

UNIVERSITÉ D'ORLÉANS
ÉCOLE DOCTORALE MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE, PHYSIQUE THÉORIQUE ET INGÉNIERIE DES
SYSTÈMES (MIPTIS)

LABORATOIRE IDP - UMR CNRS 7013, UNIVERSITÉ D'ORLÉANS / DÉPARTEMENT D'ÉDUCATION
PHYSIQUE, UNIVERSITÉ DE BALAMAND

THÈSE EN COTUTELLE INTERNATIONALE présentée par :

Elie MALIHA

soutenue le : 11 Juillet 2022

pour obtenir le grade de :
Docteur de l'Université d'Orléans

Discipline/ Spécialité : Sciences et techniques des activités physiques et sportives

PARAMÈTRES DE SANTÉ OSSEUSE CHEZ DES
JEUNES ADULTES PRATIQUANT LE HANDBALL

THÈSE dirigée par :

Mr. Rawad EL HAGE
Mr. Hechmi TOUMI

Professeur d'Université, Université de Balamand
Professeur d'Université, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :

Mme. Christelle JAFFRE
Mr. Hassane ZOUHAL

Professeure d'Université, Université de Picardie Jules Verne
Professeur d'Université, Université de Rennes 2

JURY :

Mr. Rachid JENNANE
Mr. Rawad EL HAGE
Mme. Christelle JAFFRE
Mr. Hassane ZOUHAL
Mr. Zaher EL HAGE
Mr. Antonio PINTI

Professeur d'Université, Université d'Orléans, Président du jury
Professeur d'Université, Université de Balamand
Professeure d'Université, Université de Picardie Jules Verne
Professeur d'Université, Université de Rennes 2
MCU, Notre Dame University-Louaize
MCU-HDR, Université Polytechnique Hauts-de-France

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier mes directeurs et co-directeurs de thèse : professeurs EL HAGE et TOUMI.

Je remercie les rapporteurs de cette thèse : madame Christelle JAFFRE et monsieur Hassane ZOUHAL. Leur présence dans mon jury de thèse est un honneur pour ma carrière académique.

Je remercie également les examinateurs de cette thèse : professeur Rachid JENNANE, Dr. Antonio PINTI et Dr. Zaher EL HAGE.

Je remercie aussi le vice-président recherche de l'Université d'Orléans pour son support très efficace et le laboratoire IDP d'avoir accepté de m'accueillir ces derniers mois.

Je remercie énormément tous les sujets ayant participé à cette étude.

En dernier lieu, je tiens à remercier ma famille qui était toujours présente à mes côtés.

Abréviations

BR	Buckling Ratio ou degré d'instabilité corticale
BSI	Indice de résistance en flexion
CE	Corps entier
CF	Col fémoral
CLES	Common language effect size
CMO	Contenu minéral osseux
CSA	Surface de la section transversale
CSI	Indice de résistance en compression
CSMI	Moment d'inertie de la surface transversale
DMO	Densité minérale osseuse
HT	Hanche totale
ISI	Indice de force aux contraintes
L1-L4	Rachis lombaire
SI	Indice de résistance
TBS	Score de l'os trabéculaire
Z	Module de section

SOMMAIRE

	Page
Remerciements	1
Abréviations	2
Liste des tableaux	9
Liste des figures	11
Introduction	12
Partie I : Revue de la Littérature	18
1. Généralités sur l'ostéoporose	18
1.1 Définition de l'ostéoporose	18
1.2 Diagnostic de l'ostéoporose	19
1.3 Facteurs de risque de l'ostéoporose	21
1.4 Conséquences de l'ostéoporose	23
1.4.1 Mortalité	25
1.4.2 Morbidité	25
1.4.3 Impact de l'ostéoporose sur l'état émotionnel	26
1.4.4 Coût économique	26
1.5 Prévention des fractures	28
1.5.1 Les thérapies anaboliques	28
1.5.2 Les thérapie anti-résorptives	29
1.5.3 Prévention des chutes en pratique	29
2. Méthodes d'évaluation des paramètres osseux	30
2.1 La DXA	30
2.2 L'IRM	32

2.3 La Radiographie	33
2.4 La Tomographie	33
2.5 Les Ultrasons	35
2.6 Les problèmes connus	36
3. Les déterminants du pic de masse osseuse	36
3.1 Les facteurs génétiques	38
3.2 Les facteurs mécaniques	39
3.3 Les facteurs nutritionnels	41
3.3.1 Recommandations de consommation de calcium	42
3.4 Les facteurs hormonaux	43
4. Réactions des os aux contraintes mécaniques	45
4.1 Exercices de force et de résistance	48
4.2 Considérations pratiques pour une réponse ostéogénique optimale	50
4.2.1 Principes de l'ACSM qui s'appliquent à la réponse ostéogénique à l'entraînement physique	50
4.2.2 La désensibilisation aux contraintes mécaniques	51
4.2.2 Le nombre de séances et de cycles par semaine	52
4.2.3 L'âge du début de la pratique sportive	52
4.2.4 Le type d'activité physique pratiqué	53
4.3 Mécanotransduction du remodelage osseux	55
4.3.1 Fenêtres de contraintes mécaniques	55
4.3.2 Mécanotransduction et mécanismes cellulaires	56
5. Influence de la pratique des sports collectifs sur les paramètres osseux	57
5.1 Influence de la pratique du rugby sur les paramètres osseux	57
5.1.1 Etudes longitudinales menées sur l'influence du rugby sur les paramètres osseux	58
5.1.2 Etudes transversales menées sur l'influence du rugby sur les paramètres osseux	59

5.2 Influence de la pratique du Basketball sur les paramètres osseux	61
5.2.1 Etudes longitudinales menées sur l'influence du basketball sur les paramètres osseux	61
5.2.2 Etudes transversales menées sur l'influence du basketball sur les paramètres osseux	61
5.3 Influence de la pratique du football sur les paramètres osseux	64
5.3.1 Etudes longitudinales menées sur l'influence du football sur les paramètres osseux	64
5.3.2 Etudes transversales menées sur l'influence du football sur les paramètres osseux	66
5.4 Influence de la pratique du handball sur les paramètres osseux	68
5.4.1 Caractéristiques physiques et physiologique des handballeurs	70
5.4.2 Etudes longitudinale menées sur l'influence du handball sur les paramètres osseux	71
5.4.3 Etudes transversales menées sur l'influence du handball sur les paramètres osseux	72
5.5 Synthèse	74
6. Questionnaires évaluant les contraintes mécaniques sur les os	76
6.1 Questionnaire de Dolan et coll. (2006)	76
6.2 Questionnaire de Groothausen et coll. (1997)	78
6.3 Questionnaire de Weeks et Beck (2008)	81
6.4 Questionnaire de Farr et coll. (2011)	82
6.5. Synthèse sur les questionnaires évaluant les contraintes mécaniques osseuses	83
7. Facteurs corrélables aux indices de résistance osseuse du col fémoral	84
7.1 L'âge	84
7.2. Le poids corporel	84
7.3 Le niveau d'activité physique	84
7.4 Le niveau de performance physique	85
7.5 La masse maigre et le SMI	85
7.6 La concentration en vitamine D	85

