaphyse des os longs (Olsen et coll., 2000) ainsi que la croissance en longueur des os longs qui se fait par des centres d'ossification secondaires se formant dans le cartilage de conjugaison entre la diaphyse et les épiphyses (Platzer, 2007). Cette ossification primaire permet la création d'un modèle de base pour l'os qui va ensuite être modelé (Maggiano, 2011). En effet, le modelage modifie l'architecture externe de l'os en réponse à l'environnement pour ajuster la structure de l'os à sa fonction (Jarowski, 1984) assurant ainsi une optimisation de sa fonction mécanique.

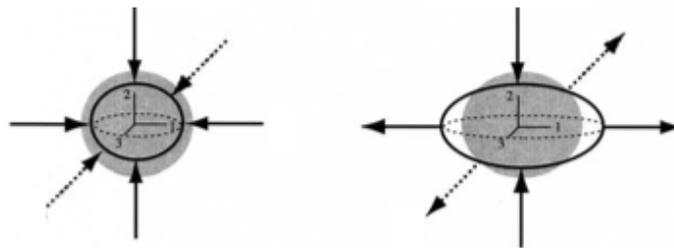
### **2.2.2) L'adaptation biomécanique**

En 1892, Wolff publie un traité qui émet l'hypothèse, connue sous la loi de Wolff, qui stipule que les os modifient leurs configurations interne et externe en réponse à leur environnement mécanique (Lieberman, 1997). Que le corps soit au repos (équilibre statique) ou en mouvement (équilibre dynamique), différentes forces agissent sur les os. Ces forces peuvent avoir une origine interne (muscles, tendons) ou externe dans lesquelles on distingue la tension, la compression, le cisaillement, la flexion et la torsion. En modifiant leur structure, les os augmentent leur capacité à supporter les charges encourues sans se briser. Trois processus modulent le degré et la nature des changements : la réponse traductionnelle (détection cellulaire d'un stress ou d'une microfracture), la réponse structurelle (changement dans la

macrostructure ou la microstructure de l'os) et la contrainte de design (contrainte spatiale qui détermine le type de transformations que va subir l'os). Les os en croissance réagissent donc au stress encouru en modifiant leur vitesse d'ossification à des endroits précis de l'os. Selon Carter et coll. (1987), deux types de stress sont responsables de ce changement au niveau du cartilage entre la diaphyse et les épiphyses. Le stress hydrostatique, qui modifie le volume des cellules sans modifier la forme sphérique de celles-ci, ralentit la croissance tout en préservant le cartilage tandis que les régions soumises à des stress de cisaillement, qui modifient la forme des cellules sans modifier le volume, augmentent leur vitesse de croissance et leur ossification (Figure 1). Une étude de Shefelbine et coll. (2002) démontre que ce processus est valable pour la formation de l'angle bicondylaire du fémur qui se forme lors de l'apprentissage de la marche chez l'enfant. Selon ces chercheurs, seulement une courte période de temps en position debout est nécessaire pour provoquer un stress inégal sur le cartilage épiphysaire qui résulte en une croissance différentielle entre les deux condyles du fémur.

Figure 1 (modifiée de Shefelbine et coll., 2002)

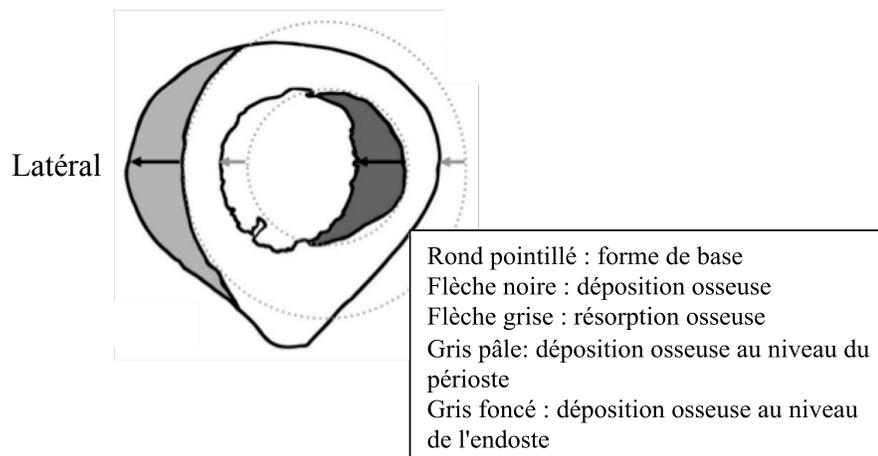
Schématisation de l'effet du stress hydrostatique (à gauche) et du stress de cisaillement (à droite). En gris foncé : forme préalable de la cellule, ligne noire foncée : forme de la cellule après déformation.



Au niveau microscopique, le modelage assure l'orientation de l'axe de l'os, sa courbure ou sa forme ainsi que son épaisseur globale (Maggiano, 2011). Ce processus permet ainsi une augmentation globale de la taille de l'os, maintenant ou ajustant la forme de l'os durant la croissance en modifiant la quantité et le lieu de la déposition du tissu osseux autour de la matrice (Maggiano, 2011). Ainsi le modelage ajoute ou enlève de l'os au niveau de l'endoste et du périoste en fonction de la demande biomécanique (Figure 2). Lorsque le changement morphologique nécessite une torsion, comme pour la torsion des têtes métatarsiennes, le processus entraîne une dérive rotationnelle. Selon Maggiano (2012), soit la déposition de

lamelles osseuses se fait de façon asymétrique, soit l'os subit une résorption partielle. Quoiqu'il en soit, bien que la croissance soit génétiquement programmée, des forces biomécaniques sont nécessaires pour la finalité morphologique du squelette et une variation de charges encourues modifiera la morphologie adulte du squelette.

Figure 2 (modifiée de Maggiano, 2012)  
Schématisation du modelage sur une section osseuse transverse d'un fémur droit



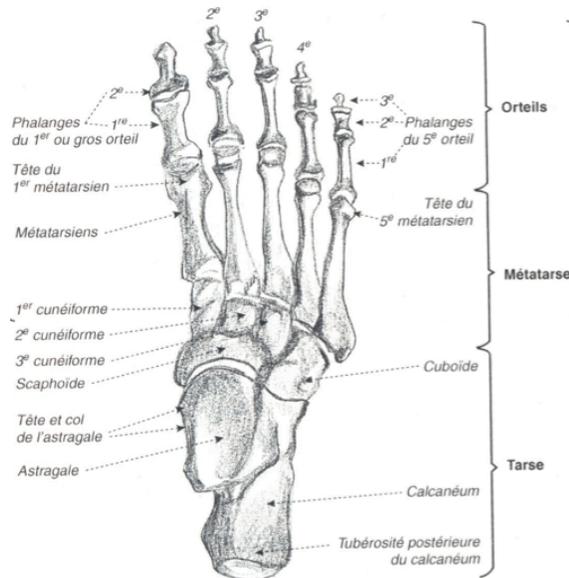
## 2.3) Le pied humain

### 2.3.1) Morphologie du pied

L'acquisition de la bipédie chez le genre *Homo* a provoqué un nombre considérable de changements morphologiques au niveau du squelette (Conroy, 2005). Au niveau du pied, la locomotion bipède donne un rôle d'équilibre, d'amortisseur et de propulseur lors du maintien de la station verticale ou de la marche. Pour ce faire, le pied a perdu sa capacité de préhension et une voûte plantaire s'est formée pour permettre au pied de mieux absorber les chocs.

Le pied humain possède 28 os divisés en trois grands groupes : les tarses, les métatarses et les phalanges (Platzer, 2007) (Figure 3).

Figure 3 (modifiée de Bénichou et Libotte, 2002)  
 Pied droit, vue supérieure



- Les tarse : ce groupe comporte un ensemble de sept os dont le talus (astragale) qui, avec la partie distale du tibia et de la fibula, forment la cheville. Le calcaneus (calcanéum) est le plus gros os et le cuboïde, l'os naviculaire (scaphoïde) et les trois os cunéiformes (1<sup>er</sup>: médial, 2<sup>e</sup>: intermédiaire et 3<sup>e</sup>: latéral) complètent ce groupe (Platzer, 2007) (Figure 3).
- Les métatarses : les cinq métatarsiens (I, II, III, IV et V de médial à latéral) (Figures 3 à 7)
  - Métatarsien I : Il est le plus petit mais le plus robuste. Sa surface plantaire proximale présente la tubérosité du premier métatarsien (Figures 5 et 6). Il est parfois articulé postéro-latéralement avec le deuxième métatarsien et postérieurement avec la partie distale du 1<sup>er</sup> cunéiforme, le médial. Le premier métatarsien s'articule antérieurement avec la première phalange proximale (Figure 3). Sous la tête particulièrement large de ce métatarsien se trouvent deux os sésamoïdes, chacun s'insérant dans un des deux sillons caractérisant

cette tête métatarsienne (Figure 5). Ces sillons parallèles sont séparés entre eux par une petite crête (Platzer, 2007).

- Métatarsiens II, III et IV : Ces trois métatarsiens sont globalement semblables les uns aux autres. Leurs épiphyses sont caractérisées par une surface dorsale qui est plus large que la surface plantaire. Les têtes métatarsiennes sont inclinées dorsalement pour permettre une plus grande capacité de mouvement aux articulations métatarso-phalangiennes laissant apparaître postérieurement un sillon marquant la limite entre la diaphyse et l'épiphyse (Figure 4). Leur base, ou leur articulation proximale, s'articule avec la base de leurs métatarsiens adjacents. Ils s'articulent antérieurement avec les phalanges proximales II, III et IV respectivement (Figure 3). Postérieurement, le deuxième métatarsien s'articule avec les cunéiformes médial et intermédiaire, le troisième avec le cunéiforme latéral et le quatrième avec l'os cuboïde (Platzer, 2007) (Figure 3).
- Métatarsien V : Tout comme les trois précédents métatarsiens, sa surface dorsale est plus large que la surface plantaire et sa tête, inclinée dorsalement, présente le même sillon (Figure 4). Il se distingue morphologiquement des autres par sa tubérosité, appelée tubérosité du cinquième métatarsien, sur la surface latérale de son épiphyse proximal (Figures 4, 5, 6 et 7). Il s'articule postérieurement avec l'os cuboïde et le quatrième métatarsien et antérieurement avec la cinquième phalange proximale (Platzer, 2007) (Figure 3).

Les têtes métatarsiennes sont séparées par l'espace inter-capito-métatarsien où se situe le ligament transverse inter-métatarsien (Claustre et Bonnel, 1990). Cette espace renferme la bourse de glissement inter-capito-métatarsienne qui permet le mouvement des têtes métatarsiennes (Bonnel et Claustre, 1990).

- Les phalanges : ce sont les os des orteils qui se divisent en trois groupes : les phalanges proximales, médianes et distales. Quatre des cinq orteils possèdent les trois types de phalanges, seul l'hallux ne possède que deux phalanges (Figure 3).

Figure 4 (modifiée de White, 2005)  
Métatarses droits, vue supérieure

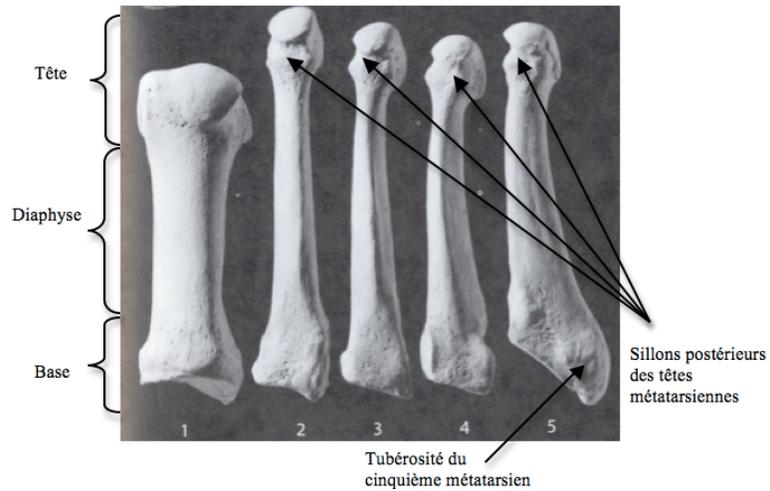


Figure 5 (Modifiée de White, 2005)  
Métatarses droits, vue inférieure

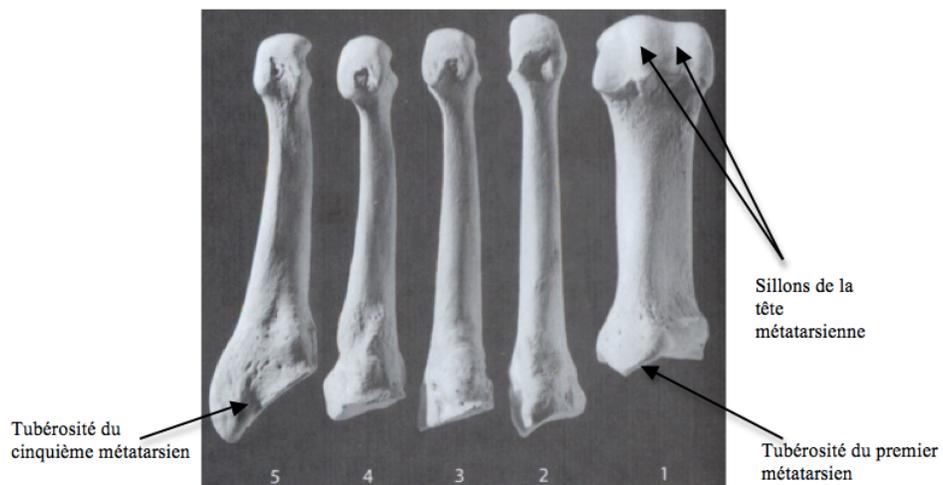


Figure 6 (Modifiée de White, 2005)  
Métatarses droits, vue latérale

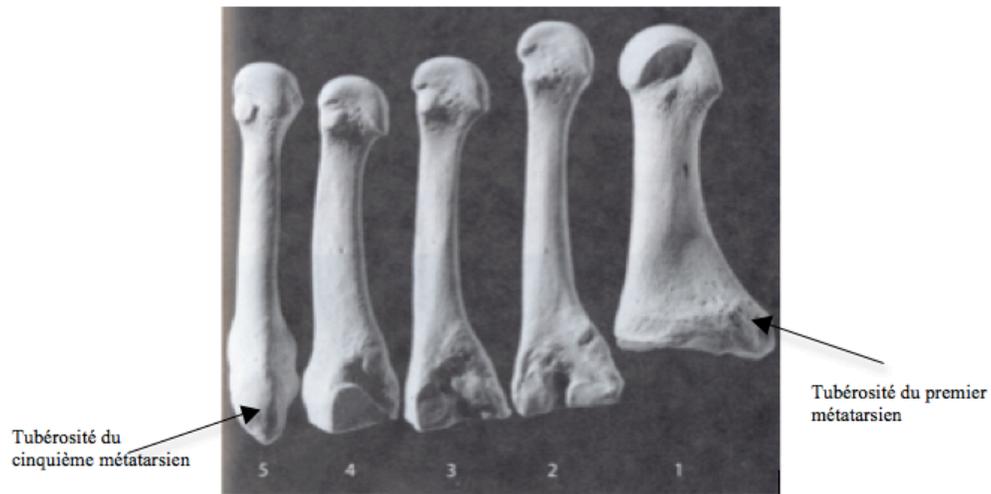
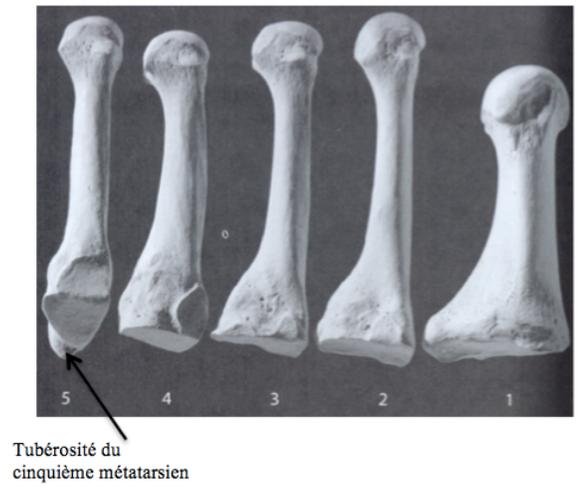


Figure 7 (Modifiée de White, 2005)  
Métatarses droits, vue médiale



### 2.3.1.1) La voûte plantaire

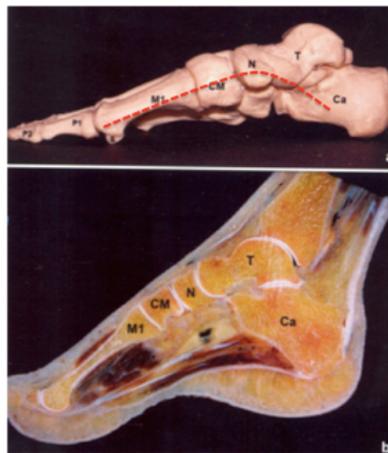
La voûte plantaire possède trois points d'appui : la tubérosité du calcanéus, la tête du premier et du cinquième métatarsiens, ce qui occasionne une pression irrégulière du poids du corps sur le pied. La voûte plantaire permet l'adaptation du pied aux différents types de terrain

par le changement dans la courbure de ses trois arches (longitudinale, latérale et transverse) (Chevalier, 2001).

- L'arche longitudinale est l'arche la plus haute, entre 15 et 18 mm du sol (Figure 8). Elle absorbe les chocs par la mobilité du talus sur le calcanéus.