7.7 La pratique des sports collectifs	85
7.8 La consommation protéique journalière	86
7.9 La concentration sérique en ferritine	86
7.10 Le statut socio-économique	86
7.11 La résistance à l'insuline	86
7.12 La fonction pulmonaire	86
7.13 Les marqueurs d'inflammation	87
7.14 Synthèse sur les facteurs corrélables aux indices de résistance osseuse du col fémoral	87
Synthèse et objectifs	88
Deuxième partie : Contribution personnelle	90
Méthodologie générale	90
1. Conception des études menées	90
2. Sujets et méthodes	91
2.1 Recrutement des sujets	92
2.2 Mesure des paramètres anthropométriques et osseux	93
2.3 Evaluation des qualités physiques	95
2.3.1 Evaluation de la force maximale	95
2.3.2 Evaluation de la performance en sprint	95
2.3.3 Evaluation de la vitesse de tir	96
2.3.4 Evaluation des tests athlétiques et des qualités de détente horizontale et verticale	96
2.3.5 Evaluation de la puissance maximale par le test charge-vitesse	96
2.3.6 Evaluation de la vitesse maximale aérobie (VMA) sur tapis roulant	97
2.4 Questionnaires utilisés	97
2.4.1 La consommation calcique journalière (CCJ)	97
2.4.2 La consommation protéique journalière (CPJ)	97

2.4.3 La qualité de sommeil (PSQI)	97
2.4.4 Le niveau d'activité physique (IPAQ)	97
2.4.5 Le BPAQ	98
2.5 Etude statistique	98
Etude 1 : Indices de résistance osseuse du col fémoral chez des jeunes hommes pratiquant le handball	99
1. Résumé	99
2. Résultats	99
2.2 Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les variables osseuses de la population étudiée	102
2.3 Paramètres osseux ajustés pour la masse maigre et la force maximale en soulevé de terre	108
Etude 2 : Paramètres de santé osseuse chez des jeunes femmes pratiquant le handball	113
1. Résumé	113
2. Résultats	114
2.2 Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux	114
2.3 Paramètres osseux ajustés pour la masse maigre et la force maximale en soulevé de terre	114
Synthèse sur les deux études principales	134
1. Taille d'effet	134
1.1 Taille d'effet des paramètres osseux chez les hommes pratiquant le handball	134
1.2 Taille d'effet des paramètres osseux chez les femmes pratiquant le handball	135
2. T-scores	136
2.1 T-scores de la DMO chez les hommes	136
2.1 T-scores de la DMO chez les femmes	136
3. Z-scores	137
3.1 Z-scores de la DMO chez les hommes	137
3.2 Z-scores de la DMO chez les femmes	137
4. Niveaux d'activité physique	137

4.1 Niveaux d'activité physique chez les hommes	137
4.2 Niveaux d'activité physique chez les femmes	138
4.3 Différences inter-sexes	138
5. Synthèse	138
Discussion générale	140
Conclusions et perspectives	146
Bibliographie	148
Annexes	177
Résumé	178

LISTE DES TABLEAUX

Numéro du tableau	Intitulé	Page
Tableau 1	Principes de l'ACSM s'appliquant à la réponse ostéogénique aux contraintes mécaniques	50
Tableau 2	Etudes longitudinales menées sur l'influence du rugby sur les paramètres osseux	58
Tableau 3	Etudes transversales menées sur l'influence du rugby sur les paramètres osseux	59
Tableau 4	Etudes longitudinale menées sur l'influence du basketball sur les paramètres osseux	61
Tableau 5	Etudes transversales menées sur l'influence du basketball sur les paramètres osseux	62
Tableau 6	Etudes longitudinales menées sur l'influence du football sur les paramètres osseux	64
Tableau 7	Etudes transversales menées sur l'influence du football sur les paramètres osseux	66
Tableau 8	Etudes longitudinales menées sur l'influence du handball sur les paramètres osseux	71
Tableau 9	Etudes transversales menées sur l'influence du handball sur les paramètres osseux	72
Tableau 10	Récapitulatif sur les relations entre les scores obtenus par les différents questionnaires et la DMO	83
Tableau 11	Conception des études menées dans le cadre de la thèse	90
Tableau 12	Paramètres osseux mesurés dans le cadre de la	93

	thèse	
Tableau 13	Caractéristiques cliniques et variables osseuses de la population étudiée	100
Tableau 14	Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les variables osseuses de la population étudiée	104
Tableau 15	Taille d'effet des paramètres osseux chez les hommes pratiquant le handball	134
Tableau 16	Taille d'effet des paramètres osseux chez les femmes pratiquant le handball	135
Tableau 17	Valeurs de T-scores chez les hommes	136
Tableau 18	Valeurs de T-scores chez les femmes	137

LISTE DES FIGURES

Numéro de la figure	Intitulé	Page
Figure 1	Pathogénèse des fractures ostéoporotiques (Lane, 2006).	18
Figure 2	Les critères de l’OMS pour le diagnostic de l’ostéoporose (Kanis et coll. 1994).	20
Figure 3	Facteurs à considérer pour la prévention des fractures liées à l’ostéoporose tout au long de la vie (Dontas et Yiannakopoulos, 2007).	22
Figure 4	Les coûts annuels des fractures ostéoporotiques par rapport aux coûts annuels de trois états pathologiques majeurs (Miller, 2016).	27
Figure 5	Evolution de la masse osseuse durant la vie (Zhu et Zheng, 2021).	37
Figure 6	Déterminants physiologiques du pic de masse osseuse (Bonjour et coll. 2009).	38
Figure 7	Effets positifs d’un apport riche en protéines sur les paramètres de santé osseuse chez les personnes âgées fragiles (Bonjour, 2011).	41
Figure 8	Les mécanismes augmentant le risque de fracture par l’intermédiaire d’un déficit en calcium et en vitamine D (Rizzoli, 2008).	42
Figure 9	Modifications de la masse osseuse avec l’âge en relation avec des influences génétiques et environnementales (Ralston, 1997).	44
Figure 10	Le tissu osseux se désensibilise rapidement aux contraintes mécaniques (Turner et Robling, 2003).	50

Figure 11	Indice ostéogénique de l'exercice calculé en fonction du nombre de cycles et de la fréquence d'entraînement par semaine (Turner et Robling, 2003).	51
Figure 12	Différences entre le CMO du bras dominant et du bras non-dominant chez les joueurs de tennis en fonction de l'âge du début de pratique (Kannus et coll. 1995).	53
Figure 13	Différences de section transversale(○) et de module de section (un prédicteur de la force en flexion●) entre les athlètes participant à des sports de différentes modalités de chargement et contrôles. Les valeurs sont des moyennes et un IC à 95 % représenté par des barres horizontales. Lorsque l'IC à 95 % ne franchit pas la ligne zéro (la valeur pour les témoins), la différence était significative ($P < 0.05$) (Bailey et Brooke-wavell, 2008).	54
Figure 14	Fenêtres de contraintes mécaniques définies par la théorie du mécanostat de Frost (Forwood et Turner, 1995).	55
Figure 15	Turnover osseux (Forwood et Turner, 1995).	76
Figure 16	Etapas pour calculer les contraintes osseuses à travers les périodes de référence (Dolan et coll. 2006).	77
Figure 17	Unités de contraintes osseuses par activité physique (Dolan et coll. 2006).	78
Figure 18	Niveaux de réaction du sol rencontrés dans plusieurs activités physiques (Groothausen et coll. 1997).	79
Figure 19	Classification des pics de contraintes osseuses en fonction des forces de réactions au sol rencontrées dans plusieurs activités physiques (Groothausen et coll. 1997).	80

Figure 20	Coefficients de régression pour la prédiction de la DMO lombaire suivant les deux méthodes (Groothausen et coll. 1997).	81
Figure 21	Corrélations entre le BPAQ et les paramètres de santé osseuse (Weeks et Beck, 2008)	82

Introduction

L'ostéoporose est une maladie osseuse fréquente caractérisée par une densité minérale osseuse faible et des signes de détérioration de la microarchitecture osseuse responsables de la fragilité osseuse (Castrogiovanni et coll. 2016). En pratique, l'ostéoporose touche la moitié des femmes âgées de plus de 50 ans (Fagundes et coll. 2022). L'ostéoporose touche aussi les hommes ; après l'âge de 50 ans, un homme sur 5 va subir une fracture ostéoporotique (Sözen et coll. 2017). La mortalité associée aux fractures de la hanche est plus élevée chez les hommes que chez les femmes (Panula et coll. 2011). Ces résultats épidémiologiques alarmants mettent en évidence l'importance de la mise en place de stratégies de prévention contre cette maladie dans les deux sexes (Tarantino et coll. 2017). Près de 90 % du pic de masse osseuse est atteint vers la fin de la deuxième décennie de la vie (Fagundes et coll. 2022). Par conséquent, le fait d'assurer une acquisition optimale du contenu minéral osseux (CMO) et de la densité minérale osseuse (DMO) peut compenser la perte osseuse associée au vieillissement (Fagundes et coll. 2022). Ce pic est influencé par plusieurs facteurs comme la génétique, les contraintes mécaniques, les facteurs nutritionnels, le profil hormonal et des facteurs divers liés au style de vie (Zhu & Zheng, 2021). De nos jours, la prévention de l'ostéoporose est directement liée à l'augmentation du pic de DMO. Par conséquent, il est essentiel de mettre en œuvre des stratégies capables d'augmenter le pic de DMO (14).

Il existe de nombreux outils de prévention efficaces pour prévenir l'ostéoporose. Parmi les stratégies de prévention, la pratique régulière d'une activité physique (AP) à contraintes mécaniques élevées est sans aucun doute un instrument de prévention valable (Castrogiovanni et coll. 2016 ; Fagundes et coll. 2022). En effet, l'AP contribue à un équilibre énergétique sain, augmente la masse musculaire et améliore l'acquisition de la masse osseuse (Castrogiovanni et coll. 2016 ; Fagundes et coll. 2022). Le type d'activité physique pratiqué conditionne la réponse ostéogénique ; ainsi, des questionnaires valides ont été développés afin de quantifier le pic de contraintes osseuses et ou la réaction du sol des différentes activités physiques (Weeks & Beck, 2008). Il apparaît que les sports collectifs, le sprint et les sauts ont des effets ostéogéniques importants sur la hanche (Ireland et coll. 2020). D'autre part, étant donné les liens étroits entre l'os et le muscle, le développement de la masse musculaire par la pratique de la musculation possède également des effets ostéogéniques importants (Hong & Kim, 2018). En revanche, la

pratique des sports sans contraintes mécaniques importantes ou en décharge comme la natation ou le cyclisme ne semble pas avoir des effets ostéogéniques favorables (Gómez-Bruton et coll. 2013).

La méthode de référence pour diagnostiquer l'ostéoporose est l'absorptiométrie biphotonique à rayons-x (DXA) ; cette technique est capable de mesurer la densité minérale osseuse (DMO) de plusieurs régions en g/cm^2 . La DMO est le meilleur déterminant de la solidité des os (WHO, 1994 ; Kanis et coll. 2008). Ainsi, 50 à 70 % de la résistance osseuse peut être expliquée par la DMO surfacique (Stone et coll. 2008). La DXA peut également mesurer des indices géométriques de résistance osseuse qui peuvent être évalués au niveau du col fémoral (FN) ; ces indices comprennent la surface de la section transversale (CSA), le moment d'inertie de la surface transversale (CSMI), le module de section (Z), le Buckling ratio (BR) et l'indice de résistance (SI) (Beck et coll. 1990). Ces indices sont corrélés à la résistance biomécanique de l'os et sont prédictifs des fractures ostéoporotiques chez les personnes âgées (Beck, 2007 ; LaCroix et coll. 2010). La largeur du CF et la résistance à la flexion sont des paramètres qui sont également connus pour influencer la solidité des os de la hanche (Black et coll. 2008 ; Karlamangla et coll. 2004). La prédiction de l'incidence de la fracture de la hanche par l'utilisation des indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI (indice de résistance en compression), BSI (indice de résistance en flexion) et ISI (indice de force aux contraintes)) calculés à partir des scans densitométriques a été étudiée et confirmée par Karlamangla et coll. (2004). Ces indices intègrent la taille du col fémoral, les dimensions corporelles et la DMO du col fémoral (Yu et coll. 2010). Le CSI, le BSI et l'ISI reflètent la capacité du col fémoral à résister aux forces de compression, de flexion et d'absorber l'énergie lors d'un impact (Yu et coll. 2010). En outre, le risque de fracture de la hanche chez les personnes âgées et les évaluations de la résistance osseuse sont améliorées par l'utilisation de ces indices (Ayoub et coll. 2014 ; Karlamangla et coll. 2004). La DXA évalue aussi le score de l'os trabéculaire (TBS) ; c'est un indice de texture osseuse du rachis lombaire (Shevroja et coll. 2017). Les valeurs de TBS sont prédictives des fractures ostéoporotiques chez les personnes âgées (Bousson et coll. 2015). Cependant, l'utilisation du TBS en pratique clinique chez les jeunes adultes est relativement rare (Bousson et coll. 2015).

Plusieurs études antécédentes avaient pour objectif d'explorer les relations entre les niveaux de performance physique et les paramètres de santé osseuse (Henriques-Neto et coll. 2020). Plusieurs corrélations significatives ont été démontrées par plusieurs études entre la DMO et les performances obtenues dans certains tests physiques utilisés pour l'évaluation des composantes de la condition physique (Vicente-Rodriguez et coll. 2004 ; Sherk et coll. 2009). Les conclusions d'une étude menée sur les femmes adultes (Berro et coll. 2019) ont montré que le saut vertical (VJ), la puissance maximale des membres inférieurs et la force maximale en demi-squat sont positivement associés aux paramètres osseux (DMO et indices géométriques de la résistance osseuse de la hanche). De même, une autre étude menée sur de jeunes adultes (Khawaja et coll. 2019) a démontré des associations positives entre la puissance maximale des membres inférieurs et les paramètres de santé osseuse (DMO et indices géométriques de résistance osseuse de la hanche). De plus, plusieurs études menées sur de jeunes adultes ont montré que les niveaux d'AP sont des déterminants positifs des indices de résistance osseuse du col fémoral (El Hage, 2014 ; Finianos et coll. 2021a). Deux études antérieures menées sur des enfants pré-pubères (Sardinha et coll. 2008) et des femmes adultes (Mori et coll. 2014) ont aussi démontré des associations positives entre le niveau d'AP et les indices de résistance du col fémoral (Sardinha et coll. 2008 ; Mori et coll. 2014).

Les joueurs de sports collectifs ont des qualités aérobies et anaérobies importantes (Gharbi et coll. 2015). La pratique des sports collectifs est généralement associée à une augmentation des valeurs de DMO dans les deux sexes (Pereira et coll. 2021). Une autre étude récente a démontré que les hommes adultes inactifs ont des indices de résistance de résistance osseuse du col fémoral inférieurs à ceux retrouvés chez les hommes actifs de même âge (Zakhem et coll. 2020). Un essai contrôlé randomisé récent mené sur des femmes ménopausées (Pereira et coll. 2021) a également révélé que la pratique récréative du handball avait un impact positif sur le remodelage osseux et était efficace pour améliorer la santé osseuse et l'équilibre postural dans cette population sans expérience préalable dans le sport ; cette pratique sportive aide potentiellement à prévenir les risques de chutes et de fractures. Une autre étude récente menée sur des adolescentes (Fagundes et coll. 2022) a révélé que celles qui pratiquaient le handball pendant au moins un an avaient des valeurs de CMO plus élevées que celles qui étaient engagées dans l'entraînement de football, qui, également, montrent des valeurs de CMO plus élevées que les non-athlètes. De même, une étude précédente a démontré que la pratique du handball est associée à une

amélioration de la forme physique, une augmentation des masses maigres et osseuses, et une amélioration de la DMO axiale et appendiculaire chez les jeunes filles (Vicente-Rodriguez et coll. 2004).