Figure 8 (Modifiée de Fontaine et Demondion, 2011)

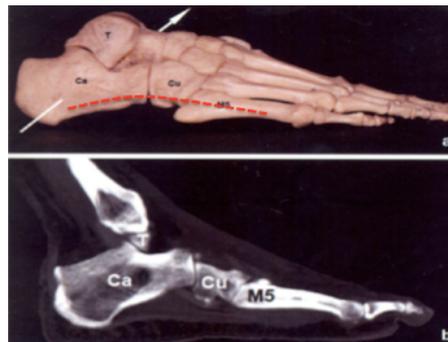
Arche longitudinale. a : squelette du pied droit, vue médiale ; b : coupe anatomique sagittale, vue médiale (Ca : calcanéus, T : talus, N : os naviculaire, CM : os cunéiforme médial, M1 : métatarsien I, P1 : phalange proximale de l'hallux, P2 : phalange distale de l'hallux).



- L'arche latérale est la moins élevée, entre 3 et 5 mm du sol et est beaucoup plus rigide (Figure 9).

Figure 9 (Modifiée de Fontaine et Demondion, 2011)

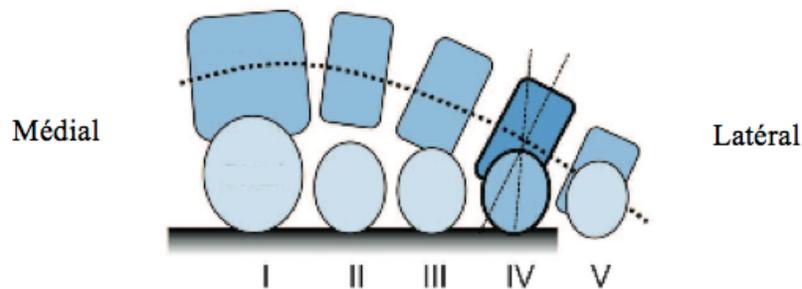
Arche latérale. a : squelette du pied droit, vue latérale ; b : coupe anatomique sagittale, vue latérale (Ca : calcanéus, T : talus, Cu: os cunéiforme cuboïde, M5 : métatarsien V).



- L'arche transverse possède son point le plus élevé à la base du deuxième métatarsien qui se trouve à 9 mm du sol et la hauteur diminue jusqu'à la base du cinquième métatarsien (Figure 10).

Figure 10 (Modifiée de Ward et coll., 2011)

Schématisation de l'arche transverse du pied en vue antérieure. Ligne pointillée : Arche transverse ; En bleu moyen : orientation de la base des métatarses ; En bleu pâle : tête métatarsienne. Les lignes au niveau de métatarsien IV (bleu foncé) représentent les axes dorsoplantaires de la tête et de la base du métatarses qui forme l'angle de torsion des têtes métatarsiennes.



Comme il a été mentionné plus tôt, le degré de torsion des têtes métatarsiennes dépend entre autre de la morphologie générale du pied. L'arche longitudinale du pied humain surélève les bases du premier et du deuxième métatarsiens tout en laissant leur axe dorsoplantaire relativement perpendiculaire au sol. La tête de ces métatarsiens peut donc suivre l'axe de la diaphyse pour que leur surface plantaire puisse s'appuyer au sol sans la nécessité d'une grande torsion. La différence de hauteur entre l'arche longitudinale et l'arche latérale provoque une inversion de l'arche transverse, c'est à dire que sa partie latérale est basculée latéralement, la partie interne fait face médialement (Figure 10). Cette inversion de l'arche transverse provoque un basculement des articulations tarso-métatarsiennes et de l'axe de la diaphyse. Ainsi, l'axe dorso-plantaire de la base des métatarses III, IV et V n'est plus perpendiculaire au sol mais est partiellement inclinée médio-latéralement (Figure 10), entraînant la même inclinaison de l'axe de la diaphyse. Les têtes métatarsiennes devront alors se tourner par rapport à cet axe pour que leur surface plantaire se dépose parallèlement au sol (Drapeau et Harmon, 2013). Cette torsion résulte en un angle entre l'axe dorsoplantaire de la base des métatarses avec l'axe dorsoplantaire de leur tête (Morton, 1922 ; Elftman et Manter, 1935 ;

Aiello et Dean, 1990 ; Drapeau et Harmon, 2008 ; Drapeau et Harmon, 2013), c'est la torsion de la tête des métatarses (Figure 10).

Le pied est sujet à plusieurs pathologies. Dans ce mémoire, certains individus pourraient présenter un affaissement de l'arche plantaire, pathologie connue sous le nom de pied plat. Cette pathologie est due soit à une faiblesse des muscles qui n'arrivent pas à soutenir la voûte plantaire, soit à une rotation externe du calcaneus (Delagoutte, 1989b). Puisque le degré de torsion de la tête des métatarses chez l'humain est le résultat de l'inversion de la partie médiale du pied causée par la présence de l'arche longitudinale surélevée, son affaissement devrait modifier le degré de torsion. Les métatarses présentant des pathologies évidentes n'ont pas été sélectionnés pour fin d'étude dans ce mémoire. Par contre, un affaissement pathologique de l'arche longitudinale est difficilement observable sans l'articulation complète du pied et certains métatarses d'individus aux pieds plats peuvent s'être glissés dans l'échantillon.

#### **2.4) La marche**

La marche consiste à déplacer le centre de gravité vers l'avant et l'équilibre dynamique n'est possible que par la participation de tout le squelette lors du mouvement. Durant le mouvement, le marcheur a toujours un appui au sol en une alternance unipodale et bipodale. Comme il a été mentionné plus tôt, l'arche longitudinale rend inégales les charges encourues par le pied lors du transfert du poids. D'abord, les charges sont au niveau du talon lors de la prise de contact avec le sol. Puis, durant le contact maximal avec le sol, le poids du corps passe de l'arrière du pied au devant en se déplaçant sur le côté latéral du pied, vers la tête des quatrième et cinquième métatarsiens. Finalement, le talon va se soulever et le poids du corps, qui était alors sur le côté externe du pied, se répartit sur toute la surface de l'avant-pied, écrasant l'arche antérieure, pour se terminer sous la tête du premier métatarsien (Chevalier, 2001 ; Dimeglio et coll., 1987). La cinématique de ce déroulement du pied lui permet de remplir trois fonctions dynamiques. Le pied humain a besoin de flexibilité pour s'adapter aux changements que peut offrir l'environnement, il doit être semi-rigide pour servir de ressort et

de levier et il doit être rigide pour supporter le poids du corps et offrir une bonne stabilité (Fontaine et Demondion, 2011 ; Rodgers, 1995). Lors de la pose du pied au sol avec le talon et jusqu'à ce qu'il se rabatte complètement sur le sol, l'articulation transverse des tarse est libre de mouvement, donnant aux pieds toute la souplesse nécessaire pour être en contact de façon optimale avec le sol. Puis, quand le poids du corps agit sur le pied, celui-ci se stabilise (Rodgers, 1995). Ainsi, dans un contexte où les groupes humains n'habitent pas dans un contexte topographique similaire (un terrain généralement plat, montagneux ou un terrain plus accidenté) et à condition que les chaussures portées permettent au pied de bien sentir les variations du sol, on pourrait penser que la souplesse des tarse induit un changement, aussi petit soit-il, dans l'orientation de leur surface articulaire avec les bases des métatarses. Ce changement provoquerait une orientation différente de l'axe de la diaphyse, qui résulterait en un degré de torsion différentiel de la tête des métatarses entre deux groupes populationnels.

## **2.5) Variation morphologique du pied**

### **2.5.1) Dimorphisme sexuel du pied**

Comme il a été mentionné dans l'introduction, les hommes restent généralement plus grands et plus robustes que les femmes malgré la réduction du dimorphisme sexuel chez l'espèce humaine (Holden et Mace, 1999) et ces différences morphologiques caractérisent aussi le pied (voir Mountrakis et coll., 2010 ; Case et Ross, 2007 ; Ozden et coll., 2005 ; Wunderlich et Cavanagh, 2000 ; Wilbur, 1998 ; Robling et Ubelaker, 1997 ; Smith, 1997). La grande majorité des études sur les différences hommes/femmes se concentrent sur la longueur des pieds, les hommes ayant de plus grands pieds que les femmes pour une même stature à l'intérieur d'un groupe de même origine ethnique (Hisham et coll., 2012 ; Fessler et coll., 2005 ; Manna et coll., 2001 ; Wunderlich et Cavanagh, 2001 ; Barker et Scheuer, 1998 ; Ashizawa, 1997 ; Giles et Vallandigham, 1991 ; Davis, 1990 ; Hrdlicka, 1935). Ceci dit, le dimorphisme sexuel des pieds ne se limite pas à la longueur de ceux-ci et l'étude de Wunderlich et Cavanagh (2001) a démontré que les femmes ont une arche plantaire plus haute que les hommes en valeurs normalisées selon la longueur du pied. Rappelons que l'arche

longitudinale surélevée provoque une inversion des articulations tarso-métatarsiennes latérales provoquant une éversion de la tête des métatarses qui leur sont associés. Ainsi si les femmes ont une arche plantaire plus haute, l'inversion des articulations tarso-métatarsiennes latérales devrait être plus importante nécessitant un plus grand degré de torsion de la tête des métatarses latéraux chez les femmes.

### **2.5.2) Variation interpopulationnelle du pied**

Tout comme la variation morphologique selon le sexe, il existe des différences morphologiques au niveau du pied à travers les différentes populations. Hawes et coll. (1994) affirment qu'il existe certaines caractéristiques ethniques du pied «qui peuvent être considérées comme l'expression de différences génétiques». Ces auteurs font référence aux études de Cheskin (1987), Baba (1975), Bernard et Hueber (1968) et Freedman et coll. (1946) dont ressort un schéma pour les types de pieds «noirs», «blancs» et «orientaux»<sup>1</sup>. Ainsi, les «noirs» seraient caractérisés par un avant-pied plus large et un talon plus étroit avec une arche plantaire moins haute. Les pieds «orientaux» sont plus petits mais plus larges tandis que les «blancs» ont une proportion égale de pieds à arches plate, normale et haute. De plus, les «blancs» dans les climats plus doux ont des pieds plus larges. Au contraire, l'étude de Hisham et coll. (2012) ne présente pas de variations morphologiques au niveau des pieds entre trois ethnies distinctes vivant sur le territoire de la Malaisie (Malais, Indiens et Chinois). Ceci dit, aucun des auteurs mentionnés précédemment ne spécifie les pratiques culturelles de chacun des groupes concernant le port du soulier. Il est facile de croire que les trois groupes de Malaisie portent des souliers de type plus similaire qu'une population africaine comparée à une population européenne. Bien qu'il soit difficile de déterminer la part du génétique et la part du culturel dans les différences morphologiques, les différences rapportées dans le texte de Hawes et coll. (1994) pourraient bien être le reflet d'adaptations culturelles différentes et non pas de différences génétiques. En effet, comme on le verra dans la prochaine section, le

---

<sup>1</sup> Le concept de «race» est une invention purement subjective, une limite biologique entre les populations n'ayant jamais pu être établie (lire Cavalli-Sforza et coll., 1971, 1981, 1994, 1995, 1996, 2005 ; Gould, 1996). Malheureusement, dans bien des études, la couleur de peau est la seule information donnée concernant l'origine des individus étudiés.

port de différents types de chaussures a des effets considérables sur la morphologie des pieds, qui vont dans le sens des différences morphologiques énumérées par Hawes et coll. (1994).

### **2.5.3) Adaptations culturelles du pied**

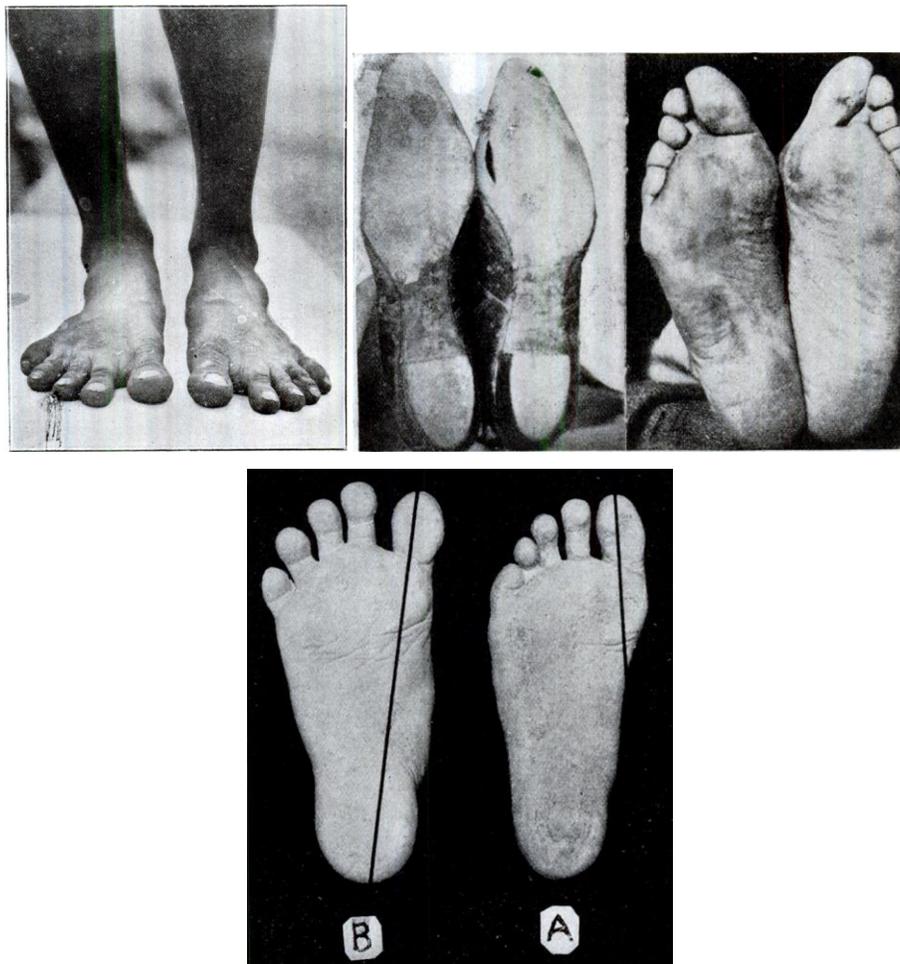
Les premiers souliers retrouvés dans l'histoire humaine datent de 8 300 ans (Kuttruf et coll., 1998). Selon l'origine géographique, le climat et les pratiques culturelles, différentes populations ont intégré le port de la chaussure à leur vie quotidienne. Les souliers revêtent la fonction pratique de protéger le pied de son environnement externe. Ceci dit, rapidement les humains ont ajouté le côté esthétique à l'utilité de leur chaussure. Bien que certains souliers arrivent à jumeler confort et beauté, certains types de souliers sont un véritable fléau pour la santé du pied : les souliers à talons hauts, à bout pointu, etc. L'Occident a vu l'apparition du talon vers le 16<sup>e</sup> siècle. D'abord dédié aux hommes, les femmes adoptèrent aussi ce type de souliers qui disparut avant la Révolution française pour revenir vers le 19<sup>e</sup> siècle (Bénichou et Libotte, 2002). Les études présentent deux grands changements au niveau du pied associés au port du soulier : une modification morphologique (Figure 11) et une modification du lieu et de la force des points de pression sur la plante du pied (Figure 12).

La capacité plastique du pied à modifier sa morphologie générale en fonction de la restriction spatiale qu'offrent les souliers a été démontrée, entre autres, par les études sur les populations chinoises et les Anglais de l'époque médiévale (Mays, 2005 ; Jackson, 1990 ; Sim-Fook, 1958). Selon Hoffman (1905), seulement quelques mois de port du soulier chez un enfant sont suffisantes pour provoquer des effets sur la forme du pied. En effet, la morphologie du pied est semblable chez les peuples non chaussés et chaussés jusqu'au moment où les individus commencent à porter des souliers. D'ailleurs, les études de Tuttle et coll. (1990) et de Musiba et coll. (1997) sur les peuples non chaussés du Pérou et de Tanzanie présentent des similarités au niveau de la plante du pied et seraient comparables aux empreintes de Laetoli datant de 3,7 millions d'années (D'Août et coll., 2009). Hoffman (1905) a remarqué qu'après un an chaussé, le pied a tendance à s'amincir dans sa partie antérieure. Chez les groupes non chaussés, les pieds sont caractérisés comme étant plus longs et larges (D'Août et coll., 2009 ; Ashizawa et coll., 1997), ayant une partie antérieure du pied plus

élargie (Sim-Fook et Hodgson, 1958 ; Hoffman, 1905) et un pied plus souple (Kadambande et coll., 2006 ; Hoffman, 1905), rappelant les caractéristiques pseudo génétiques présentées par Hawes et coll. (1994) dans la section précédente.

Figure 11 (Modifiée de Hoffman, 1905)

Comparaison de la morphologie générale du pied entre un individu non chaussé (en haut à gauche) et un individu chaussé (en haut à droite). Différence entre l'orientation de l'articulation métatarso-phalangienne de l'hallux (en bas). A : enfant Bagobo (groupe ethnique des Philippines) qui a porté des souliers pendant quelques mois ; B : Adulte Bagobo n'ayant jamais été chaussé.



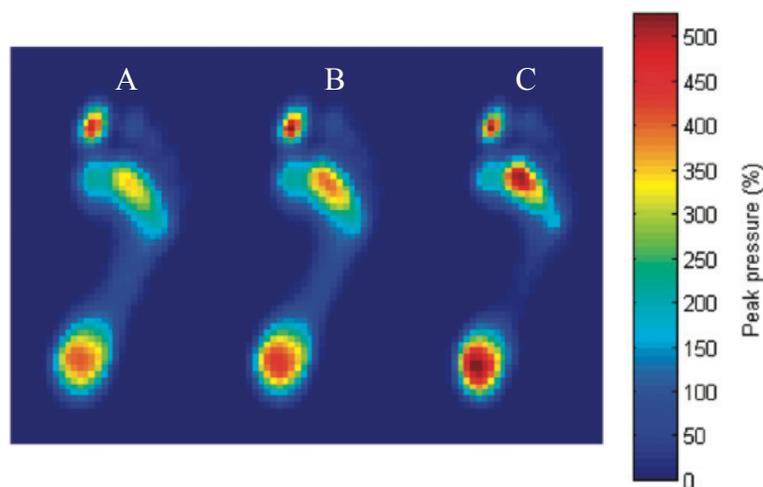
Certaines études démontrent une augmentation de l'incidence des pieds plats chez les individus chaussés comparativement aux individus non chaussés à l'intérieur d'un même groupe populationnel (Echarri et Forriol, 2003 ; Rao et Joseph, 1992). Chez les humains, l'arche longitudinale peut être très basse ou très haute, les deux extrêmes étant considérés

comme pathologiques, sauf qu'au milieu de ces deux extrêmes se trouve toute une variation saine de la hauteur de l'arche plantaire. D'Août et coll. (2009) ont démontré que les individus non chaussés possèdent une arche plantaire généralement plus basse que les individus chaussés qui, eux, présentent dans une proportion égale des arches basses, moyennes et hautes (ce qui concorde, encore une fois, avec les études énumérées par Hawes et coll. 1994).