Dans cette étude, nous avons cherché à vérifier si de tels résultats étaient présents chez les jeunes adultes. Le but de la présente thèse était de comparer les paramètres de santé osseuse (CMO, DMO, indices géométriques du CF (CSA, CSMI, Z, BR, SI) et indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI)) chez des jeunes adultes pratiquant le handball et des jeunes adultes inactifs. Cette thèse est basée sur les hypothèses suivantes :

- La pratique du handball est associée à une augmentation des valeurs de DMO dans les deux sexes.
- L'effet positif de la pratique du handball sur les paramètres osseux est plus important chez les hommes que chez les femmes.

PARTIE I

REVUE DE LA LITTERATURE

1. Généralités sur l'ostéoporose

1.1 Définition de l'ostéoporose

En vieillissant, notre densité osseuse diminue. C'est parfaitement physiologique. Mais cette diminution est plus importante chez certaines personnes par rapport à d'autres. On parle d'ostéopénie quand nous atteignons un score t compris entre -1 et -2,5, définie par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour une diminution de la densité minérale osseuse (DMO) en dessous des valeurs de référence normales, mais pas suffisamment faible pour répondre aux critères diagnostiques et être considérée comme ostéoporotique (Coughlan et coll. 2014). L'ostéoporose est une maladie caractérisée par une faible masse osseuse, une détérioration du tissu osseux et une perturbation de la microarchitecture osseuse : elle peut conduire à une résistance osseuse compromise et à une augmentation du risque de fractures (Baccaro et coll. 2015). Les fractures ostéoporotiques entraînent une diminution significative de la qualité de vie, avec une augmentation de la morbidité, de la mortalité et de l'invalidité. Selon les critères de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'ostéoporose est définie comme une densité minérale osseuse (DMO) qui se situe à 2,5 écart-type (SD) ou plus en dessous de la valeur moyenne retrouvée chez les jeunes femmes en bonne santé ($T\text{-score} < -2.5 \text{ SD}$) (Coughlan et coll. 2014). L'ostéoporose affecte un nombre important de personnes, des deux sexes, de toutes les races, et sa prévalence augmente avec le vieillissement de la population. C'est une maladie silencieuse jusqu'à ce que des fractures surviennent, ce qui provoque d'importants problèmes de santé secondaires comme une perte d'autonomie et même parfois la mort (Armas et coll. 2012).

Deux catégories d'ostéoporose ont été identifiées : primaire et secondaire. L'ostéoporose primaire est la forme la plus courante de la maladie et comprend l'ostéoporose post-ménopausique (type I) et l'ostéoporose sénile (type II). L'ostéoporose secondaire est caractérisée par un mécanisme étiologique clairement définissable (Stein & Shane, 2003). Le type I de l'ostéoporose primaire est associé à une perte d'œstrogène et d'androgène entraînant un renouvellement osseux accru,

une résorption osseuse dépassant la formation osseuse et une perte prédominante d'os trabéculaire par rapport à l'os cortical (Huidrom et coll. 2021). Le type II, qui représente la perte osseuse progressive liée à l'âge constatée dans les deux sexes est causé par la sénescence systémique et induite par la perte de précurseurs de cellules souches, avec une perte prédominante d'os cortical (Huidrom et coll. 2021). Contrairement à l'ostéoporose post-ménopausique qui est liée à la ménopause chez la femme, l'ostéoporose sénile est due au vieillissement et touche donc aussi bien les hommes que les femmes. On la trouve couramment chez les personnes de plus de 70 ans. Les preuves ont montré qu'avec l'âge, les cellules stromales de la moëlle osseuse (BMSC) se différencient de plus en plus en adipocytes plutôt qu'en ostéoblastes et subissent une sénescence, ce qui entraîne une diminution de la formation osseuse et contribue à l'ostéoporose sénile (Qadir et coll. 2020).

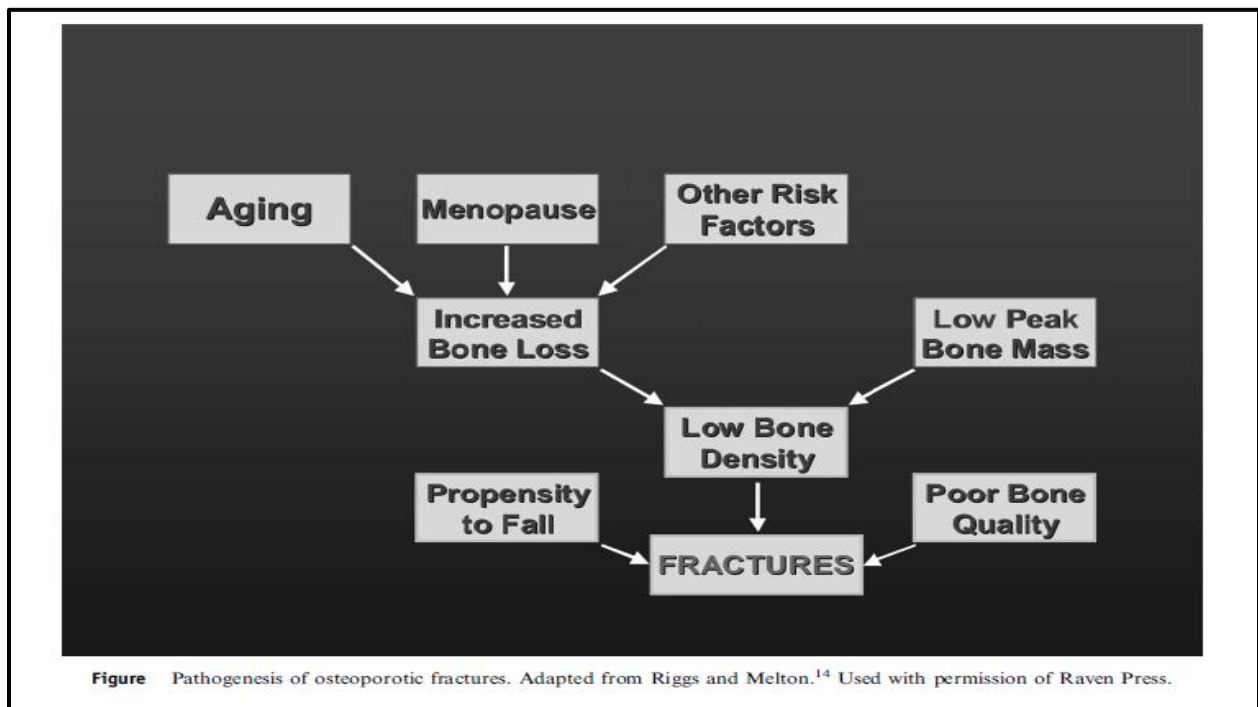


Figure 1 : Pathogenèse des fractures ostéoporotiques (Lane, 2006).

1.2 Diagnostic de l'ostéoporose

Le diagnostic précoce est la clé de la prévention et du traitement de l'ostéoporose. Les lignes directrices publiées sur le dépistage de l'ostéoporose varient considérablement. L'avantage du

dépistage pour la détection précoce de l'ostéoporose a été clairement démontré dans une étude portant sur 4 800 femmes âgées de 45 à 54 ans qui ont été randomisées pour être dépistées ou non dépistées pour l'ostéoporose (Barr et coll. 2010). Après un suivi de neuf ans, l'utilisation accrue de l'hormonothérapie substitutive et d'autres traitements contre l'ostéoporose a entraîné une diminution de 25,9 % du risque de fracture dans le groupe témoin (Barr et coll. 2010). Les auteurs ont conclu que les résultats significatifs étaient dus au dépistage précoce de l'ostéoporose. En général, la plupart des organisations recommandent que tous les adultes de plus de 50 ans ayant des antécédents de fracture, toutes les femmes âgées de 65 ans ou plus, tous les hommes âgés de 70 ans ou plus, toutes les femmes ménopausées ayant des causes médicales de perte osseuse (fumeur actuel, antécédent de fracture de la hanche chez un parent) et toutes les femmes ménopausées présentant une fracture de fragilité doivent être dépistées pour l'ostéoporose par mesure de la DMO (Sözen et coll. 2017), tel que recommandé par l'US Preventive Services Task Force (USPSTF), la Fondation Nationale de l'ostéoporose, et par d'autres lignes directrices. Un simple profil biochimique fournira des informations sur la fonction rénale et hépatique, l'hyperparathyroïdie primaire, homocystinurie, imagerie dans l'ostéomalacie, l'ostéodystrophie rénale, mastocytose, la maladie de Paget, Scorbut et la malnutrition possible (Tiefenbach et coll. 2018 ; Taniegra, 2004 ; Tran et coll. 2018). Le profil hématologique pourrait également fournir des indices sur la présence d'un myélome ou d'une malnutrition. La fonction thyroïdienne doit également être évaluée. L'électrophorèse des protéines sériques doit être réalisée sur tous les patients potentiellement ostéoporotiques lors de l'évaluation initiale (Dobbs et coll. 1999). Un profil normal exclut la présence d'un myélome multiple chez 90 % des patients. Les marqueurs osseux métaboliques, tels que l'hydroxyproline urinaire, la pyridinoline, la désoxypyridinoline et les N-télopeptides sont utiles pour déterminer quels patients ont une résorption osseuse élevée. Ils fournissent également un indice pratique pour savoir quelle thérapie pourrait réussir à réduire la perte osseuse ; cependant, ils ne sont pas sensibles pour diagnostiquer l'ostéoporose ou identifier le risque de fracture associé (Rivero et coll. 1997). La densité minérale osseuse est mesurée au moyen d'une double absorptiométrie à rayons X (DXA) ; c'est l'expression réelle de l'os en termes absolus de grammes de minéraux (principalement en g/cm^2 de calcium) par centimètre carré de l'os scanné. Les mesures par absorptiométrie à rayons X à double énergie (DXA) des hanches sont les meilleurs prédicteurs des risques de fracture de la hanche (Rivero et coll. 1997). Les mesures de la hanche totale, du col fémoral ou de la

colonne lombaire totale (ou une combinaison de ces sites) sont les plus utilisées. Si les sites de la hanche et/ou de la colonne lombaire ne peuvent pas être évalués ou deviennent inutilisables (par exemple en cas d'hyperparathyroïdie ou chez les patients très obèses), un tiers (33 %) du rayon du site peut être utilisé (Sozen et coll. 2017). Ainsi, le dépistage par absorptiométrie à rayons X à double énergie (DXA) est important pour obtenir un diagnostic précoce et éviter les fractures. Le résultat du test de densité minérale osseuse est exprimé en T-score. Un T-score de 0 correspond à la densité osseuse d'un jeune adulte en bonne santé entre 20 et 30 ans. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) recommande actuellement d'interpréter ces scores comme suit : Un T-score compris entre 0 et -1 est normal, un T-score entre -1 et -2,5 est faible (c'est ce qu'on appelle l'ostéopénie), et un T-score inférieur à -2,5 signifie que vous souffrez d'ostéoporose (Blake et coll. 2007).

TABLE 1 World Health Organization criteria for diagnosing osteoporosis using bone density measurements	
CATEGORY	T SCORE
Normal	Not more than 1.0 standard deviations (SD) below the young adult mean
Osteopenia	Between 1.0 and 2.5 SD below the young adult mean
Osteoporosis	More than 2.5 SD below the young adult mean
Severe or established osteoporosis	More than 2.5 SD below the young adult mean with a fracture

Figure 2 : Les critères de l'OMS pour le diagnostic de l'ostéoporose (Kanis et coll. 1994)

La DXA peut être facilement utilisé pour détecter la DMO, mais le degré de détérioration du tissu osseux ne peut pas être mesuré en milieu clinique, à l'exception des marqueurs biochimiques du tissu osseux (Blake et coll. 2007).

1.3 Facteurs de risque de l'ostéoporose

À l'intérieur des os, il y a une structure de support composée de toiles et de tiges osseuses interconnectées appelées trabécules. Cette structure est appelée os trabéculaire ou spongieux car elle ressemble un peu à une éponge ou à un nid d'abeilles. L'ostéoporose se développe lorsqu'une grande partie du tissu osseux spongieux se décompose, entraînant des espaces plus grands et une densité osseuse plus faible (Kelsey et coll. 1989). Chez la plupart des individus, la masse osseuse culmine au cours de la troisième décennie, après quoi la résorption osseuse dépasse la formation osseuse. L'incapacité à atteindre un pic de masse osseuse normal ou l'accélération de la perte osseuse peut conduire à l'ostéoporose (Aspray et coll. 2019). Les causes les plus favorables de l'ostéoporose comprennent l'âge, le sexe féminin, un faible indice de masse corporelle, l'origine ethnique (les blancs sont plus à risque que les noirs), une carence en vitamine D , un faible apport en calcium, l'état post-ménopausique, l'hypogonadisme ou l'insuffisance ovarienne prématurée, l'hyperthyroïdie, l'hyperparathyroïdie, la spondylarthrite ankylosante, la polyarthrite rhumatoïde, le lupus érythémateux, la maladie cœliaque, la polyarthrite rhumatoïde (PR), une faible DMO, l'hypercyphose, le tabagisme actuel, l'abus d'alcool, l'immobilisation et l'utilisation à long terme de certains médicaments, tels que les anticonvulsivants, les inhibiteurs de l'aromatase, les glucocorticoïdes, les anticoagulants, les médicaments de chimiothérapie anticancéreuse et les agonistes de la gonadolibérine (Aspray et coll. 2019).