La deuxième différence importante entre les individus chaussés et non chaussés est la répartition et l'intensité des points de pression sur la plante du pied. Les individus non chaussés sont caractérisés par une pression plus uniforme sur la plante du pied tandis que les individus chaussés présentent une pression plus forte au niveau du talon, sous la tête du deuxième et troisième métatarsiens et au niveau de l'hallux tout en présentant moins de pression dans la partie centre de l'arche latérale du pied (Figure 12). La forme bombée de la partie antérieure des souliers comprime l'avant-pied aux niveaux des têtes métatarsiennes. Cette forme a pour effet de surélever les têtes des métatarsiens I et V et de pousser vers le bas les têtes du II, du III et du IV métatarsiens, brisant la dynamique formée par l'alignement naturel des métatarsiens (Kieffert et Braun, 1990). De ce fait, les têtes métatarsiennes centrales subissent plus de charge que les têtes des deux métatarsiens externes.

Figure 12 (Modifiée de D'Août et coll., 2009)

Représentation des points de pression sur trois populations. A : Indiens non chaussés ; B : Indiens chaussés Chaussent majoritairement des sandales ou non chaussés à la maison, mais portent des chaussures de type occidental pour le travail, mais ont grandi sans être chaussés ; C : Occidentaux



Cette association entre la hauteur de l'arche longitudinale, l'emplacement et la force des pics de pression au niveau des têtes métatarsiennes entre les individus chaussés et les individus non chaussés devrait provoquer une torsion différentielle de la tête des métatarses entre les deux groupes. Le port d'une chaussure constrictive augmenterait de façon générale la hauteur de l'arche plantaire tout en modifiant l'orientation des articulations métatarso-phalangiennes et tarso-métatarsiennes. Ainsi, les individus chaussés devraient présenter une plus grande éversion des têtes métatarsiennes latérales, mais une plus petite éversion au niveau de la tête du premier métatarsien.

## **2.6) Problématique et hypothèse de recherche**

### **2.6.1) Problématique**

Le degré de torsion des métatarses varie en fonction de la locomotion chez les primates (Drapeau et Harmon, 2013), mais la plasticité du trait à l'intérieur de l'espèce humaine n'a pas été démontrée. S'il est possible de démontrer que la torsion de la tête des métatarses varie à l'intérieur de l'espèce humaine, alors l'hypothèse de la plasticité du trait pourra être appuyée. D'abord, dû à la différence de hauteur de l'arche longitudinale entre les hommes et les femmes, une première comparaison sera établie entre les sexes. Une deuxième comparaison s'attardera sur les différences qu'il peut y avoir entre deux populations ayant habité sur des terrains à topographies différentes (plat ou mixte), dû à la capacité du pied à épouser les variations du sol. Finalement, la dernière comparaison portera sur la différence de torsion entre les individus d'origine amérindienne et les individus d'origine euro-canadienne qui pourrait être provoquée par le type de soulier porté par ces deux groupes.

### **2.6.2) Hypothèses de recherche**

$H_0$  : il n'y a aucune différence de torsion de la tête des métatarses à l'intérieur de cet échantillon, que ce soit entre les sexes, entre les groupes ayant habité des terrains à topographies contrastées ou entre les individus chaussés et minimalement chaussés.

**H<sub>1</sub>** : compte tenu de l'arche plantaire plus haute chez les femmes que chez les hommes, les femmes auront un degré de torsion de la tête des métatarses latéraux plus élevé que les hommes.

**H<sub>2</sub>** : compte tenu de la capacité du pied à s'adapter aux perturbations du sol, les populations habitant sur des plaines auront un degré de torsion de la tête des métatarses latéraux moins élevés et un degré de torsion du premier métatarsien plus élevé que les populations vivant sur un terrain accidenté.

**H<sub>3</sub>** : compte tenu que le port du soulier rigide modifie la morphologie générale du pied en amincissant l'avant-pied, les individus d'origine euro-canadienne auront un degré de torsion de la tête des métatarses latéraux plus élevé et un degré de torsion du premier métatarsien moins élevé que les populations d'origine amérindienne.

## CHAPITRE 3 : MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 3.1) Description du matériel de recherche

L'échantillon pour cette étude est constitué de 166 individus qui proviennent de plusieurs sites archéologiques (Tableau I) dont certains sont très bien documentés, tandis que d'autres le sont moins :

Origine amérindienne :

- Nunavut : Native Point
- Ontario : Mclean Farm, Crystal Rock et McIvor,
- Manitoba : Sourisford Mound-Mid Antler Plain, Sourisford Mound River, Snowflake et Stott Mound
- Colombie-Britannique : Dodge Island, Parizeau Point, Boardwalk, Reservoir, Baldwin et Bella Coola

Origine euro-canadienne :

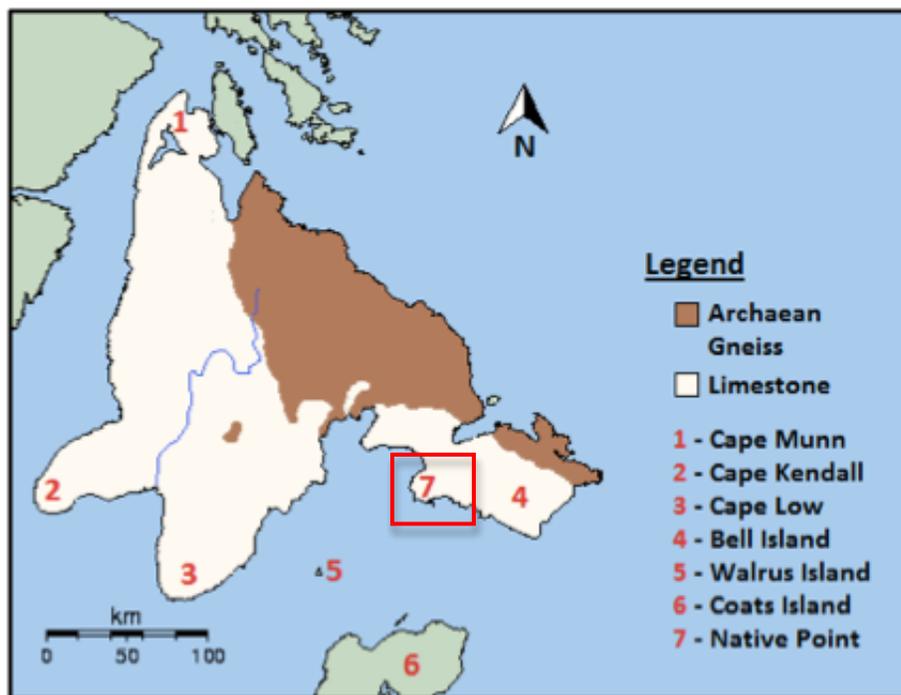
- Québec : Longueuil, cimetière Notre-Dame, cimetière St-Matthew et Bastion des Ursulines.

#### 3.1.1) Nunavut : Native Point (KkHh-1)

Exhumée au début des années 1950 par Laughlin et Collins, cette collection de 23 individus est entreposée au Musée canadien des civilisations à Ottawa où la détermination du sexe a été effectuée. Le site Native Point est situé sur la péninsule de Kivalliq de l'île Southampton dans la Baie d'Hudson et offre les vestiges de la population Inuit Sadlermiut. Cette dernière, déjà en déclin, disparut complètement à l'hiver 1902-1903 suite à une épidémie

de typhus ou de dysenterie (Merbs 1996, 1983 ; Coltrain et coll. 2004). Bien que la plupart des squelettes soient ceux ayant succombé à cette épidémie, d'autres pourraient dater de 500 ans (Merbs, 1983). La topographie de l'île démontre que le site Native Point se trouve sur un terrain de plaine calcaire (Figure 13 ; Campbell, 2006), mais non loin de montagnes, ce qui laisse sous-entendre que le peuple ait pu facilement se mouvoir sur un terrain diversifié (Manning, 1936). Ceci dit, non seulement le terrain est diversifié en terme d'altitude, mais selon Merbs (1983), le terrain est particulièrement difficile pour la marche puisque le sol est jonché de galets de calcaire donnant au sol une multitude d'angles irréguliers.

Figure 13 (Modifiée de Boucher, 2012)  
 Île de Southampton. Native Point est indiqué par le chiffre 7.



### 3.1.2) Ontario : McIvor (BfFv-1), Crystal Rock (BeFv-2), Mclean Farm

Les trois individus de sexe indéterminé du Sud de l'Ontario sont conservés au Musée canadien des civilisations à Ottawa. Datés de la fin de la période préhistorique, ces sites ont

livré les vestiges de populations préhistoriques iroquoiennes. (Dre Janet Young, communication personnelle ; Chapdelaine, 1989, Pendergast, 1981). Les sites McIvor et Crystal Rock sont situés dans le comté de Glenneville, mais peu d'informations sont disponibles pour McLean Farm. Ceci dit, le sud de l'Ontario est reconnu pour avoir une topographie du terrain généralement plate (Ministère des richesses naturelles de l'Ontario).

### **3.1.3) Manitoba : Sourisford Mound-mid Antler Plain (DgMg-42), Sourisford Mound River (DgMg-60), Snowflake (DgLp-1), Stott Mound (DlMa-1)**

Les cinq spécimens de sexe indéterminé provenant de ces quatre sites sont conservés au Musée canadien des civilisations à Ottawa. Les plaines du sud du Manitoba ont livré plus d'une centaine de tumulus dont certains n'ont malheureusement pas été fouillés ni analysés par des professionnels (Syms, 1978). Selon les données du Musée canadien des civilisations, les spécimens datent de la phase Blackduck, soit entre 800 et 1400 après le présent (Dre Janet Young, communication personnelle).

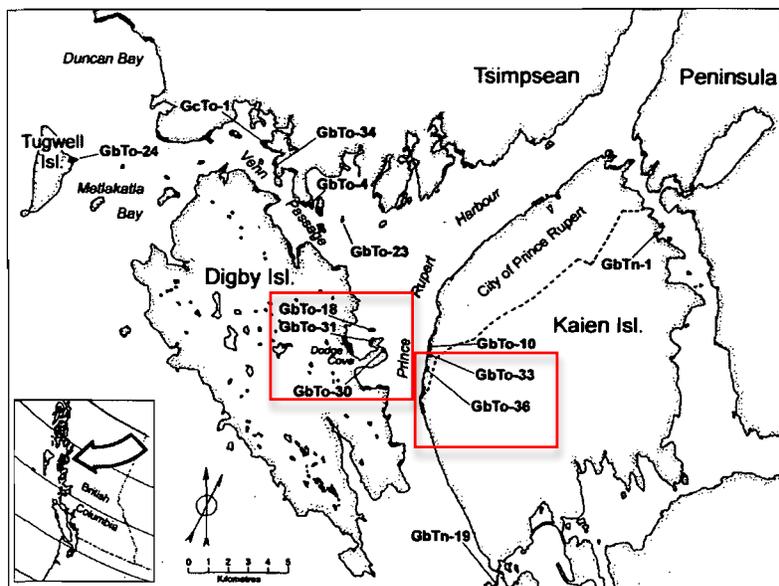
### **3.1.4) Colombie-Britannique : Dodge Island (GbTo-18), Parizeau Point (GbTo-30), Boardwalk (GbTo-31), Lachane (GbTo-33), Baldwin (GbTo-36), Bella Coola (code Borden non disponible)**

Les 19 spécimens de la Colombie-Britannique, excluant celui de Bella Coola dont peu d'informations sont disponibles, proviennent du «Prince Rupert Harbour Project» dont les fouilles débutèrent en 1966. La collection est entreposée au Musée Canadien des Civilisations où la détermination du sexe a été établie. Associés à la culture Tsimshian, les sites ont été occupés pendant environ 5000 ans (Ames et Maschner, 1999). Ils sont principalement situés sur les plaines côtières au pied des montagnes des îles Digby et Kaien (Figure 14). Les individus ont donc marché sur un terrain à la topographie variée. Concernant le site Bella Coola, l'individu, daté de la période historique, est d'origine amérindienne bien que son affiliation culturelle soit inconnue tout comme l'emplacement précis du site (Dre Janet Young,

communication personnelle) et la topographie sera considérée semblable aux autres sites de la Colombie-Britannique.

Figure 14 (Modifiée de Cybulski, 2001)

Carte géographique de l'emplacement des sites Dodge Island (GbTo-18), Parizeau Point (GbTo-30), Boardwalk (GbTo-31), Lachane (GbTo-33), Baldwin (GbTo-36)



### 3.1.5) Québec : Cimetière Notre-Dame (BjFj-112), Cimetière St-Matthew (CeEt-41), Longueuil, Bastion des Ursulines de Québec

Les cimetières de la province de Québec ont tous livré les vestiges de populations euro-canadiennes. Les collections de Longueuil et du cimetière Notre-Dame à Montréal sont conservées à l'Université de Montréal, la collection du cimetière St-Matthew, à l'Université Laval et la collection du Bastion des Ursulines au Musée canadien des civilisations où la détermination du sexe a été préalablement établie. Il existe très peu d'informations concernant la collection de Longueuil autre que l'origine euro-canadienne et la datation préindustrielle des individus (Dre Michelle Drapeau, communication personnelle). Le lieu de sépulture des individus des trois autres sites ne reflète pas nécessairement le lieu où les individus sont nés et ont grandi. En effet, le cimetière Notre-Dame a été fonctionnel entre 1691 et 1796, près de

cinquante ans après la fondation de Montréal en 1642 (Marchai, 1942). À cette époque, l'immigration de la France ou d'autres régions de la Nouvelle-France vers Montréal était très importante (Carpin, 2001 ; Naud, 1997 ; Desjardins, 1990 ; Charbonneau et coll., 1987). Quant au cimetière St-Matthew de la ville de Québec, il servait de lieu de sépulture aux protestants anglais entre 1771 et 1860, soit 12 ans après la passation de Québec aux mains des Anglais. C'est après cette victoire que les Anglais se sont alors installés définitivement dans la ville de Québec (Hare et coll. 1987). Concernant le Bastion des Ursulines de Québec, selon l'analyse morphométrique de Cybulski (1988) les individus sont d'origine Euro-canadienne. Ces squelettes ont été découverts fortuitement lors de la réparation du mur de fortification de la ville de Québec. Des historiens ont alors avancé l'hypothèse que les squelettes seraient les restes de prisonniers de guerre protestants anglais décédés entre 1746 et 1747, hypothèse qui a été supporté par la découverte du journal personnel d'un des prisonniers, le Capitaine William Pote Jr (Cybulski, 1988). L'origine géographique incertaine des individus euro-canadiens ne permet pas de mesurer les effets de la topographie du site sur la torsion de la tête des métatarses. De ce fait, entre les individus d'origine Euro-canadienne et les individus d'origine amérindienne, ce sera l'effet du type de souliers chaussés sur la torsion des têtes métatarsiennes qui sera exploré.

### **3.2) Les souliers**

Les différents groupes amérindiens qui peuplaient les terres canadiennes avant l'arrivée des Européens se différenciaient énormément les uns des autres par leurs pratiques culturelles, leur langue et leurs croyances, mais tous chaussaient le mocassin, un soulier souple fait en peau d'animaux (Robert, 1958). Ceci dit, tous les mocassins n'étaient pas fabriqués avec la même technique et les mêmes matériaux. Il est possible de distinguer les mocassins aux semelles souples et les mocassins aux semelles dures (Figure 15). Les mocassins aux semelles souples sont fabriqués à partir de cuir qui a été préalablement tanné, autant pour la semelle que pour la partie qui recouvre le pied tandis que les mocassins à semelles dures sont fabriqués à partir de cuir brut plus rigide pour les semelles, mais de cuir tanné pour la partie qui recouvre le pied (Myers, 1987).

Figure 15 (Modifiée de Peabody Museum of Archaeology and Ethnology)

En haut : mocassins à semelles souples du nord est du Canada (à gauche) et possiblement Huron (à droite). En bas : mocassins à semelles dures des plaines.



Concernant les souliers des Inuits de Southampton Island, Matthiassen (1927) décrit les bottes des Sadlermiuts (appelées mukluks) comme possédant toujours deux semelles. Parfois une sandale en peau de phoque est fixée à l'extérieur de la botte. Cet agencement pourrait fort bien rendre la botte plus constrictive et rigide. Toutefois, selon Merbs (1983), malgré ce type de bottes particulier, le terrain provoque un ou des points de stress localisés sur certaines parties du pied plutôt que sur toute la surface plantaire comme c'est le cas lorsque la marche se fait sur un terrain plat. À cet effet, chez les Sadlermiuts, ce sont principalement les hommes qui chassent, se déplaçant ainsi à plus grande vitesse sur le terrain fortement accidenté et l'auteur a identifié un taux plus élevé de pathologies au niveau des pieds chez les hommes que chez les femmes (ostéoarthrose au niveau des articulations du premier et du cinquième

métatarsien), ce qui lui fait croire que la double semelle des bottes n'augmentent pas nécessairement la rigidité de celles-ci.

À l'opposé des mocassins amérindiens, les chaussures des Euro-canadiens sont beaucoup plus rigides et constrictives (Musée virtuel du Canada) que les mocassins amérindiens à semelles dures ou souples. Les souliers en cuir étaient souvent réservés aux plus riches de la société tandis que les gens plus pauvres devaient se contenter de sabots sculptés dans une seule pièce de bois (Musée de la civilisation, Place Royale d'aujourd'hui à hier) (Figure 16). Évidemment, les chaussures européennes n'étaient pas adaptées au climat particulier des hivers canadiens. Ainsi, durant les temps les plus froids de l'année, les Euro-canadiens troquaient souvent leurs souliers pour des mocassins amérindiens (Delage, 1992). Quoiqu'il en soit, comme il a été mentionné plus tôt, une courte période de port du soulier est suffisante pour provoquer des changements morphologiques au niveau du pied (quelques semaines selon Hoffman, 1905). De plus, rien n'indique que les individus euro-canadiens inclus dans l'échantillon sont nés sur le territoire canadien ou en Europe, de sorte que le port du mocassin pourrait être survenu seulement à l'âge adulte, une fois le pied formé. Pour ces raisons, dans ce mémoire, on considérera que les individus d'origine euro-canadienne chaussaient des souliers à semelles dures comparativement au groupe amérindien.

Figure 16 (Modifiée du Musée de la civilisation (photo de gauche), modifiée du Musée virtuel du Canada (photo de droite)

Types de souliers portés par les Euro-canadiens. Sabot de bois datant du 18<sup>e</sup> siècle (à gauche) ; Chaussure à boucle (restauré) datant de 1760.



Tableau I. Synthèse des informations relatives aux sites archéologiques.

Province	Site	Code Borden	Peuple/culture	Nombre d'individus	Terrain	Types de souliers
Nunavut	Native Point	KkHh-1	Inuit	23 (10H ; 13F)	Accidenté	Mukluks
Ontario	McLean Farm	ND	Iroquois?	1I	Plaine	Mocassins
	Crystal Rock	BeFv-2	Iroquois	1I	Plaine	Mocassins
	McIvor	BfFv-1	Iroquois	1I	Plaine	Mocassins
Manitoba	Sourisford Mound-Mid Antler Plain	DgMg-42	Blackduck	1I	Plaine	Mocassins
	Sourisford Mound River	DgMg-60	Blackduck	1I	Plaine	Mocassins
	Snowflake	DgLp-1	Blackduck	2I	Plaine	Mocassins
	Stott Mound	DlMa-1	Blackduck	1M	Plaine	Mocassins
Colombie-Britannique	Dodge Island	GbTo-18	Tsimshian	1F	Mixte	Mocassins
	Parizeau Point	GbTo-30	Tsimshian	1F	Mixte	Mocassins
	Boardwalk	GbTo-31	Tsimshian	6 (5H ; 1F)	Mixte	Mocassins
	Lachane (Réservoir)	GbTo-33	Tsimshian	5 (3H ; 2F)	Mixte	Mocassins
	Baldwin	GbTo-36	Tsimshian	5 (4H ; 1F)	Mixte	Mocassins
	Bella Coola	ND	ND	1I	Mixte	Mocassins
Québec	Notre-Dame	BjFj-112	Euro-canadien	32 (3H ; 2F ; 27I)	NP	Souliers rigides
	St-Matthew	CeEt-41	Euro-canadien	63 (18H ; 13F ; 32I)	NP	Souliers rigides
	Longueuil	ND	Euro-Canadien	7 (2H ; 1F ; 4I)	NP	Souliers rigides
	Bastion des Ursulines de Québec	ND	Euro-canadien	11 (9H ; 1F ; 1I)	NP	Souliers rigides

## **3.2) Méthodes**

### **3.2.1) Collecte des données**

La collecte de données s'est déroulée en deux temps. Les mesures sur les collections entreposées au Musée canadien des civilisations avaient déjà été prélevées par Dre Michelle Drapeau dans le cadre de ses recherches. Les collections n'étaient plus disponibles pour de nouvelles analyses et tous les individus d'origine amérindienne analysés pour ce mémoire proviennent de ce musée. La collecte de données sur les individus d'origine euro-canadienne (excluant les individus du Bastion des Ursulines de Québec) devait être faite par moi. Ainsi, afin d'éliminer la probabilité que des différences de torsion des têtes métatarsiennes entre les populations puissent s'expliquer par une différence dans la prise des mesures entre les deux chercheurs, Dre Drapeau et moi avons vérifié l'existence d'une différence significative entre nous. Après avoir mesuré à tour de rôle l'angle de torsion de 50 métatarsiens (cinq droits et cinq gauches des cinq métatarsiens) nous en sommes venues à la conclusion que la différence obtenue dans nos résultats (test de T pour échantillons appariés) pouvait biaiser les conclusions de ce mémoire. Ainsi, toute la sélection et la préparation de l'échantillon étaient sous ma responsabilité, mais c'est Dre Drapeau qui a pris les mesures.

La détermination de chacun des métatarses a été faite selon White (1995). Tous les métatarses disponibles (droits et gauches) dont les articulations étaient intacts et qui ne présentaient pas de pathologies apparentes ont été sélectionnés pour fin d'analyse. Pour la prise des mesures, les métatarses étaient stabilisés par une boule de plasticine et les points tridimensionnels ont été faits à partir d'un Microscribe 3DX portable digitizer avec une précision de 0.23 mm. Le réalignement de ces points a été fait avec le logiciel GRF-ND permettant de déterminer l'axe x (dorsoplantaire), l'axe y (proximodistal) et l'axe z (médiolatéral). Les axes de la tête et de la base des métatarses ont été déterminés par la ligne que forment deux points situés au milieu de la surface articulaire, l'un plantaire et l'autre dorsal (Figure 17). Deux axes dorsoplantaires parallèles signifient qu'il n'y a pas de torsion entre la tête et la base. Un angle négatif signifie une inversion et un angle positif, une éversion (Figure 18).

Figure 17 (Modifiée de Drapeau et Harmon, 2013)

Démonstration des points pris à partir du Microscribe sur certaines bases et têtes métatarsiennes du pied gauche. La ligne reliant les deux points sur chaque métatarsien équivaut à l'axe dorsoplantaire de la tête et de la base des métatarses. Ligne blanche = 1 cm.

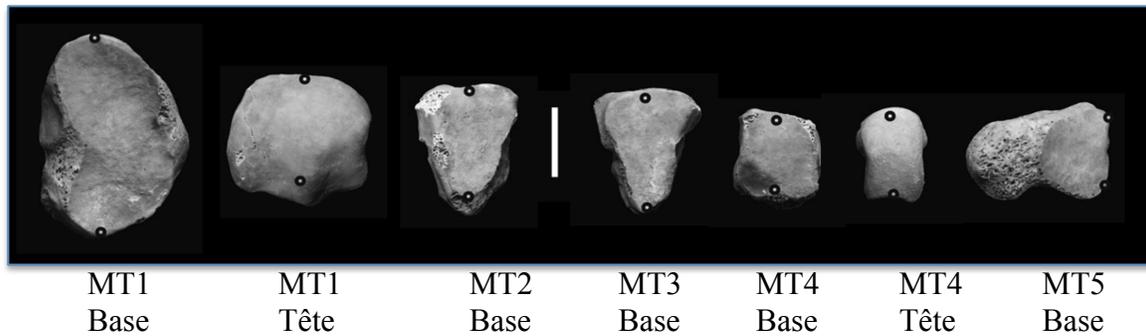
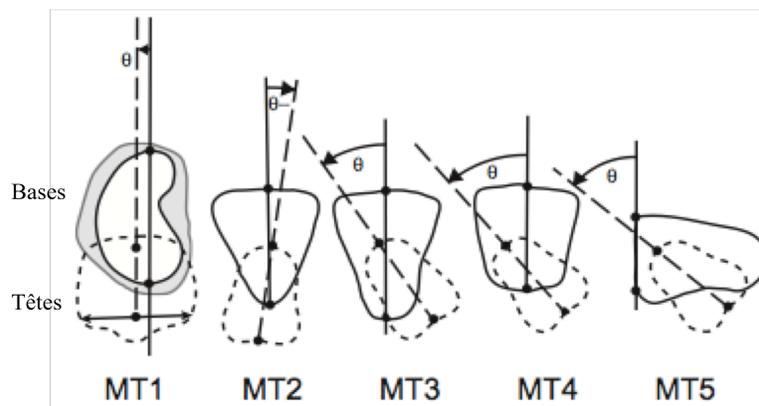


Figure 18 (modifiée de Drapeau et Harmon, 2013)

Schématisation de l'angle de torsion entre la tête et la base des métatarses d'un pied gauche. La ligne continue = l'axe dorsoplantaire de la base et la ligne pointillée = l'axe dorsoplantaire de la tête des métatarses. Le premier métatarsien ne présente pas de torsion, le deuxième présente une inversion et les trois autres une éversion.



### 3.3) Traitement des données

Les tests statistiques ont été faits à partir du logiciel SPSS 16.0.2 et les graphiques avec le logiciel Excel 12.3.5. Pour tous les tests effectués, le seuil de signification est de 0,05. L'échantillon a d'abord été testé avec le test de Kolmogorove-Smirnov pour déterminer sa normalité, test qui a été concluant. Ensuite, une comparaison avec un test de T de Student a été effectuée entre le côté gauche et le côté droit et aucune différence significative n'a été

démontrée (Tableau II). Ainsi, seulement le côté gauche a été utilisé dans les tests statistiques et lorsque le côté gauche n'était pas disponible pour un individu, l'image miroir du droit a été faite pour augmenter la taille de l'échantillon.

Tableau II. Résultats du test de T de Student pour la latéralité de chacun des métatarses.

		Nombre	Moyenne	Signification
Paire 1	MT1d	48	-5,96	0,312
	MT1g		-4,98	
Paire 2	MT2d	37	2,28	0,750
	MT2g		1,96	
Paire 3	MT3d	42	-21,80	0,414
	MT3g		-22,54	
Paire 4	MT4d	47	-23,94	0,110
	MT4g		-21,93	
Paire 5	MT5d	36	-17,68	0,743
	MT5g		-18,11	

L'étape suivante a été de rassembler en un seul groupe les individus de sites différents, mais qui ne présentaient pas de différences entre eux à l'aide d'un test T de Student ou un test U de Mann-Whitney lorsque l'échantillon disponible était trop petit (moins de 10 individus), puis de tester la différence entre les sexes afin de réduire le nombre de groupes à comparer. La différence entre les sexes a été faite après le jumelage des différents groupes puisque l'échantillon disponible de la majorité des groupes était trop petit pour faire des tests statistiques pertinents selon le sexe (Tableau I). Finalement, les groupes qui n'ont pu être rassemblés avec les tests effectués précédemment ont été comparés avec un test ANOVA suivi du test Post Hoc avec correction Bonferroni.

## CHAPITRE 4 : RÉSULTATS

### 4.1) Regroupement des différentes populations

#### 4.1.1) Topographie : plaine (Ontario/Manitoba) et mixte (Colombie-Britannique)

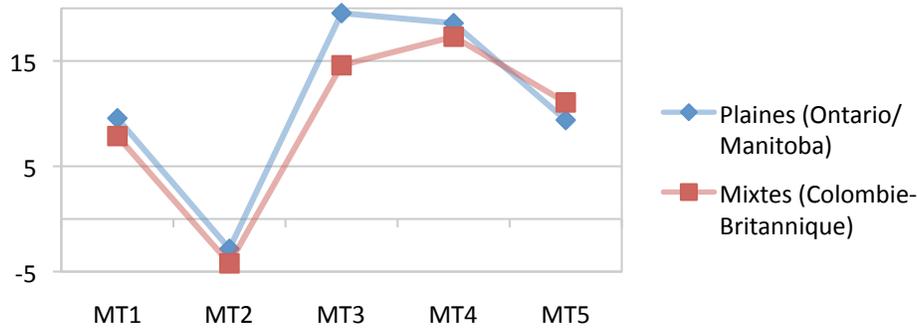
Les individus de l'Ontario et du Manitoba vivent sur un terrain à la topographie différente des individus de la Colombie-Britannique. L'échantillon disponible pour les populations vivant sur des plaines est petit comparativement à l'échantillon de la Colombie-Britannique. Aucun métatarse ne présente de différence de torsion significative, bien que la torsion du troisième approche le seuil de 0,05 ( $p=0,082$ ). Cependant puisqu'aucune différence n'est significative entre les deux groupes (Tableau III ; Figure 19), ils peuvent être regroupés en un seul groupe appelé «Amérindiens».

Tableau III. Résultats du test U de Mann-Whitney entre les individus vivant sur les plaines de l'Ontario et du Manitoba et les individus vivant sur le terrain à topographie mixte de la Colombie-Britannique

	Terrain	Population	Nombre	Moyenne	Signification
MT1	Plaines	Ontario/Manitoba	5	9,56	0,333
	Mixtes	Colombie-Britannique	18	7,87	
MT2	Plaines	Ontario/Manitoba	5	-2,83	0,557
	Mixtes	Colombie-Britannique	17	-4,22	
MT3	Plaines	Ontario/Manitoba	5	19,54	0,082
	Mixtes	Colombie-Britannique	19	14,59	
MT4	Plaines	Ontario/Manitoba	7	18,59	0,545
	Mixtes	Colombie-Britannique	18	17,30	
MT5	Plaines	Ontario/Manitoba	5	9,39	0,499
	Mixtes	Colombie-Britannique	19	11,06	

Figure 19. Graphique représentant les moyennes de la torsion des cinq têtes métatarsiennes chez les individus vivant sur les plaines de l'Ontario et du Manitoba et les individus vivant sur le terrain à topographie mixte de la Colombie-Britannique.

L'axe des ordonnées représente le degré d'angle de torsion des têtes métatarsiennes.



#### 4.1.2) Amérindiens et Inuits

Il y a une différence significative entre le groupe Amérindiens et les Inuits pour les métatarsiens III ( $p=0,004$ ), IV ( $p=0,032$ ) et V ( $p=0,000$ ) (Tableau IV ; Figure 20). Ainsi, les Inuits seront considérés comme un groupe différent de celui des Amérindiens.

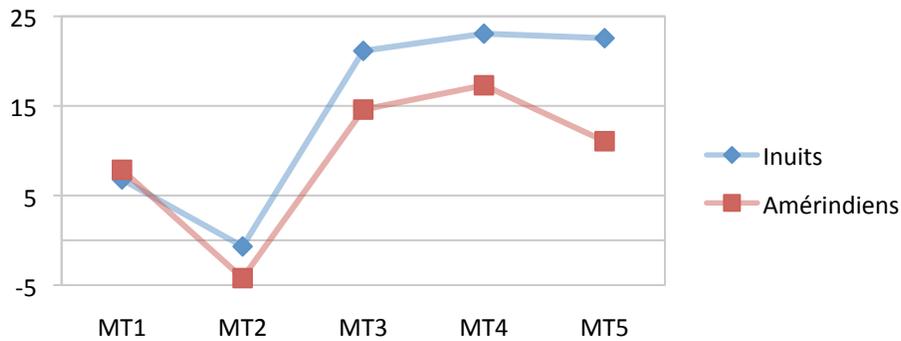
Tableau IV. Résultats du test T de Student pour les moyennes de torsion des cinq têtes métatarsiennes entre les Amérindiens et les Inuits.

Les différences significatives sont en gras.

	Populations	Nombre	Moyenne	Signification
MT1	Inuits	20	6,79	0,570
	Amérindiens	18	7,87	
MT2	Inuits	20	-0,69	0,060
	Amérindiens	17	-4,22	
MT3	Inuits	21	21,14	<b>0,004</b>
	Amérindiens	19	14,59	
MT4	Inuits	23	23,06	<b>0,032</b>
	Amérindiens	18	17,30	
MT5	Inuits	18	22,56	<b>0,000</b>
	Amérindiens	19	11,06	

Figure 22. Graphique représentant les moyennes de torsion des cinq têtes métatarsiennes entre les Amérindiens et les Inuits.

La différence entre les métatarses III, IV et V est significative. L'axe des ordonnées représente le degré d'angle de torsion des têtes métatarsiennes.



#### 4.1.3) Les Euro-canadiens

Des différences significatives sont perçues à l'intérieur du groupe des Euro-canadiens. Il y a des différences significatives du deuxième métatarse entre les individus du Bastion des Ursulines et de Longueuil ainsi qu'entre les individus du Bastion des Ursulines et du cimetière St-Matthew ( $p=0,024$  et  $0,002$  respectivement ; Tableau VI). Pour le premier métatarse, la comparaison de la population de Longueuil avec celle du cimetière St-Matthew et avec celle du Bastion des Ursulines approche le seuil de signification de  $0,05$  ( $p=0,051$  et  $0,066$  respectivement ; Tableau VI ; Figure 21). L'échantillon de Longueuil est très petit et il n'y a qu'un seul individu pour le quatrième métatarse, mais celui-ci présente une valeur très différente des moyennes des autres populations (Tableau V). Ceci dit, lorsqu'une comparaison de cet individu est faite avec la distribution des trois autres populations concernant le quatrième métatarsien (Figure 22), la valeur de torsion se retrouve à l'intérieur de la variation des individus du Bastion des Ursulines et du cimetière St-Matthew. Cet individu n'est donc pas particulièrement différent de ces deux populations.

Tableau V. Moyenne de torsion des cinq têtes métatarsiennes chez les quatre groupes d'origine euro-canadienne.

	Longueuil		Bastion des Ursulines		Notre-Dame		St-Matthew	
	Nombre	Moyenne	Nombre	Moyenne	Nombre	Moyenne	Nombre	Moyenne
MT1	5	1,37	10	7,13	18	1,56	44	4,44
MT2	3	-6,88	11	3,43	14	-0,96	40	-3,43
MT3	2	17,89	11	20,3	12	23,59	34	24,82
MT4	1	N/A	11	26,3	9	22,04	28	26,77
MT5	3	17,7	11	13,6	9	12,81	24	17,21

Tableau VI. Résultats des tests T de Student ou U de Mann-Whitney (dépendamment de la grosseur de l'échantillon) pour les moyennes de torsion des cinq têtes métatarsiennes entre les populations euro-canadiennes.