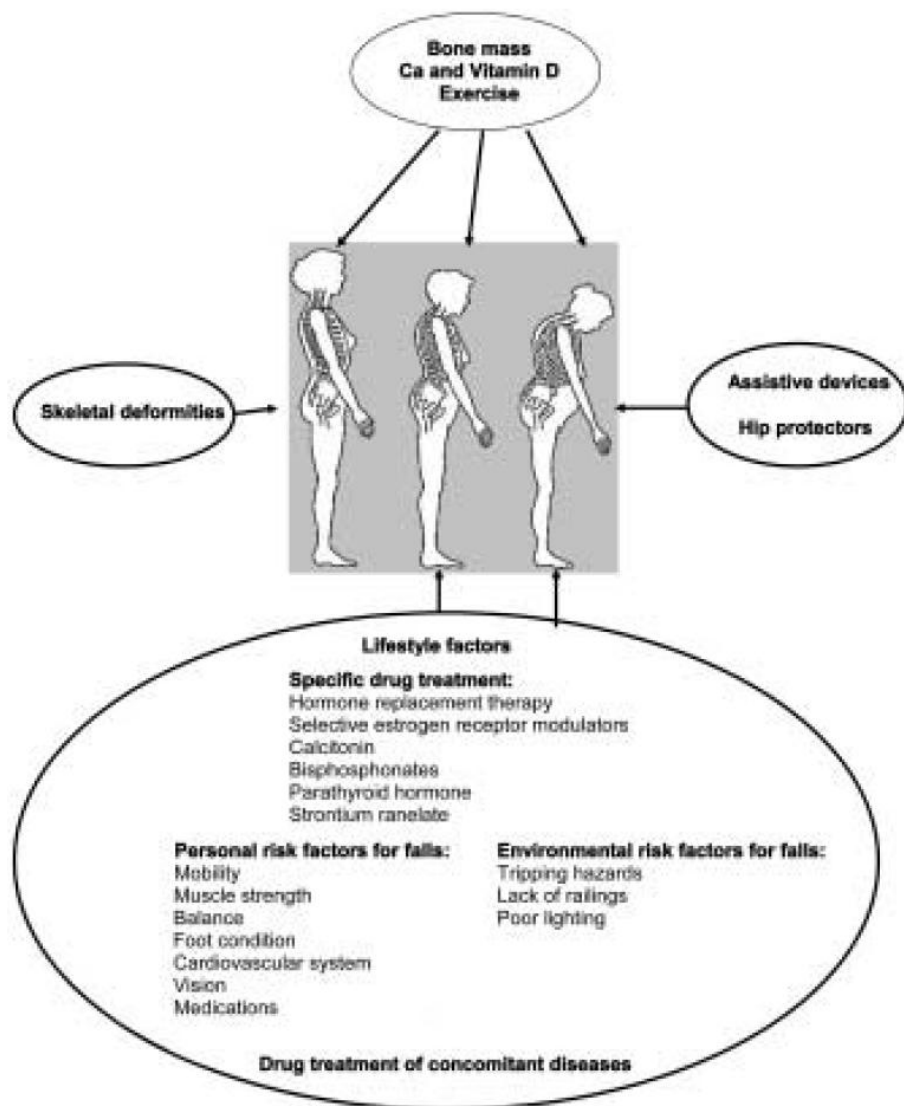


Figure 1. Factors to be considered for the prevention of osteoporosis-related fractures throughout life.

Figure 3 : Facteurs à considérer pour la prévention des fractures liées à l'ostéoporose tout au long de la vie (Dontas et Yiannakopoulos, 2007)

1.4 Conséquences de l'ostéoporose

Les maladies osseuses affectent considérablement l'état fonctionnel de ceux qui les contractent. De nombreuses personnes qui souffrent de fractures dues à l'ostéoporose souffrent de douleurs importantes, d'une perte de taille et peuvent perdre même la capacité de s'habiller seul, de se tenir debout et de marcher. Ces patients sont également à risque de complications aiguës telles que des escarres, une pneumonie et des infections des voies urinaires (Office of the Surgeon General. 2004). Les fractures pathologiques, en particulier au niveau de la hanche ou de la colonne vertébrale, sont les complications les plus graves de l'ostéoporose. Les fractures de la hanche résultent souvent de chutes et peuvent entraîner une invalidité et même un risque accru de mortalité dans les premiers temps suivant la blessure (Coughlan et coll. 2014). Les fractures de la hanche sont associées à une augmentation de 15 à 20 % du taux de mortalité à 1 an, avec un taux de mortalité plus élevé chez les hommes comparé aux femmes, suivi d'un risque 2,5 fois plus élevé de futures fractures (Miller, 2016). Environ 20 à 50 % des patients ayant subi une fracture de la hanche nécessitent des soins de longue durée en maison de retraite et souffrent d'une diminution de leur qualité de vie, d'un isolement social, de dépression et d'une perte d'estime de soi. Les patients ayant subi une fracture de la hanche présenteraient également plus d'incapacités de transfert et de toilette que les témoins (Miller, 2016). Les femmes qui tombaient le plus souvent après leur fracture de la hanche ont signalé une diminution de leur participation sociale indépendamment de leur fonction physique. Il existe également des fractures vertébrales en l'absence de chutes du patient, avec des fractures par compression entraînant des maux de dos et une posture cyphotique. Les fractures vertébrales sont également associées à une augmentation de la cyphose, mais seulement 36 à 37 % des personnes âgées présentant une cyphose significative présentent des fractures vertébrales. Le nombre moyen de jours d'hospitalisation et de jours d'activité limitée semblait plus élevé pour les fractures vertébrales lombaires par rapport aux fractures de la hanche (Coughlan et coll. 2014). Les fractures du poignet entraînent rarement une invalidité à long terme, mais elles sont néanmoins douloureuses, nécessitant un repositionnement des os et une stabilisation dans un plâtre pendant 4 à 6 semaines. Des études récentes suggèrent que les fractures du poignet peuvent aussi causer un certain nombre de problèmes à court terme, notamment des douleurs persistantes, une perte de fonction, des troubles nerveux (comme le syndrome du canal carpien), des déformations osseuses et de l'arthrite (Aroori et coll. 2008).

1.4.1 Mortalité

Malgré le grand nombre de personnes touchées, très peu de personnes meurent des suites directes d'une maladie osseuse, bien que la maladie osseuse puisse être sous-estimée en tant que cause indirecte de décès. Même les fractures de la hanche, qui représentent l'une des conséquences les plus graves des maladies osseuses, entraînent rarement directement la mort. Cependant, les maladies osseuses peuvent entraîner indirectement la mort, car les fractures et leurs complications associées peuvent, dans certains cas, déclencher une spirale descendante de la santé (Office of the Surgeon General. 2004). Environ 20% des patients ayant subi une fracture de la hanche sont décédés dans l'année suivant la fracture. Une autre étude, qui n'inclut que des patients ambulatoires et ne vivant pas dans des maisons de retraite au moment de leur fracture de la hanche, a révélé que les patients ayant subi une fracture de la hanche avaient un risque 2,8 fois plus élevé de mourir au cours des 3 mois suivant la fracture, bien que ce risque dépendait de leur état de santé avant la fracture. Ceux qui étaient en mauvaise santé avant la fracture avaient des taux de mortalité plus élevés (Johnston et coll. 2020). Une analyse récente a révélé que, sur une période de suivi de 8 à 22 ans, chaque diminution de l'écart type de la densité osseuse était associée à une augmentation de 10 à 40 % de la mortalité. Des études récentes ont également montré une augmentation de la mortalité après des fractures de la colonne vertébrale ainsi que des fractures de la hanche (Guzon-Illescas et coll. 2019).

1.4.2 Morbidité

Les maladies osseuses affectent considérablement l'état fonctionnel de ceux qui les contractent. Elles sont beaucoup plus susceptibles d'entraîner une mauvaise santé qu'elles ne causent la mort. De nombreuses personnes qui souffrent de fractures dues à l'ostéoporose souffrent de douleurs importantes, d'une perte de taille et peuvent perdre la capacité de s'habiller, de se tenir debout et de marcher (Baccaro et coll. 2015). Ces patients sont également à risque de complications aiguës telles que des escarres, une pneumonie et des infections des voies urinaires. Plus d'une personne sur quatre (26 %) souffrant d'une fracture de la hanche devient invalide l'année suivante à cause de la fracture (Marks et coll. 2010). En raison principalement de la démence et de l'incapacité de marcher de façon autonome, près d'une personne sur cinq a besoin de soins de longue durée en

maison de retraite (Porter et coll. 2022). Au total, les fractures de la hanche étaient responsables de près de 140 000 admissions en maison de retraite en 1995. Les fractures de la colonne vertébrale sont moins dévastatrices, avec seulement 10% nécessitant une hospitalisation et moins de 2 % nécessitant des soins en maison de retraite (Ray et coll. 1997). Les fractures du poignet (également appelées avant-bras distal) sont les moins invalidantes. Environ 20% seulement des patients souffrant d'une fracture du poignet sont hospitalisés et nécessitent rarement des soins en maison de retraite. Enfin, bien qu'elles soient moins dévastatrices que les fractures de la hanche, les fractures de la colonne vertébrale, du poignet et des autres membres sont plus fréquentes, et elles sont les principales contributrices de la morbidité liée à l'ostéoporose chez les femmes et les hommes d'âge moyen (Ray et coll. 1997).