Les différences significatives sont en gras.

	Population	Notre-Dame	St-Matthew	Bastion des Ursulines
MT1	Longueuil	0,941	0,051	0,066
	Notre-Dame		0,119	0,137
	St-Matthew			0,262
MT2	Longueuil	0,313	0,340	<b>0,024</b>
	Notre-Dame		0,256	0,101
	St-Matthew			<b>0,002</b>
MT3	Longueuil	N/A	N/A	N/A
	Notre-Dame		0,571	0,157
	St-Matthew			0,061
MT4	Longueuil	N/A	N/A	N/A
	Notre-Dame		0,203	0,271
	St-Matthew			0,898
MT5	Longueuil	0,229	0,939	0,586
	Notre-Dame		0,251	0,518
	St-Matthew			0,292

Figure 21. Graphique représentant les moyennes de torsion des cinq têtes métatarsiennes entre les populations euro-canadiennes.

La différence entre la moyenne du deuxième métatarsien du Bastion des Ursulines et de St-Matthew ainsi que du Bastion des Ursulines et de Longueuil est significative. L'axe des ordonnées représente le degré d'angle de torsion des têtes métatarsiennes.

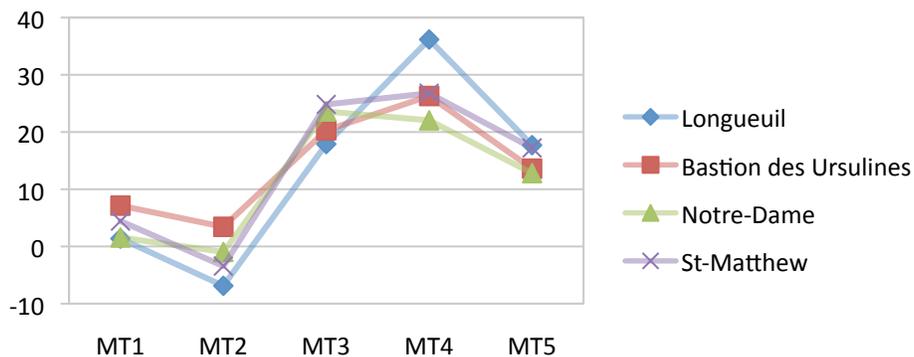
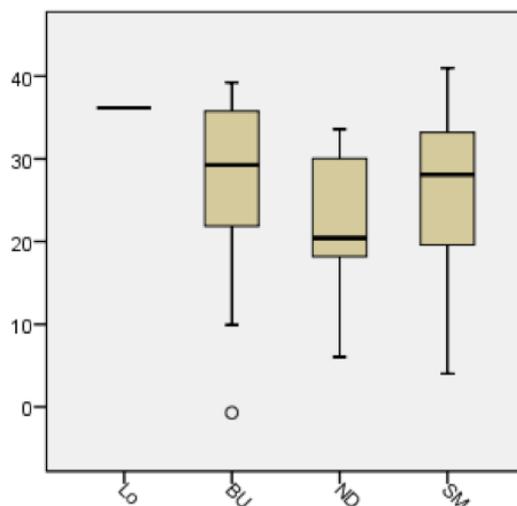


Figure 24. Boîte à moustache représentant les valeurs de torsion des têtes métatarsiennes chez les individus de Longueuil (Lo), du Bastion des Ursulines (BU), du cimetière Notre-Dame (ND) et du cimetière St-Matthew (SM).

Chaque boîte représente la distribution entre le percentile 25 et 75. La barre noire pour l'échantillon de Longueuil équivaut à la valeur de l'individu tandis que la barre noire dans les boîtes représente la médiane et les moustaches, l'étendue. Le cercle représente une valeur extrême. Les axes des ordonnées représentent le degré d'angle de torsion des têtes métatarsiennes.



Aux vis de ces résultats, la population euro-canadienne sera divisée en deux groupes. Le premier sera la collection du Bastion des Ursulines qui portera le nom «Militaires» et le deuxième inclura la collection du cimetière St-Matthew, du cimetière Notre-Dame et la

collection de Longueuil et portera le nom «Euro-canadiens». Ainsi, quatre groupes forment l'échantillon pour les prochains tests : Amérindiens, Inuits, Militaires et Euro-canadiens

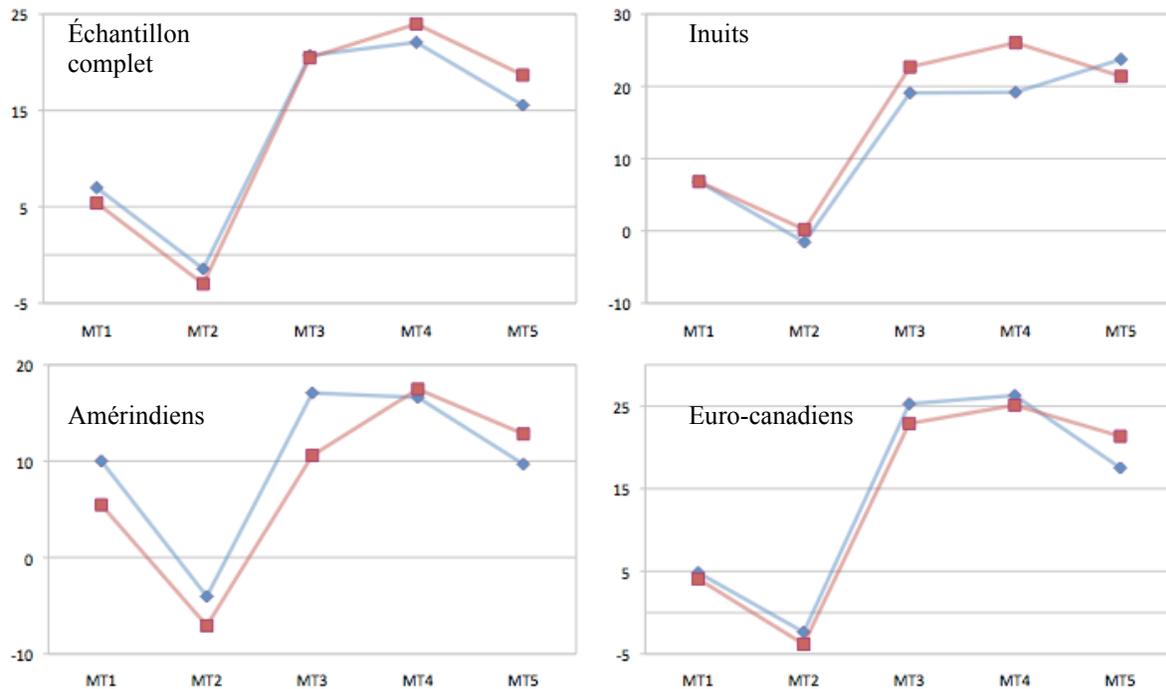
#### 4.2) Différences entre les sexes

Il n'y a pas de différences entre les sexes, tant dans l'échantillon complet que dans les groupes Amérindiens, Inuits et Euro-canadiens (Tableau VII ; Figure 23). Le test ne peut être fait pour les militaires puisque l'échantillon ne comporte qu'une seule femme (Tableau I). Bien que non significatifs, les résultats pour le premier métatarsien des Amérindiens ainsi que le quatrième des Inuits se trouvent près du seuil de signification de 0,05 (Tableau VII). Cependant, puisqu'aucune différence significative n'existe entre les hommes et les femmes, l'étude des quatre groupes populationnels peut être faite sans distinction du sexe des individus.

Tableau VII. Résultats des tests T de Student pour échantillons appariés entre les moyennes de la torsion des cinq têtes métatarsiennes entre les hommes et les femmes.

		Échantillon complet		Inuits		Amérindiens		Euro-canadiens	
		Hommes	Femmes	Hommes	Femmes	Hommes	Femmes	Hommes	Femmes
MT1	Moyenne	6,97	5,38	6,77	6,81	10,02	5,46	4,83	4,07
	Nombre	49	30	10	10	12	6	19	13
	Signification	0,297		0,650		0,061		0,744	
MT2	Moyenne	-1,44	-3,00	-1,57	0,19	-4,04	-7,08	-2,37	-3,84
	Nombre	50	30	10	10	12	5	19	14
	Signification	0,313		0,597		0,171		0,423	
MT3	Moyenne	20,71	20,47	19,09	22,68	17,08	10,60	25,27	22,89
	Nombre	48	30	9	12	13	6	17	11
	Signification	0,890		0,320		0,136		0,438	
MT4	Moyenne	22,07	23,98	19,18	26,04	16,61	17,47	26,29	25,11
	Nombre	43	30	10	13	12	6	12	8
	Signification	0,424		0,082		0,399		0,643	
MT5	Moyenne	15,55	18,67	23,74	21,38	9,69	12,83	17,52	21,34
	Nombre	43	30	9	9	13	6	12	8
	Signification	0,169		0,402		0,380		0,123	

Figure 23. Graphiques représentant les différences de moyennes de la torsion des cinq métatarses entre les hommes (en bleu) et les femmes (en rouge) pour l'échantillon complet, les Amérindiens, les Inuits et les Euro-canadiens. Les axes des ordonnés représentent le degré d'angle de torsion des têtes métatarsiennes.



### 4.3) Différences entre les groupes

- Métatarsien I : les Amérindiens ont une plus grande éversion que les Euro-Canadiens ( $p=0,010$ ) (Tableau VIII ; Figure 24A et B).
- Métatarsien II : La torsion moyenne présente une éversion chez les Militaires ( $3,43^\circ$ ) comparativement à une inversion chez les trois autres groupes (Inuits :  $-0,69^\circ$ , Amérindiens :  $-3,90^\circ$ , Euro-canadiens :  $-3,00^\circ$ ) (Tableau IX). Ceci dit, la différence de moyenne est significative uniquement entre les Militaires et les Amérindiens ( $p=0,011$ ) et entre les Militaires et les Euro-canadiens ( $p=0,013$  ; Tableau VIII ; Figure 24A et B).

- Métatarsien III : les Amérindiens présente une éversion significativement plus petite que les Inuits ( $p=0,036$ ) et que les Euro-Canadiens ( $p=0,000$  ; Tableau VIII ; Figure 24A et B).
- Métatarsien IV : les Euro-Canadiens ont une éversion significativement plus grande que les Amérindiens ( $p=0,005$  ; Tableau VIII ; Figure 24A et B).
- Métatarsien V : les Inuits présentent une éversion significativement plus grande que les trois autres groupes (Amérindiens :  $p=0,000$ , Militaires :  $p=0,029$ , Euro-canadiens :  $p=0,045$  ; Tableau VIII ; Figure 24A et B).

Tableau VIII. Résultats des tests ANOVA et du test Post-Hoc avec correction Bonferroni pour les moyennes de torsion des cinq têtes métatarsiennes entre les quatre groupes de l'échantillon. Les différences significatives sont en gras.

ANOVA		Bonferroni			
	Signification		Amérindiens	Militaires	Euro-canadiens
MT1	<b>0,006</b>	Inuits	1,000	1,000	0,212
		Amérindiens		1,000	<b>0,010</b>
		Militaires			0,483
MT2	<b>0,007</b>	Inuits	0,589	0,487	0,935
		Amérindiens		<b>0,011</b>	1,000
		Militaires			<b>0,013</b>
MT3	<b>0,000</b>	Inuits	<b>0,036</b>	1,000	0,461
		Amérindiens		0,322	<b>0,000</b>
		Militaires			0,470
MT4	<b>0,006</b>	Inuits	0,281	1,000	1,000
		Amérindiens		0,070	<b>0,005</b>
		Militaires			1,000
MT5	<b>0,000</b>	Inuits	<b>0,000</b>	<b>0,029</b>	<b>0,045</b>
		Amérindiens		1,000	0,077
		Militaires			1,000

Tableau IX. Moyenne de torsion des cinq têtes métatarsiennes chez les quatre groupes de l'échantillon

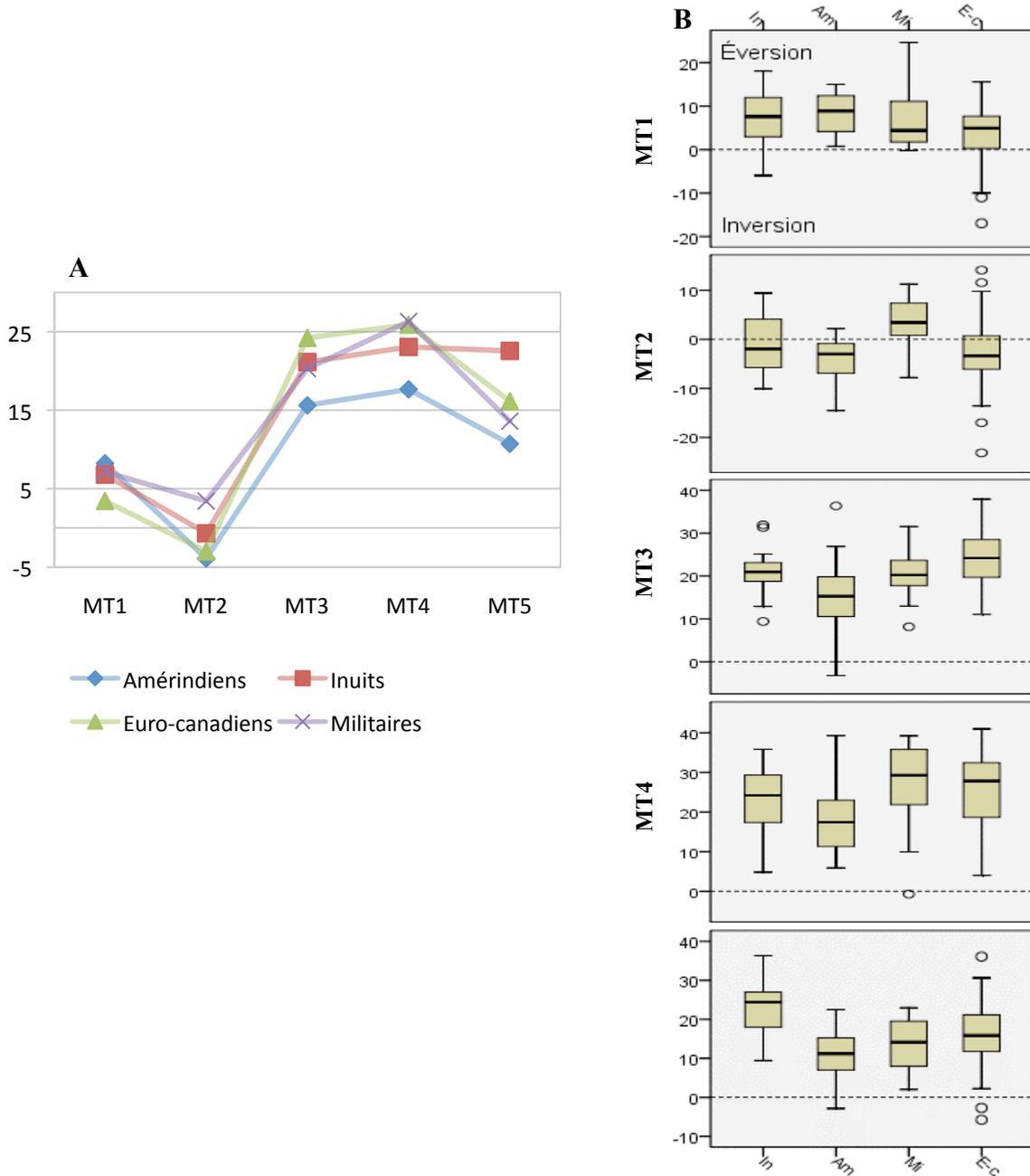
	Inuits		Amérindiens		Militaires		Euro-canadiens	
	Nombre	Moyenne	Nombre	Moyenne	Nombre	Moyenne	Nombre	Moyenne
MT1	20	6,79	23	8,23	10	7,13	67	3,44
MT2	20	-0,69	22	-3,90	11	3,43	57	-3,00
MT3	21	21,14	24	15,62	11	20,30	48	24,22
MT4	23	23,06	25	17,66	11	26,30	38	25,90
MT5	18	22,56	24	10,71	11	13,60	36	16,15

#### 4.4) Résumé des résultats

Selon l'échantillon étudié, il n'y a pas de différences dans la torsion des têtes métatarsiennes en fonction de la topographie du terrain des individus. De plus, aucune différence entre les sexes n'a pu être établie. Bien que les observations qui suivent ne soient pas toutes significatives, les Amérindiens ont systématiquement des moyennes extrêmes pour tous les métatarsiens, lorsqu'ils sont comparés aux autres groupes. Leur premier est le plus éversé, leur deuxième le plus inversé tandis que leur troisième, quatrième et cinquième sont les moins éversés. Les Inuits se démarquent par un cinquième métatarsien très éversé et une moyenne de torsion du troisième métatarsien différente de celle des Amérindiens. Les Militaires sont particulièrement différents par leur deuxième métatarsien qui présente une moyenne en éversion alors que la moyenne est en inversion pour les trois autres groupes. Finalement, les Euro-canadiens se distinguent par une faible éversion de leur premier métatarsien, mais une forte éversion de leur troisième.

Figure 26. A : Graphiques représentant les différences de torsion des têtes métatarsiennes des quatre groupes de l'échantillon. B : Boîte à moustache représentant les valeurs de torsion des têtes métatarsiennes chez les Inuits (In), les Amérindiens (Am), les Militaires (Mi) et les Euro-canadiens (E-c).

La ligne pointillée est à zéro et n'équivaut à aucune torsion, des valeurs positives étant une éversion et des valeurs négatives, une inversion. Chaque boîte représente la distribution entre le percentile 25 et 75. La barre noire dans les boîtes représente la médiane et les moustaches, l'étendue. Les cercles représentent les valeurs extrêmes. Les axes des ordonnés représentent le degré d'angle de torsion des têtes métatarsiennes.



## CHAPITRE 5 : DISCUSSION ET CONCLUSION

Drapeau et Harmon (2013) ont démontré que l'angle de torsion des têtes métatarsiennes reflète le mode de locomotion des primates. Chez l'humain, l'arche longitudinale du pied cause une inversion de l'arche transverse, résultant en une éversion des têtes des métatarsiens latéraux. L'objectif de ce mémoire est de tester l'hypothèse de la plasticité de la torsion des têtes métatarsiennes chez l'humain. Pour ce faire, la torsion des cinq métatarsiens a été comparée entre les sexes, entre individus habitant des terrains à topographie différente et finalement entre individus aux pratiques culturelles différentes quant au port du soulier.

### 5.1) Topographie et dimorphisme sexuel

Les résultats obtenus réfutent les hypothèses  $H_1$  (compte tenu de l'arche plantaire plus haute chez les femmes que chez les hommes, les femmes auront un degré de torsion de la tête des métatarses latéraux plus élevé que les hommes) (Tableau VII) et  $H_2$  (compte tenu de la capacité du pied à s'adapter aux perturbations du sol, les populations habitant sur des plaines auront un degré de torsion de la tête des métatarses latéraux moins élevé et un degré de torsion du premier métatarsien plus élevé que les populations vivant sur un terrain mixte) (Tableau III).

Concernant la différence entre les sexes, l'étude de Wunderlich et Cavanagh (2001) a démontré que l'arche longitudinale des femmes, en valeur normalisée selon la longueur du pied, est significativement plus haute que celle des hommes. Pour un pied de 257 mm de longueur, le pied des hommes a une arche plantaire moyenne de 28,94 mm et celui des femmes, de 30,53 mm. Les hommes et les femmes présentent donc une différence de 1,59 mm dans la hauteur de leur arche plantaire. Ceci dit, l'étude de Wunderlich et Cavanagh (2001) a été faite sur une population moderne, constituée de femmes ayant possiblement porté des souliers très étroits et même à talons hauts. Les différences que ces auteurs ont observées dans

leur échantillon peuvent ne pas être représentatives de la différence de la hauteur de l'arche plantaire entre les hommes et les femmes pour les populations de la période préindustrielle, qui pourrait être beaucoup moins grande. Une autre possibilité est que la différence de hauteur de l'arche longitudinale entre les deux sexes est trop petite pour être perceptible dans la torsion des têtes métatarsiennes selon l'échantillon étudié et la technique de collecte de données qui a été utilisée pour cette étude. Il est possible qu'une étude avec un échantillon plus grand ou une étude permettant une mesure plus précise de l'angle de torsion puisse permettre de percevoir les différences entre les sexes.

Il n'y a aucune différence entre les populations vivant en terrain montagneux versus celles vivant sur une plaine. Cependant, une dénivellation différente du sol n'affecte pas nécessairement la surface de ce sol. Que le terrain soit plat ou montagneux, la façon dont le pied se dépose au sol est fort probablement identique. Si des changements morphologiques sont associés à la topographie, peut-être seraient-ils davantage localisés aux autres os de la jambe et non pas à ceux du pied? Quoi qu'il en soit, selon l'échantillon disponible pour cette étude, il est impossible d'affirmer que la topographie puisse avoir un effet significatif sur la torsion des têtes métatarsiennes.

## **5.2) Différences entre les groupes**

Des différences significatives ont été observées entre les groupes Amérindiens, Inuits, Militaires et Euro-canadiens. Les Euro-canadiens et les Amérindiens sont les deux groupes les plus différents l'un de l'autre (Tableau X). Les Inuits se distinguent particulièrement avec leur cinquième métatarsien qui est nettement plus éversé que celui des trois autres groupes (Tableau VIII et X). Quant aux Militaires, ils se distinguent par l'éversion modeste de leur deuxième métatarsien (Tableau VIII, IX et X). Nous avons aussi obtenu un résultat inattendu, les Amérindiens et les Inuits ayant des différences significatives entre leurs troisième et cinquième métatarsiens (Tableau VIII et X).

Tableau X. Métatarsiens présentant des différences significatives entre les groupes quant à la moyenne de torsion des têtes métatarsiennes.

	Euro-canadiens	Militaires	Inuits
Militaires	MT2		
Inuits	MT5	MT5	
Amérindiens	MT1 ; MT3 ; MT4	MT2	MT3 ; MT5

### 5.2.1) Amérindiens et Euro-canadiens

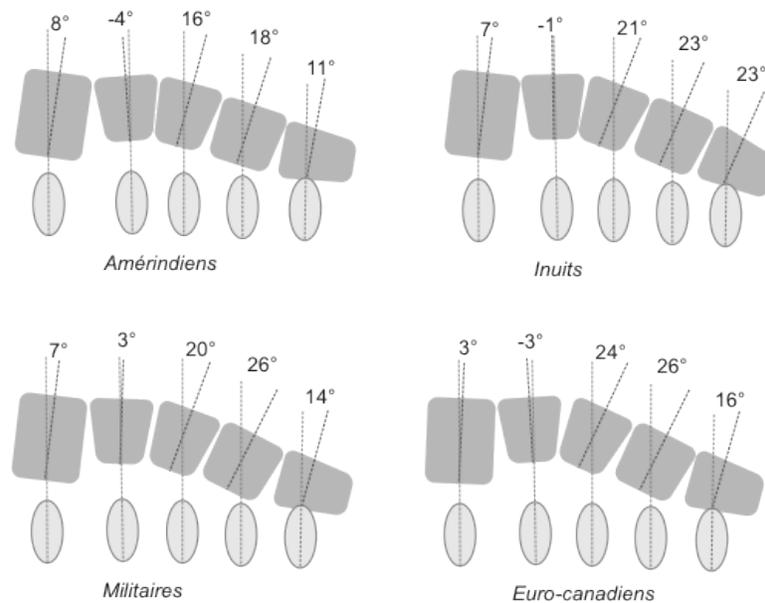
Les résultats obtenus pour la différence de torsion de la tête des métatarses vont dans le sens attendu puisque les populations ne portant pas de chaussures (et, par extension, celles portant des chaussures non restrictives pour le pied, c'est-à-dire les Amérindiens) ont une arche longitudinale plus basse que ceux portant des chaussures rigides (c'est-à-dire les Euro-canadiens ; Figure 25).

Les Euro-canadiens ont une éversion de la tête du premier métatarsien plus faible et une plus grande éversion des trois métatarsiens latéraux que les Amérindiens (Figure 25). Tel qu'expliqué précédemment, les souliers ont tendance à amincir l'avant-pied. En empêchant l'avant-pied de s'évaser, l'articulation tarso-métatarsienne du premier métatarsien est orientée plus antérieurement qu'antéro-médialement empêchant le léger basculement médiolatéral de l'axe dorsoplantaire de la base du métatarsien (Figure 11). L'axe dorsoplantaire de la base du premier métatarsien étant plus perpendiculaire au sol, la tête du métatarsien nécessite une moins grande éversion pour voir sa surface plantaire s'appuyer complètement au sol. Ces résultats viennent corroborer une récente étude de Lautzenheiser et Kramer (2013) qui tend à démontrer que les individus ayant une arche plantaire plus basse présentent aussi un gros orteil plus en abduction que les individus à l'arche plantaire haute qui ont le gros orteil plus en adduction. Quant au deuxième métatarsien, il présente, à un degré près, le même angle d'inversion. Ce résultat n'est pas particulièrement surprenant puisqu'une arche plantaire haute ou basse a peu d'effet sur le degré de basculement de ce métatarsien se trouvant au point le plus haut de l'arche, son axe dorsoplantaire restant relativement perpendiculaire au sol. Les

troisième, quatrième et cinquième métatarsiens possèdent un degré d'éversion plus élevé chez les Euro-canadiens, seul le cinquième n'étant pas significativement différent. Ces éléments corroborent les observations faites par Hoffman (1905) et D'Août et coll. (2009) sur la différence entre la hauteur de l'arche plantaire entre les individus chaussés et les individus non chaussés. Ces résultats viennent aussi corroborer l'hypothèse de Drapeau et Harmon (2013) à l'effet qu'une grande éversion du troisième métatarsien est représentative de la présence d'une arche longitudinale. Pour toutes ces raisons, les résultats obtenus dans ce mémoire corroborent les effets notés du soulier sur la morphologie du pied, en particulier sur la position des orteils et de la hauteur de l'arche plantaire, ce qui a un impact certain sur la torsion des têtes métatarsiennes. De ce fait, l'hypothèse **H<sub>3</sub>** (compte tenu que le port du soulier rigide modifie la morphologie générale du pied en amincissant l'avant-pied, les individus d'origine euro-canadienne auront un degré de torsion de la tête des métatarses latéraux plus élevé et un degré de torsion du premier métatarsien moins élevé que les populations d'origine amérindienne) est corroborée.

Figure 25 (modifiée de Drapeau et Harmon, 2013)

Schématisation de l'angle de torsion des têtes métatarsiennes et de la position des métatarses dans le pied.



### 5.2.2) Les Militaires

Les résultats relatifs au deuxième métatarse des Militaires sont étonnants (Tableau VI, VIII, IX et X ; Figure 25), d'autant plus que la torsion de ce métatarse devrait être la moins affectée par les variations de la hauteur de l'arche longitudinale. Les résultats attendus pour cette population étaient que les valeurs se retrouveraient à l'intérieur de la variation des Euro-canadiens. Il est difficile de croire que la génétique puisse avoir un effet sur la torsion des têtes métatarsiennes concernant cette population puisque ce sont des militaires anglais protestants et qu'ils présentent une différence significative avec la population protestante anglaise mais non militaire du cimetière St-Matthew (pour le deuxième métatarse ; Tableau VI). Une cause plastique à cette différence est tout autant difficile à argumenter. Tout d'abord, l'attribution des squelettes du Bastion des Ursulines à des militaires est circonstancielle (voir section 3.1.5), c'est-à-dire qu'aucun objet militaire n'a été retrouvé sur le site ni directement associé aux squelettes. Ceci dit, même s'il s'agit bien de militaires, il y a peu de raisons de croire que leur chaussure était assez différente de celle des autres Euro-canadiens pour produire des différences. Peu d'informations sont disponibles, autres que celle que les militaires anglais de l'époque portaient des bottes de type Hessian (bottes en cuir montant jusque sous le genou et sans talon haut) (The Museum of Leathercraft). Rien ne laisse croire que ces bottes soient plus rigides ou constrictives que les souliers de cuir européens ou les sabots. Quoiqu'il en soit, si tel est le cas, ces bottes commencent à être portées au début de l'âge adulte, moment où l'os ne répond plus ou répond beaucoup plus lentement aux charges biomécaniques par des modifications de sa structure macroscopique. De plus, les résultats concernant les quatre autres métatarsiens ne semblent pas présenter les caractéristiques d'une arche plantaire plus haute. Bien que ces différences ne soient pas significatives, la moyenne de torsion du premier métatarsien se rapproche de celle des Amérindiens et des Inuits, la moyenne du troisième métatarsien est près de celle des Inuits, la moyenne du quatrième métatarsien se trouve près de celle des Euro-canadiens et la moyenne du cinquième se trouve entre celles des Amérindiens et des Euro-canadiens (Figure 24A). Ainsi, selon les résultats obtenus, les Militaires possèdent un pied avec l'hallux plus en abduction, une arche plantaire très haute compte tenu du degré d'éversion de leur deuxième métatarse mais avec un pied latéral qui n'est pas plus inversé que celui des Euro-canadiens. De plus, si on compare la distribution du deuxième métatarsien des

Militaires avec celui des Euro-canadiens, bien que la moyenne de ces derniers soit en inversion, plusieurs individus du groupe Euro-canadiens présentent des valeurs en éversion (le quart des individus; Figure 24B). Ainsi, concernant les individus chaussés de cet échantillon (c'est à dire les Euro-canadiens), il n'est pas rare de voir des valeurs en éversion pour le deuxième métatarsien. Pour toutes ces raisons, il est plausible que les résultats non attendus pour les Militaires résultent d'un échantillon biaisé en raison de sa petite taille (n=11).

### **5.2.3) Les Inuits**

Les résultats obtenus pour les Inuits ne sont pas ceux qui étaient attendus. Étonnamment, l'éversion du troisième métatarsien est significativement plus élevée que celle des Amérindiens (Tableau VIII et X), ce qui tend à démontrer une arche longitudinale plus haute chez les Inuits que chez les Amérindiens. La plus grande surprise concerne l'éversion de leur cinquième métatarsien significativement plus élevée que chez les trois autres groupes (Tableau VIII et X), ce qui entraîne une forme particulière de l'arche transverse (Figure 25). Cette forme particulière pourrait être le résultat de l'héritage génétique des Inuits. Ceci dit, dans le cadre de cette étude, l'apport de la génétique au niveau de la torsion de la tête des métatarsiens est impossible à démontrer. Par contre, les individus du Bastion des Ursulines et les individus du cimetière St-Matthew présentent une torsion significativement différente du deuxième métatarsien alors qu'ils sont tous deux des groupes de protestants anglais ayant probablement une génétique assez similaire, ce qui laisse croire que les différences observées entre les groupes sont probablement de nature plastique. Quoiqu'il en soit, puisque l'apport génétique ne peut pas être démontré, une explication plastique doit être proposée. Chez les Inuits Sadlermiuts (seuls Inuits constituant l'échantillon), autant les bottes portées que la surface du sol sont particulières. Comme il a été mentionné plus tôt, les bottes des Sadlermiuts sont fabriquées avec deux semelles, parfois entourées d'une sandale faite en peau de phoque. Selon Merbs (1983), les pathologies observées au niveau du pied entre les hommes et les femmes tendent à démontrer que la composition particulière de ces bottes ne les rend pas nécessairement plus rigides et constrictives. Malgré tout, si nous supposons que ces bottes sont plus rigides et constrictives, les Inuits devraient présenter des valeurs de torsion semblables à celles des Euro-canadiens. Effectivement, concernant le deuxième, troisième et quatrième

métatarsien, les Inuits présentent des valeurs plus près de celles des Euro-canadiens que de celles des Amérindiens, ce qui signifie une arche longitudinale plus haute. Par contre, leur premier métatarsien présente une éversion semblable à celle des Amérindiens, ce qui indique un gros orteil plus en abduction (qu'un soulier rigide tend à restreindre), caractérisant les arches plantaires plus basses. Finalement, leur cinquième métatarsien n'est comparable à aucun des autres groupes. Cette association entre une morphologie de l'hallux qu'une chaussure constrictive ne permet pas d'avoir, une morphologie des métatarsiens II, III et IV provoqué par le port de chaussures constrictives et une morphologie particulière du cinquième métatarsien nous fait croire que la botte inuite n'est pas le facteur principal influençant la morphologie de l'arche transverse du pied de cette population. Ainsi, nous proposons de considérer l'effet du sol très accidenté des Inuits Sadlermiuts sur le degré de torsion de leurs têtes métatarsiennes. Dans le cas de la topographie qui a été décrite plus tôt (section 5.1.1), quelle que soit la dénivellation du sol, sa surface reste plane. Dans le cas des Sadlermiuts, même si la topographie du terrain est plane, la surface du sol est très accidentée. Rappelons que pour qu'un mode de locomotion soit optimal, la surface plantaire du pied doit épouser parfaitement la surface du sol et c'est la souplesse des tarse lors de la pose du talon au sol qui donne cette capacité au pied. De plus, Merbs (1983) a mentionné que le terrain des Inuits était tellement difficile pour la marche qu'il devait constamment être alerte pour éviter de se tordre la cheville. Chez un peuple qui naît, grandit et vit sur ce type de terrain, qui se nourrit principalement des produits de la chasse (Merbs, 1983) et qui doit avoir les yeux rivés sur la proie et non sur le sol, comment s'adapte-t-il à son environnement? Si on considère que les bottes sont assez souples pour permettre au peuple inuit d'avoir un hallux plus en abduction, les pieds des Inuits doivent aussi sentir toutes ces perturbations du sol. Ainsi, comme hypothèse pour expliquer la forme particulière de l'arche transverse, nous suggérons que la partie latérale du pied est en forte éversion, permettant à toute la surface plantaire de se déposer sur les galets, et donc pas seulement la partie plus médiale du pied, ce qui occasionnerait une pression inégale du poids du corps sur la surface plantaire. Évidemment, cela reste une hypothèse et des recherches plus approfondies seront nécessaires pour la tester.

### 5.3) Conclusion et perspectives de recherche

Bien que la composante génétique du trait ne puisse pas être totalement réfutée, nous croyons que la torsion de la tête des métatarses est un trait sensible à l'environnement biomécanique du pied. Il est clair qu'entre les Amérindiens et les Euro-canadiens, le port ou non de la chaussure restrictive a des répercussions sur la torsion des têtes métatarsiennes puisque les résultats obtenus reflètent les différences observées dans la morphologie du pied entre les individus aux types différents de chaussures. Il a été proposé que la morphologie particulière de l'arche transverse des Inuits Sadlermiuts résulte de la surface particulière du sol. Dans le cas des Militaires, avec le petit échantillon disponible, il est difficile d'identifier une cause tant génétique que plastique à l'éversion de la tête du deuxième métatarsien. Dans tous les cas, des recherches subséquentes seront nécessaires pour corroborer ou réfuter les nouvelles hypothèses avancées. Pour démontrer une véritable cause plastique à la torsion des têtes métatarsiennes, il serait intéressant de faire la même étude sur une population génétiquement homogène avec une connaissance précise de leur habitude quant au port du soulier. D'Août et coll. (2009) ont démontré des différences dans la morphologie du pied entre des Indiens urbains majoritairement chaussés de souliers de type occidental et des Indiens ruraux non chaussés ou minimalement chaussés avec des sandales. Ce sont là deux groupes ayant une génétique similaire mais avec des habitudes culturelles différentes, ce qui serait idéal pour tester la plasticité de la torsion des têtes métatarsiennes. De plus, pour optimiser le lien entre la hauteur de l'arche longitudinale, la morphologie de l'axe transverse et de la torsion des têtes métatarsiennes, une mesure préalable de la hauteur de l'arche longitudinale serait nécessaire.