1.4.3 Impact de l'ostéoporose sur l'état émotionnel

En plus des déficiences fonctionnelles, les fractures dues à une maladie osseuse peuvent avoir un impact négatif sur l'estime de soi, l'image corporelle et l'humeur, ce qui peut entraîner des conséquences psychologiques (Ramírez-Pérez et coll. 2014). Les personnes qui souffrent de fractures peuvent être immobilisées par peur de tomber et de subir des fractures supplémentaires. Sans surprise, elles peuvent commencer à se sentir isolées et impuissantes (Ramírez-Pérez et coll. 2014). Dans une enquête menée par la National Osteoporosis Foundation, 89% des femmes qui avaient déjà eu une fracture ostéoporotique ont dit craindre de se casser un autre os, 73% craignaient de devoir réduire leurs activités avec leur famille et leurs amis, 80% avaient peur d'être moins en mesure d'accomplir leurs activités quotidiennes, 80% craignaient de perdre leur indépendance (Office of the Surgeon General.2004). Si les patients ne sont pas traités, la peur de l'avenir et un sentiment d'impuissance peuvent produire une anxiété et une dépression importantes. Ces problèmes peuvent être aggravés par une incapacité à accomplir des tâches professionnelles, domestiques ou sociales, ce qui conduit à un isolement social accru (Office of the Surgeon General. 2004).

1.4.4 Coût économique

Les maladies osseuses sont coûteuses, en termes de dépenses de santé directes et de dépenses indirectes ainsi que de perte de productivité/jour de travail pour les patients et les soignants. Des études montrent que dans l'année suivant une fracture, les coûts médicaux et d'hospitalisation étaient de 1,6 à 6,2 fois plus élevés que les coûts avant la fracture et de 2,2 à 3,5 fois plus élevés que ceux des témoins appariés. L'analyse des coûts d'hospitalisation par type de fracture ostéoporotique a permis d'identifier les fractures de la hanche comme le type de fracture le plus coûteux (fourchette de coûts unitaires de 8 358 à 32 195 \$US), tandis que les fractures du poignet et de l'avant-bras étaient les moins coûteuses (fourchette de coûts unitaires de 1 885 à 12 136 \$US) (Budha et coll. 2012). Même si les coûts différentiels des fractures étaient généralement plus faibles chez les personnes âgées par rapport à la population plus jeune, les coûts totaux étaient les plus élevés pour la population plus âgée (≥ 65 ans) (Budha et coll. 2012). Alors que les femmes représentent la majorité de ces coûts, les hommes blancs encourent également des coûts globaux substantiels pour les soins des fractures ostéoporotiques (18% des coûts totaux de l'ostéoporose, soit 3,2 milliards de dollars). Les fractures de la hanche sont la complication la plus dévastatrice de l'ostéoporose, et il n'est donc pas surprenant qu'elles représentent la plus grande partie des coûts des soins médicaux. Cependant, les coûts de prise en charge des fractures de la hanche ne se limitent pas à ce traitement initial, car les personnes souffrant de fracture de la hanche nécessitent des soins de suivi en conséquence directe de leur blessure. Une étude récente a estimé que les soins hospitaliers et ambulatoires (à l'exclusion des soins en maison de retraite) dus à une fracture de la hanche ajoutent 14 600 \$ aux dépenses médicales directes dans l'année suivant la fracture (Marinho et coll. 2014). En plus d'imposer des coûts médicaux directs à la société, l'ostéoporose entraîne également des coûts indirects, principalement liés à la baisse de productivité due aux incapacités et aux décès prématurés. Les coûts indirects sont par nature difficiles à mesurer et il reste encore beaucoup à faire dans ce domaine. Cependant, une étude estime que le coût des décès prématurés et des activités restreintes résultant des fractures représente 26 % des coûts totaux des fractures et 12 % des coûts des fractures de la hanche (Office of the Surgeon General, 2004).

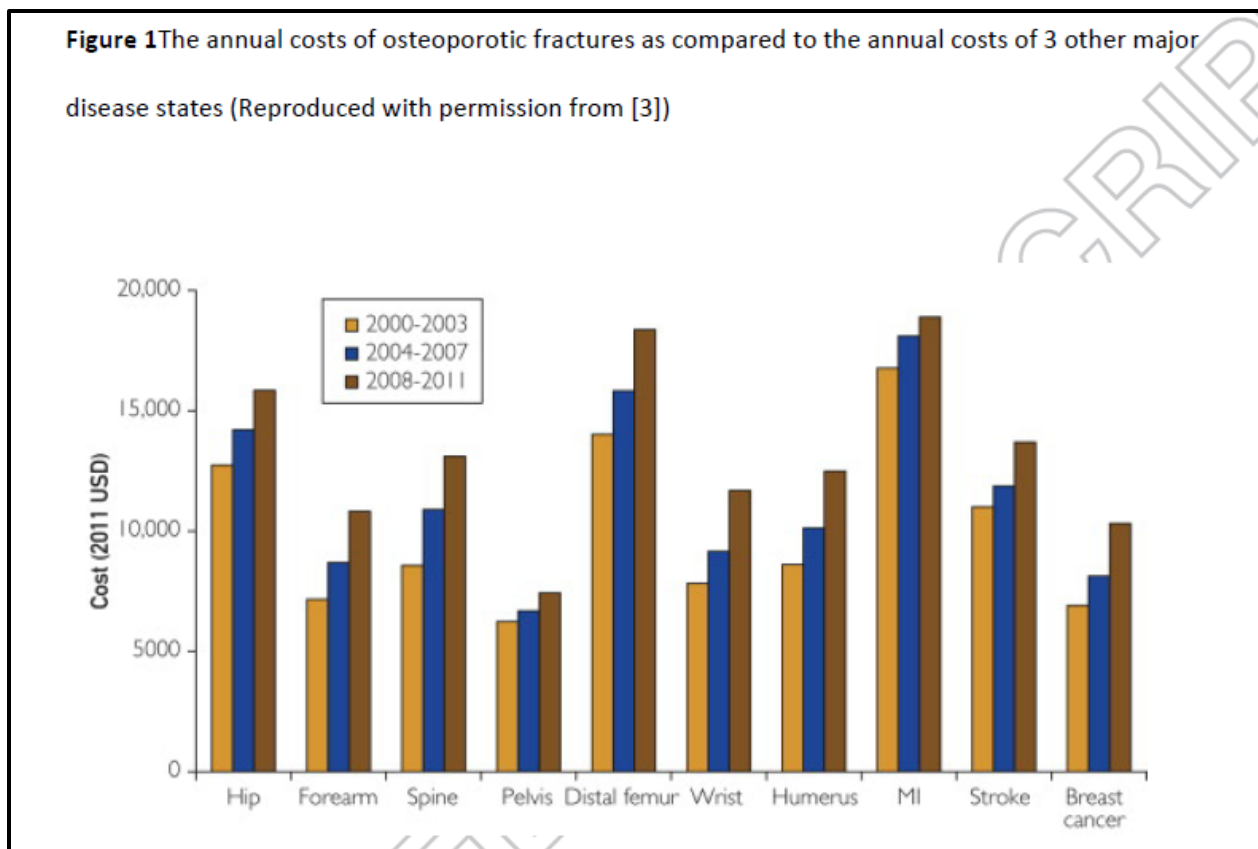


Figure 4 : Les coûts annuels des fractures ostéoporotiques par rapport aux coûts annuels de trois états pathologiques majeurs (Miller, 2016)

1.5 Prévention des fractures

La plupart des études se sont concentrées sur les effets des thérapies anabolisantes et des thérapies anti-résorptives sur la perte osseuse généralisée.