Concernant les Inuits, il serait intéressant de comparer les individus du site de Native Point avec une autre population inuite qui n'habite pas sur un terrain accidenté comme celui des Sadlermiuts de cet échantillon, mais qui porte le même type de bottes. Si on parvenait à la même observation au niveau de l'arche transverse, l'hypothèse de l'adaptation au sol pourrait être réfutée. Dans ce cas, des recherches plus approfondies devraient être faites sur la rigidité et l'effet constrictif de leurs bottes. Une comparaison entre une population inuite chaussant des mukluks et une population inuite chaussant un autre type de bottes sera nécessaire.

Finalement, dans le cas où deux populations inuites ne chaussant pas le même type de bottes présentaient la même morphologie de l'arche transverse, l'incidence de la génétique sur le trait devra alors être considérée.

Concernant les Militaires, les résultats obtenus nous ont rendus perplexes. D'abord par le fait que les Militaires sont génétiquement proches des individus du cimetière St-Matthew avec qui ils ont une différence de torsion du deuxième métatarsien et ensuite par le fait que les Militaires présentent des résultats contradictoires entre l'angle de torsion observé et l'angle de torsion attendu pour les populations chaussées au niveau du premier, troisième, quatrième et cinquième métatarsien. De ces faits, une explication génétique tout comme une explication plastique seraient hasardeuse. Dans ce cas-ci, il serait intéressant d'étudier l'angle de torsion des têtes métatarsiennes chez plus d'une population de militaires datant de cette époque tout en ayant de plus grands échantillons. Si des militaires avec des génétiques différentes présentent le même modèle particulier d'éversion du deuxième métatarsien, leur mode de vie pourrait alors fort bien avoir une influence sur la morphologie du pied. Il serait dans ce cas-ci intéressant d'étudier l'effet d'un soulier plus restrictif porté à l'âge adulte alors que le type de soulier porté durant l'enfance est différent. Le résultat obtenu indiquerait qu'un pied, même à l'âge adulte, a la capacité de se transformer sous l'effet d'une pression environnementale.

Il aurait été intéressant de voir si les différences de mobilité a un effet sur la torsion des métatarses. Par exemple, les individus de l'Ontario et du Manitoba habitent sur des plaines, mais leur mode de subsistance est différent (chasseurs-cueilleurs pour les premiers et horticulteurs pour les deuxièmes). Malheureusement, l'échantillon disponible ne se prêtait pas à cette comparaison, le nombre d'individus disponibles pour ces deux régions étant de trois et cinq respectivement (Tableau I), dont certains ont des métatarses manquants.

Du point de vue de la collecte de données, bien que les différences intra-individuelles détectées dans l'étude de Drapeau et Harmon (2013) ne soient pas assez importantes pour influencer les résultats, il n'en reste pas moins qu'une décision par le chercheur doit être faite lors de la prise des points servant à la détermination de l'axe dorsoplantaire des surfaces

articulaires. Il serait intéressant d'élaborer de nouvelles techniques de collecte de données qui pourraient réduire la nécessité de décisions humaines lors de la prise des mesures.

Finalement, il serait pertinent de vérifier la torsion des têtes métatarsiennes selon la masse corporelle des individus et en vérifiant s'il existe un lien entre la longueur des métatarsiens et l'angle de torsion qui lui est associé.

Cette recherche est une étude préliminaire sur l'adaptation plastique des métatarsiens aux effets de l'environnement externe. Comme il vient d'être mentionné, des recherches subséquentes sont nécessaires pour corroborer ou réfuter les résultats obtenus dans ce mémoire. Ceci dit, ces résultats tendent à démontrer que le pied a les capacités de s'adapter à son environnement et que la torsion des têtes métatarsiennes reflète le type de soulier porté par les individus.

## BIBLIOGRAPHIE

- Aiello L, Dean C. 1990. An Introduction to Human Evolutionary Anatomy. London : Academic Press. 596 p.
- Ames KM, Maschner HDG. 1999. Peoples of the Northwest coast : their archaeology and prehistory. Thames and Hudson, London. 288 p.
- Ashizawa K, Kumakura C, Kusumoto A, Narasaki S. 1997. Relative foot size and shape to general body size in Javanese, Filipinas and Japanese with special reference to habitual footwear types. *Annals of Human Biology*. 24 : 117-129
- Baba K. 1975. Foot measurement for shoe construction with reference to the relationship between foot length, foot breadth, and ball girth. *Journal of Human Ergology*. 3 : 149-156
- Barker SL, Scheuer JL. 1998. Predictive value of human footprints in a forensic context. *Medicine Science Law*. 38 : 341-346
- Bénichou J, Libotte M. 2002. Le livre du pied et de la marche. Paris : Odile Jacob. 334 p.
- Bernard M, Hueber A. 1968. Connaissance du pied masculin adulte. *Technicuir*. 7 : 135-158
- Bonnel F, Claustre J. 1990. «Anatomie et biomécanique des têtes métatarsiennes». Dans Claustre J, Simon L. *Les métatarsalgies statiques*. Paris : Masson. p. 14-18
- Boucher KLM. 2012. A comparative ontogenetic study of biomechanical adaptations in the long bones of south african Khoisan and Sadlermiut inuit. *Mémoire de maîtrise*. The University of Western Ontario. 231 p.

Campbell M. 2006. Monitoring condition, feeding habits and demographic parameters of island bound barren-ground caribou (*Rangifer tarandus groenlandicus*) Southampton Island, Nunavut. Government of Nunavut, Department of Environment. Final status report : 3. Iqaluit, 18 p.

Carpin G. 2001. Le réseau du Canada : Étude du mode migratoire de la France vers la Nouvelle-France 1628-1662. Paris : Les Presses de l'Université Paris-Sorbonne. 552 p.

Carter DR, Orr TE, Fyhrie DP, Schurman DJ. 1987. Influences of mechanical stress on prenatal and postnatal skeletal development. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 219 : 237-250

Case DT, Ross AH. 2007. Sex determination from hand and foot bone lengths. *Journal of Forensic Science*. 52 : 264-270

Cavalli-Sforza LL. 1996. Gènes, peuples et langues. Paris : Odile Jacob. 322 p.

Cavalli-Sforza LL. 2005. Évolution biologique, évolution culturelle. Paris : Odile Jacob. 253 p.

Cavalli-Sforza LL, Bodmer WF. 1971. The genetics of human populations. San Francisco : W.H. Freeman. 965 p.

Cavalli-Sforza LL, Cavalli-Sforza F. 1995. The great human diasporas : the history of diversity and évolution. Massachusetts : Reading, Addison-Wesley Publishing Company. 300 p.

Cavalli-Sforza LL, Feldman MW. 1981. Cultural transmission and evolution : a quantitative approach. Princeton, N.J. : Princeton University Press. 388 p.

- Cavalli-Sforza LL, Menozzi P, Piazza A. 1994. The history and geography of human genes. Princeton, N.J. : Princeton University Press. 518 p.
- Chapdelaine C. 1989. Le site Mandeville à Tracy : variabilité culturelle des Iroquoiens du Saint-Laurent. Montréal : Recherches amérindiennes au Québec. 295 p.
- Charbonneau H, Guillemette A, Légaré J, Desjardins B, Landry Y, Nault F. 1987. Naissance d'une population. Les Français établis au Canada au XVII<sup>e</sup> siècle. Montréal : Presses de l'Université de Montréal. 232 p.
- Cheskin MP. 1987. The complete handbook of athletic footwear. New-York : Fairchild Publications. 235 p.
- Chevalier JM. 2001. Appareil locomoteur. Paris : Flammarion médecine-sciences. 475 p.
- Claustre J, Bonnel F. 1990. «L'espace inter-capito-métatarsien : Anatomie et biomécanique». Dans Claustre J, Simon L. Les métatarsalgies statiques. Paris : Masson. p. 41-48
- Coltrain, JB. 2004. Sealing, whaling and caribou: the skeletal isotope chemistry of Eastern Arctic foragers. *Journal of Archaeological Science*. 31: 39-57
- Conroy, GC. 2005. *Reconstructing Human Origins*. 2<sup>e</sup> édition. New York : W.W. Norton. 674 p.
- Currey JD. 2002. *Bones : structure and mechanics*. Princeton, NJ : Princeton University Press. 436 p.
- Cybulski, JS. 1988. The human skeletons of courtine Saint-Louis – Bastion des Ursulines, Quebec city. Ottawa : Parc Canada. 90 p.

- Cybulski, JS. 2001. Perspectives on Northern Northwest coast prehistory. Mercury Series, Archaeological Survey of Canada. Ottawa : Musée Canadien des Civilisations. 292 p.
- D'août K, Pataky TC, De Clercq D, Aerts P. 2009. The effects of habitual footwear use : foot shape and function in native barefoot walkers. Footwear Science. 1 : 81-94
- Davis KT. 1990. The foot length to stature ratio: A study of racial variance. Mémoire de maîtrise. Texas Tech University. 56 p.
- Delage D. 1992. L'influence des Amérindiens sur les Canadiens et les Français au temps de la Nouvelle-France. *Lekton*. 2 : 103-191
- Delagoutte JP. 1989. «Le pied plat». Dans Delagoutte JP, Bonnel F. *Le pied : pathologie et techniques chirurgicales*. Paris : Masson. p. 144-151
- Desjardins B. 1990. Homogénéité ethnique de la population québécoise sous le Régime français. *Cahiers québécois de démographie*. 19 : 63-76
- Dimeglio A, Bonnel F, Claustre J. 1987. «La croissance du pied». Dans Dimeglio A, Claustre J. *Le pied de l'enfant*. Paris : Masson. p. 1-11
- Drapeau MSM, Harmon EH. 2008. Metatarsal head torsion in apes, humans, and *A. afarensis*. *American Journal of Physical Anthropology*. 46 (suppl.) : 92
- Drapeau MSM, Harmon EH. 2013. Metatarsal torsion in monkeys, apes, humans and australopiths. *Journal of Human Evolution*. 64 : 93-108
- Echarri JJ, Forriol F. 2003. The development in footprint morphology in 1851 Congolese children from urban and rural areas, and the relationship between this and wearing shoes. *Journal of Pediatric Orthopaedics B*. 12 : 141-146

- Elftman H, Manter J. 1935. The evolution of the human foot, with especial reference to the joints. *Journal of Anatomy*. 70 : 56-67
- Fessler DMT, Haley KJ, Lal RD. 2005. Sexual dimorphism in foot length proportionate to stature. *Annals of Humain Biology*. 32 : 44-59
- Fontaine C, Demondion X. 2011. «Biomécanique et radio-anatomie du pied et de la marche». Dans Morvan G et coll. *Le pied : évolution et statique du pied, médio-pied, avant-pied, neuropathies canalaies, pied méconnu, pied rhumatismal, pied de l'enfant : congrès thématique de juin : opus XXXVIII*. Montpellier : Sauramps médical. p. 59-70
- Freedman A, Huntington EC, Davis GC, Magee RB, Milstead VM, Kirkpatrick CM. 1946. *Foot dimensions of soldiers: third partial report*. Fort Knox, TN : Armored Medical Research Laboratory. 164 p.
- Giles E, Vallandigham PH. 1991. Height estimation from foot and shoeprint length. *Journal of Forensic Science*. 36 : 1134-1151
- Gould SJ. 1983. *The mismeasure of man*. Paris : Éditions Ramsay. 447 p.
- Hare J, Lafrance M et Ruddel DT. 1987. *Histoire de la Ville de Québec – 1608-1871*. Ottawa : Éditions Boréal/Musée Canadien des Civilisations. 399 p.
- Hawes MR, Sovak D, Miyashita M, Kang SJ, Yoshihuku Y, Tanaka S. 1994. Ethnic differences in forefoot shape and the determination of shoe comfort. *Ergonomics*. 37 : 187-196
- Hisham S, Mamat CR, Ibrahim MA. 2012. Multivariate statistical analysis for race variation from foot anthropometry in the Malaysian population. *Australian Journal of Forensic Sciences*. 44 : 285-293

- Hoffmann P. 1905. Conclusions drawn from a comparative study of the feet of barefooted and shoe-wearing peoples. *Journal of Bone and Joint Surgery*. 3 : 105-136
- Holden C, Mace R. 1999. Sexual dimorphism in stature and women's work : A phylogenetic cross-cultural analysis. *American Journal of Physical Anthropology*. 110 : 27-45
- Hrdlicka A. 1935. The Pueblos. *American Journal of Physical Anthropology*. 20 : 235-460
- Jackson R. 1990. The Chinese foot-binding syndrome. Observations on the history and sequelae of wearing ill-fitting shoes. *International Journal of Dermatology*. 29 : 322-328
- Kadambande S, Khurana A, Debnath U, Bansal M, Hariharan K. 2006. Comparative analysis of shod and unshod feet. *The Foot*. 16 : 188-191
- Kieffert P, Braun S. 1990. «Les métatarsalgies créées par la chaussure». Dans Claustre J, Simon L. *Les métatarsalgies statiques*. Paris : Masson. p. 263-272
- Kuttruff JT, DeHart SG, O'Brien MJ. 1998. 7500 Years of prehistoric footwear from Arnold Research Cave, Missouri. *Science*. 281 : 72-75
- Lautzenheiser SG, Kramer PA. 2013. Linear and angular measurements of the foot of modern humans: a test of Morton's foot types. *The Anatomical Record*. DOI: 10.1002/ar.22764
- Lieberman DE. 1997. Making Behavioral and Phylogenetic Inferences From Hominid Fossils : Considering the Developmental Influence of Mechanical Forces. *Annual Review of Anthropology*. 26 : 185-210
- Maggiano CM. 2011. «Making the mold : A microstructural perspective on bone modeling during growth and mechanical adaptation». Dans Crowder C, Stout S. *Bone Histology : An Anthropological Perspective*. Boca Raton : CRC Press Inc. p. 45-90

- Maggiano CM. 2012. Histomorphometry of humeral primary bone : evaluating the endosteal lamellar pocket as an indicator of modeling drift in archaeological and modern skeletal samples. Thèse de Doctorat. The Ohio State University.
- Manna I, Pradhan D, Ghosh S, Kar SK, Dhara P. 2001. A comparative study of foot dimension between adult male and female and evaluation of foot hazards due to using of footwear. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*. 20 : 241-246
- Manning TH. 1936. Some notes on Southampton Island. *The Geographical Journal*. 88 : 232-242
- Matthiassen T. 1927. *Archaeology of the Central Eskimos. Report of the Fifth Thule Expedition 1921-24. Volume 4.* Copenhagen
- Marchai L. 1942. Les origines de Montréal : Ville-Marie, 1642-1665. Montréal : Beauchemin et Bulletin des Études françaises. 214 p.
- Mays SA. 2005. Paleopathological study of hallux valgus. *American Journal of Physical Anthropology*. 126 : 139-149
- Merbs CF. 1983. Patterns of activity-induced pathology in a Canadian Inuit population. *National Museum of Man Mercury Series*. Ottawa: National Museums of Canada
- Merbs CF. 1996. Spondylolysis of the sacrum in Alaskan and Canadian Inuit skeletons. *American Journal of Physical Anthropology*. 101: 357-367
- Ministère des richesses naturelles de l'Ontario. 2009. Biodiversité, plaines à forêts mixtes. Repéré à [http://www.mnr.gov.on.ca/fr/Business/Biodiversity/2ColumnSubPage/STEL02\\_176703.html](http://www.mnr.gov.on.ca/fr/Business/Biodiversity/2ColumnSubPage/STEL02_176703.html)

- Morton DJ. 1922. Evolution of the human foot. *American Journal of Physical Anthropology*. 5 : 305-336
- Mountrakis C, Eliopoulos C, Koilias CG, Manolis SK. 2010. Sex determination using metatarsal osteometrics from the Athens collection. *Forensic Science International*. 200 : 178.e1-178.e7
- Musée de la civilisation. 2010. Place Royale d'hier à aujourd'hui, Place-Royale, place publique, De 1676 à aujourd'hui. Repéré à <http://www.mcq.org/place-royale/themes.php?id=8&ver=1>
- Musée Virtuel du Canada. 2005. Sur le sol canadien, l'épopée de la chaussure dans le Canada d'autrefois. Repéré à <http://www.museevirtuel-virtualmuseum.ca/sgc-cms/expositions-exhibitions/chaussure-footwear/francais/index.html>
- Museum of Leathercraft. 2011. 'Hessian' Boot. Repéré à <http://www.museumofleathercraft.org/hessian-boot/>
- Musiba CM, Tuttle RH, Hallgrímsson B, Webb DM. 1997. Swift and sure-footed on the savanna: a study of Hadzabe gaits and feet in Northern Tanzania. *American Journal of Human Biology*. 9 : 303-321
- Myers TP. 1987. An examination of central plains mocassins : evidence of adaptation to a reservation economy. *Plains Anthropologist*. 32 : 29-41
- Naud JF. 1997. Lieux d'établissement des immigrants en Nouvelle-France, mémoire de Maîtrise. Université de Montréal.
- Olsen BR, Reginato AM, Wang W. 2000. Bone Development. *Annual Review of Cell Developmental Biology*. 16 : 191-220

- Ozden H, Balci Y, Demirüstü C, Turgut A, Ertugrul M. 2005. Stature and sex estimate using foot and shoe dimensions. *Forensic Science International*. 147 : 181-184
- Peabody Museum of Archaeology and Ethnology at Harvard University. 2013. Sensible shoes. Repéré à <https://www.peabody.harvard.edu/node/515#https://peabody.harvard.edu/sites/default/files/imagecache>
- Pendergast JF. 1981. Distribution of Iroquoian discoidal clay beads. *Ontario Archaeology* 36 : 57-72
- Platzer W. 2007. Atlas de poche d'anatomie. Tome 1. Appareil locomoteur. 3<sup>e</sup> édition. Paris: Flammarion Médecine-Sciences. 462 p.
- Rao UB, Joseph B. 1992. The influence of footwear on the prevalence of flat foot. *Journal of Bone and Joint Surgery*. 74 : 525-527
- Robling AG, Ubelaker DH. 1997. Sex estimation from the metatarsals. *Journal of Forensic Science*. 42 : 1062-1069
- Robert F. 1958. Étude sur les chaussures indiennes d'Amérique du Nord. *Journal de la Société des Américanistes*. 47 : 67-110
- Rodgers MM. 1995. Dynamic foot biomechanics. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*. 21 : 306-316
- Sim-Fook L, Hodgson AR. 1958. A comparison of foot forms among the non-shoe and shoe-wearing Chinese populations. *Journal of Bone and Joint Surgery*. 40 : 1058-1062
- Shefelbine SJ, Tardieu C, Carter DR. 2002. Development of the Femoral Bicondylar Angle in Hominid Bipedalism. *Bone*. 30 : 765-770

Smith SL. 1997. Attribution of foot bones to sex and population groups. *Journal of Forensic Forensic Science*. 42 : 186-195

Syms EL. 1978. Aboriginal mounds in Southern Manitoba: an evaluative overview manuscript. *Parks Canada Manuscript Report*. 323 : 47-57

Tortora GJ, Grabowski SR. 2001. *Principes d'anatomie et de physiologie*. St-Laurent : ERPI. 1221 p.

Tuttle RH, Webb DM, Baksh M. 1990. Further progress on the Laetoli trails. *Journal of Archaeological Science*. 17 : 347-362

Ward CV, Kimbel WH, Johanson DC. 2011. Complete fourth metatarsal and arches in the foot of *Australopithecus afarensis*. *Science*. 331 : 750-753

Wilbur AK. 1998. The utility of hand and foot bones for the détermination of sex and the estimation of stature in a prehistoric population from west-central Illinois. *International Journal of Osteoarchaeology*. 8 : 180-191

White TD, Folkens, PA. 2005. *The human bone manual*. Amsterdam ; Boston : Elsevier Academic Press. 464 p.

Wunderlich RE, Cavanagh PR. 2001. Gender differences in adult foot shape: Implications for shoe design. *Medicine Science Sports Exercise*. 33 : 605–611

## ANNEXE 1

Tableau XI. Liste des spécimens de l'échantillon avec les valeurs d'angles pour chacun des métatarsiens disponibles.

Spécimen	Sexe	Groupe	Population	MT1	MT2	MT3	MT4	MT5
XIV-C:074	H	Inuits	Nunavut	-2,281	-2,044	18,761	27,951	24,812
XIV-C:089	F	Inuits	Nunavut	4,902	9,423	18,407	27,020	
XIV-C:098	F	Inuits	Nunavut	2,146		23,079	32,071	
XIV-C:102	H	Inuits	Nunavut	-5,979	-4,055	19,035	4,819	18,340
XIV-C:110	F	Inuits	Nunavut	10,635	8,017	25,134	23,328	14,258
XIV-C:112	F	Inuits	Nunavut	-1,335	2,386	22,912	13,465	
XIV-C:115	F	Inuits	Nunavut	8,856	3,292	31,315	24,586	18,015
XIV-C:117	H	Inuits	Nunavut	12,440	4,161	23,131	29,183	36,311
XIV-C:126	H	Inuits	Nunavut	-4,160	-4,603	20,952	24,193	23,982
XIV-C:145	F	Inuits	Nunavut	7,118	5,377	18,672	16,465	29,780
XIV-C:149	F	Inuits	Nunavut	11,751		20,077	20,829	16,138
XIV-C:190	H	Inuits	Nunavut	18,095	4,012	9,399	8,144	17,985
XIV-C:192	F	Inuits	Nunavut				35,810	
XIV-C:196	F	Inuits	Nunavut	11,552	-7,100	24,401	22,140	26,988
XIV-C:199	H	Inuits	Nunavut	5,376	-10,089	22,089	23,348	25,846
XIV-C:216	H	Inuits	Nunavut	12,217	7,870		18,294	
XIV-C:217	H	Inuits	Nunavut	14,093	-4,966	12,918	13,869	9,439
XIV-C:218	F	Inuits	Nunavut		-6,149	15,909	30,480	21,434
XIV-C:219	F	Inuits	Nunavut		-5,480	20,033	33,546	25,142
XIV-C:221	F	Inuits	Nunavut	8,087	-1,910	20,241	29,460	15,912
XIV-C:093	H	Inuits	Nunavut	14,131	1,598	24,188	10,286	28,552
XIV-C:082	H	Inuits	Nunavut	3,768	-7,546	21,327	31,747	28,394
XIV-C:130	F	Inuits	Nunavut	4,434	-6,005	31,936	29,262	24,796
XIII-F:672	I	Amérindiens	Ontario	4,710	1,006	15,465	17,467	7,036
XIII-F:1106	I	Amérindiens	Ontario				22,984	10,185
XIII-F:1150	I	Amérindiens	Ontario	6,505	-1,521			
XV-A:18	I	Amérindiens	Manitoba	13,108	-2,538	13,304	17,442	9,976
XV-A:21	I	Amérindiens	Manitoba	9,970			26,225	20,051
XV-A:52	I	Amérindiens	Manitoba		-1,132	26,904	11,112	
XV-A:70	I	Amérindiens	Manitoba			20,277	26,769	
XV-A:97	H	Amérindiens	Manitoba	13,521	-9,949	21,756	8,105	-0,290
XVII-B:168	F	Amérindiens	Colombie-Britannique	3,622		-3,217	18,051	-2,844
XVII-B:303	F	Amérindiens	Colombie-Britannique	0,770	-6,377	22,653	19,297	22,144
XVII-B:316	H	Amérindiens	Colombie-Britannique		1,900	21,499	25,577	12,166
XVII-B:320	H	Amérindiens	Colombie-Britannique	9,453	-3,447	15,183	12,920	13,181
XVII-B:375	H	Amérindiens	Colombie-Britannique	12,853		12,199	39,266	9,896
XVII-B:382	H	Amérindiens	Colombie-Britannique	11,973	-2,004	18,671	23,583	11,733
XVII-B:408	F	Amérindiens	Colombie-Britannique	5,354	-6,428	10,125	24,543	11,383
XVII-B:447	H	Amérindiens	Colombie-Britannique	11,147	-3,712	36,346		9,710

Spécimen	Sexe	Groupe	Population	MT1	MT2	MT3	MT4	MT5
XVII-B:460	F	Amérindiens	Colombie-Britannique	7,452	-6,907	9,777	17,554	12,061
XVII-B:463	H	Amérindiens	Colombie-Britannique	2,228	2,186	10,762	11,302	11,021
XVII-B:484	H	Amérindiens	Colombie-Britannique	9,756	-7,502	18,320	14,586	22,496
XVII-B:488	H	Amérindiens	Colombie-Britannique	15,001	-0,881	19,366	15,565	14,405
XVII-B:507	H	Amérindiens	Colombie-Britannique	8,857	-14,529	14,126	9,871	-1,814
XVII-B:511	H	Amérindiens	Colombie-Britannique	8,762	-10,344	10,385	5,886	3,241
XVII-B:512	H	Amérindiens	Colombie-Britannique	13,455	-2,265	15,395	10,111	-1,912
XVII-B:515	H	Amérindiens	Colombie-Britannique	3,262	2,092	7,997	22,589	22,106
XVII-B:516	F	Amérindiens	Colombie-Britannique	12,959	-5,286	5,689	10,195	18,122
XVII-B:889	F	Amérindiens	Colombie-Britannique	2,625	-10,400	18,554	15,199	16,096
XVII-D:6	I	Amérindiens	Colombie-Britannique	2,057	2,171	13,293	15,380	7,007
18G1M50	I	Militaires	Bastion des Ursulines	1,746	3,110	25,862	19,737	22,944
19G35C2	H	Militaires	Bastion des Ursulines	12,771	11,237	18,541	-0,705	15,468
19G35D1	H	Militaires	Bastion des Ursulines	1,704	-7,804	8,169	9,936	14,118
19G37E6	H	Militaires	Bastion des Ursulines		0,574	20,260	34,356	4,753
19G37H1	F	Militaires	Bastion des Ursulines	7,677	-2,845	26,549	27,161	7,910
19G37M2	H	Militaires	Bastion des Ursulines	3,049	7,167	19,868	37,184	20,659
19G37M3	H	Militaires	Bastion des Ursulines	11,123	1,008	31,552	30,637	21,321
19G41D1	H	Militaires	Bastion des Ursulines	-0,222	3,415	21,078	38,465	13,956
19G41D2	H	Militaires	Bastion des Ursulines	4,285	4,222	21,452	29,263	2,024
39G6B2-49	H	Militaires	Bastion des Ursulines	4,562	7,554	17,014	39,234	8,018
19G37N1	H	Militaires	Bastion des Ursulines	24,645	10,080	12,987	23,977	18,403
LG-S3	I	Euro-canadiens	Longueuil	0,104				
LG-S4	I	Euro-canadiens	Longueuil	5,281	-3,041	24,706	36,166	13,237
LG-S6a	I	Euro-canadiens	Longueuil	0,170				
LG-S6b	I	Euro-canadiens	Longueuil	1,487	-4,013	11,072		
LG-S8	F	Euro-canadiens	Longueuil	-0,186	-13,594			20,087
LG-S16	H	Euro-canadiens	Longueuil					19,773
3A1	I	Euro-canadiens	Notre-Dame	0,547				
4C-S1	H	Euro-canadiens	Notre-Dame		-4,533	24,652		
4G-S1	F	Euro-canadiens	Notre-Dame	-1,591	-0,747	30,349		
4M1	H	Euro-canadiens	Notre-Dame	-7,698	9,522			
4P1a	I	Euro-canadiens	Notre-Dame	-0,069				
4P2	I	Euro-canadiens	Notre-Dame		-6,608	24,275		
9D-S1	I	Euro-canadiens	Notre-Dame	-6,301				
11C-S1	I	Euro-canadiens	Notre-Dame	4,611	-3,472	27,055	33,574	
11D-S1	H	Euro-canadiens	Notre-Dame			13,806		
11K-S1	I	Euro-canadiens	Notre-Dame	5,148				
12A-S2a	I	Euro-canadiens	Notre-Dame		-2,670		20,432	6,613
12A-S2b	I	Euro-canadiens	Notre-Dame	9,587				
12A-S3	I	Euro-canadiens	Notre-Dame	5,165				
12A-S4	I	Euro-canadiens	Notre-Dame	7,640		28,040		5,354
12A-S5	I	Euro-canadiens	Notre-Dame	-8,232				
12A-S6	I	Euro-canadiens	Notre-Dame				18,191	
12AA-S7	I	Euro-canadiens	Notre-Dame	6,335			19,139	7,791
12BB-S6	I	Euro-canadiens	Notre-Dame	5,328	-6,105	27,179	30,034	29,943

Spécimen	Sexe	Groupe	Population	MT1	MT2	MT3	MT4	MT5
12BB-S11	I	Euro-canadiens	Notre-Dame		9,771			
12BB-S12a	I	Euro-canadiens	Notre-Dame	11,357				
12BB-S12b	I	Euro-canadiens	Notre-Dame	-3,545				
12BB-S12c	I	Euro-canadiens	Notre-Dame		-3,923			
12BB-S12d	I	Euro-canadiens	Notre-Dame			17,839		
12BB-S12e	I	Euro-canadiens	Notre-Dame			19,118		
12BB-S12F	I	Euro-canadiens	Notre-Dame			23,400		
12BB-S12g	I	Euro-canadiens	Notre-Dame				6,065	
12BB-S12h	I	Euro-canadiens	Notre-Dame				10,779	
12BB-S12i	I	Euro-canadiens	Notre-Dame					20,847
12BB-S12j	I	Euro-canadiens	Notre-Dame					5,333
12BB-S12k	I	Euro-canadiens	Notre-Dame		14,110			
12BB-S12l	I	Euro-canadiens	Notre-Dame		-3,032			
12C-S1NA	H	Euro-canadiens	Notre-Dame	-2,239				
12D-S1a	H	Euro-canadiens	Notre-Dame					12,228
12D-S1b	H	Euro-canadiens	Notre-Dame	-4,516	-4,486	20,281	32,439	14,048
12FF-S2	I	Euro-canadiens	Notre-Dame		-17,007			
12W-S10	I	Euro-canadiens	Notre-Dame	6,589	5,691	27,036	27,684	13,117
8F1,3	H	Euro-canadiens	St-Matthew	3,398	-3,087	29,236	31,046	11,666
15A S19	F	Euro-canadiens	St-Matthew	10,527	-10,226	21,705	31,398	
8F1,4	H	Euro-canadiens	St-Matthew	0,724		34,823		
15B S18	F	Euro-canadiens	St-Matthew	-0,493	4,566	22,110		
10A1 16B	H	Euro-canadiens	St-Matthew		-0,639			
12A2,2	H	Euro-canadiens	St-Matthew	7,882	1,485	37,909	38,018	29,448
10A1,2	H	Euro-canadiens	St-Matthew	8,811	-23,143	13,335	24,726	18,847
10A1 16B	H	Euro-canadiens	St-Matthew	14,738				
8F1,10	F	Euro-canadiens	St-Matthew	-16,948	-0,166	22,347	18,307	24,128
15A S11	H	Euro-canadiens	St-Matthew	10,153	-5,183	31,919	40,968	19,887
15A S8	H	Euro-canadiens	St-Matthew	8,768	11,543	35,438	26,026	-2,712
15B S34	F	Euro-canadiens	St-Matthew		-3,621	11,377	15,495	24,424
15B S34b	I	Euro-canadiens	St-Matthew		-5,345	25,165		
15B S35	F	Euro-canadiens	St-Matthew	0,321	-3,378	28,925	34,089	28,259
15A S26	H	Euro-canadiens	St-Matthew	6,838	4,920	22,074	15,823	14,791
15A S7	I	Euro-canadiens	St-Matthew	0,964	-7,842			
15A S2a	I	Euro-canadiens	St-Matthew	6,728	-3,861	30,740	30,248	11,900
15A S36	I	Euro-canadiens	St-Matthew					2,234
15B S9	H	Euro-canadiens	St-Matthew		-3,177	16,754	10,042	
15B S8	F	Euro-canadiens	St-Matthew	6,120				
15B S10	F	Euro-canadiens	St-Matthew			17,768		
10A1,12	I	Euro-canadiens	St-Matthew	1,121				
15B S19	H	Euro-canadiens	St-Matthew	0,324	8,958	34,402	20,537	36,094
15B S30	H	Euro-canadiens	St-Matthew	7,353	-12,213	24,409		
15B S31	H	Euro-canadiens	St-Matthew	7,014	2,936	27,319		
15A 99a	I	Euro-canadiens	St-Matthew	2,971				
15A 99c	I	Euro-canadiens	St-Matthew	-6,004				
15A 99d	I	Euro-canadiens	St-Matthew					12,622

<b>Spécimen</b>	<b>Sexe</b>	<b>Groupe</b>	<b>Population</b>	<b>MT1</b>	<b>MT2</b>	<b>MT3</b>	<b>MT4</b>	<b>MT5</b>
15A 99e	I	Euro-canadiens	St-Matthew		-4,883			
15A 99F	I	Euro-canadiens	St-Matthew		-10,583	36,108	39,268	21,516
15A/15B 99	I	Euro-canadiens	St-Matthew	4,954				
14B12a	I	Euro-canadiens	St-Matthew			21,451	31,215	
14B12b	I	Euro-canadiens	St-Matthew	-3,952				
14B12c	I	Euro-canadiens	St-Matthew		2,165			
14B12d	I	Euro-canadiens	St-Matthew				38,927	
8F1,8	H	Euro-canadiens	St-Matthew		-2,908	22,455	21,081	
15A S34	F	Euro-canadiens	St-Matthew	15,599	-2,917	17,915		25,090
15A V2	I	Euro-canadiens	St-Matthew	0,844	-7,126	13,317	4,032	
15A 31/16	I	Euro-canadiens	St-Matthew	8,364			22,551	-5,763
15A S14	F	Euro-canadiens	St-Matthew	14,105	-6,766			20,330
15A S32	H	Euro-canadiens	St-Matthew	7,552	-12,932	22,172	32,229	16,448
1D S15	I	Euro-canadiens	St-Matthew			32,573		
15A S28	H	Euro-canadiens	St-Matthew	1,787				
15A S50	F	Euro-canadiens	St-Matthew	10,625	-3,979			
15A S31	H	Euro-canadiens	St-Matthew	11,017	0,714			
8C2,1a	H	Euro-canadiens	St-Matthew	1,955	-3,148			
12A2a	I	Euro-canadiens	St-Matthew	-9,971				
12A2b	I	Euro-canadiens	St-Matthew	8,377				
12A2c	I	Euro-canadiens	St-Matthew	1,369				
12A2d	I	Euro-canadiens	St-Matthew		-10,969			
12A2e	I	Euro-canadiens	St-Matthew		-3,089			
12A2F	I	Euro-canadiens	St-Matthew			25,665	27,958	30,647
12A2g	I	Euro-canadiens	St-Matthew			23,978	32,343	9,807
10A1,16c	F	Euro-canadiens	St-Matthew	1,732	-5,705		18,633	11,836
11A1	I	Euro-canadiens	St-Matthew	-10,959		19,088		
12A2 8c	I	Euro-canadiens	St-Matthew	7,338				
11A2	I	Euro-canadiens	St-Matthew	7,677	0,719			
12A2,8a	H	Euro-canadiens	St-Matthew	7,947	-9,740	18,608	22,514	19,763
10A1,16a	I	Euro-canadiens	St-Matthew	3,842	2,537	23,400	39,248	15,230
8F1,1	F	Euro-canadiens	St-Matthew		-10,928	25,236	28,216	
12A2,8b	I	Euro-canadiens	St-Matthew	10,613	-3,906			
10A1,4	F	Euro-canadiens	St-Matthew	7,372	0,112	24,078	18,380	16,597
12A2,8c	F	Euro-canadiens	St-Matthew	5,726	3,618	30,005	36,334	