1.5.1 Les thérapies anaboliques

Ce type de thérapie contre l'ostéoporose fait référence à l'utilisation de composants médicamenteux, c'est-à-dire d'hormones recombinantes telles que l'hormone parathyroïdienne (PTH), l'hormone de croissance (GH), le facteur de croissance analogue à l'insuline (IGF) 1, le strontium, le fluorure, la protéine morphogénétique osseuse (BMP)-2, la BMP-7 (également

appelée protéine ostéogénique-1 [OP-1]), les facteurs de croissance basiques des fibroblastes (bFGF) et le facteur de croissance de l'endothélium vasculaire (VEGF) pour renforcer, stimuler la synthèse osseuse et traiter la maladie en augmentant la vitesse de guérison des fractures et des fusions osseuses (Lane et Kelman, 2003). En plus des suppléments de calcium sont utilisés pour prévenir la résorption osseuse et augmenter la DMO (Möricke et coll. 2014).

1.5.2 Les thérapie anti-résorptives

Ce type de thérapie est appliqué pour le traitement de l'ostéoporose en raison de son effet sur le renforcement des os (Stavropoulos et coll. 2018). La thérapie se compose de cinq types de composants chimiques, à savoir les bisphosphonates, une classe de médicaments anti résorptifs qui peuvent affecter l'activité des ostéoclastes, l'hormonothérapie substitutive pour le traitement de l'ostéoporose et en particulier pour le soulagement des symptômes de la ménopause (Lewiecki, 2010), la tibolone qui est un stéroïde synthétique utilisé chez les femmes ménopausées précoces, entraînant une augmentation de la DMO en raison de l'extension du traitement de substitution aux œstrogènes, les modulateurs sélectifs des récepteurs aux œstrogènes (SERM) tels que le raloxifène utilisés pour le traitement de l'ostéoporose postménopausique augmentant la DMO et qui réduisent le risque de fracture vertébrale (Lewiecki, 2010), le bazédoxifène inhibant les réponses induites par les œstrogènes dans les glandes mammaires dans des modèles animaux et en conjugaison avec des œstrogènes, il est utilisé pour le traitement de l'ostéoporose ménopausique, et un anticorps anti-RANKL et des inhibiteurs de la cathepsine K, induisant un gain de densité minérale osseuse (DMO) dans une étude de phase II chez des patientes ménopausées ostéoporotiques (Kulak et coll. 2011).

1.5.3 Prévention des chutes en pratique

Les chutes sont à l'origine de la majorité des fractures ostéoporotiques ; par conséquent, un programme doit être structuré pour le traitement efficace de l'ostéoporose afin de prévenir les chutes (Sattar et coll. 2021). Les personnes âgées et fragiles et celles qui ont subi un accident vasculaire cérébral ou qui prennent des médicaments qui diminuent la vigilance mentale sont

particulièrement prédisposées aux chutes. Bien que plusieurs interventions réduisent le risque de chute, aucune d'entre elles ne réduit apparemment le risque de fractures (Sattar et coll. 2021). Les patients plus âgés présentant une cyphose sévère, une gêne dorsale et une instabilité de la marche, pourraient bénéficier d'exercices de mise en charge, de renforcement du dos et de thérapies d'entraînement à l'équilibre (Katzman et coll. 2017). Faire de l'exercice peut aussi aider ; une activité physique régulière améliore la coordination et l'assurance. Être vigilant à la maison afin d'éviter les risques de glisser ou de trébucher sur un seuil de porte ou de se prendre le pied dans des câbles, des tapis lâches et d'autres obstacles (Jeon et coll. 2014).

Certains médicaments peuvent également augmenter le risque de chute. Les patients prenant des médicaments psychotropes semblent avoir un risque environ 2 fois plus élevé de chutes et de fractures, par rapport aux personnes ne prenant pas ces médicaments. La preuve la plus solide concerne les antidépresseurs; presque toutes les études pertinentes ont trouvé une association avec les chutes. L'effet relatif des inhibiteurs sélectifs de la recapture de la sérotonine (5-hydroxytryptamine ; 5-HT) et des antidépresseurs tricycliques sur les chutes est encore inconnu. L'effet sur le risque de chute des benzodiazépines à courte durée d'action par rapport aux benzodiazépines à longue durée d'action n'est pas simple : c'est peut-être la dose de benzodiazépine qui importe, plutôt que la demi-vie du médicament (Cumming, 1998). La réduction de la consommation de psychotropes par les résidents des maisons de repos devrait être une priorité pour les médecins, les pharmaciens et le personnel infirmier. La consommation de psychotropes devrait également être réduite au minimum chez les personnes âgées vivant dans la communauté. On ne sait pas si les médicaments utilisés pour traiter les problèmes cardiovasculaires provoquent des chutes ou non. Le patient doit discuter avec son médecin pour savoir s'il a vraiment besoin de tous les médicaments qu'il prend et s'il pourrait y avoir des interactions médicamenteuses. Pour se préparer à l'exposé, il peut dresser une liste de ses médicaments (De Jong et coll. 2013).

2. Méthodes d'évaluation des paramètres osseux

2.1 La DXA

Les patients ayant reçu un diagnostic d'ostéoporose doivent subir une évaluation en laboratoire de leur fonction rénale et thyroïdienne, de la 25-hydroxyvitamine D et du taux de calcium (Shepherd et coll. 2017). L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a établi que les tests d'absorptiométrie à rayons X doubles du squelette central sont les meilleurs pour évaluer la densité minérale osseuse (Bazzocchi et coll. 2016). Un double balayage d'absorptiométrie à rayons X peut être effectué en cinq minutes avec une exposition minimale aux rayonnements (Shepherd et coll. 2017). Les analyses d'absorptiométrie à rayons X doubles mesurent tous les tissus calcifiés sur le trajet de l'analyse, et la spécificité est meilleure que la sensibilité (Guss et coll. 2021). Les tests d'absorptiométrie périphérique à double rayons X mesurent la densité dans les os qui ne sont pas à haut risque et ne sont pas bien corrélés à l'examen de DXA standard de la hanche et de la colonne vertébrale (Bazzocchi et coll. 2016). Ils ne sont pas aussi utiles dans les décisions de diagnostic ou de traitement. Une double analyse d'absorptiométrie à rayons X rapporte le T-score et le Z-score. Le T-score reflète la différence entre la densité minérale osseuse mesurée et la valeur moyenne de la densité minérale osseuse chez les jeunes adultes (Guss et coll. 2021). Lorsque les valeurs de base de la DMO sont utilisées pour diviser les patients en quartiles, une relation inverse est trouvée entre le risque de fracture et la DMO (Stratrova et coll. 2021). Pour décrire cette relation, les mesures de DMO sont d'abord converties en Z-scores. Les scores Z sont similaires aux scores T sauf qu'au lieu de comparer la DMO du patient avec la moyenne des jeunes adultes, il est comparé à la DMO moyenne attendue pour les pairs du patient (par exemple, pour un sujet sain normal apparié pour l'âge, le sexe et le groupe ethnique) (Shepherd et coll. 2017). L'OMS a défini la densité minérale osseuse normale pour les femmes comme un T-score dans un écart-type de la moyenne des jeunes adultes. Les scores entre moins 1 et moins 2,5 reflètent un diagnostic d'ostéopénie. Les scores inférieurs à 2,5 reflètent un diagnostic d'ostéoporose (Stratrova et coll. 2021). La DXA est un outil validé développé par l'organisation mondiale de la santé et un outil d'évaluation du risque d'ostéoporose qui donne la probabilité à dix ans d'une fracture majeure (Baker et coll. 2021). Elle peut être utilisée chez l'homme ou la femme et prend en compte l'indice de masse corporelle, les facteurs de risque indépendants et certaines causes d'ostéoporose secondaire. Elle est très utile pour déterminer quels patients atteints d'ostéopénie ont besoin d'un traitement et quels patients de moins de 50 ans pourraient bénéficier d'un double balayage par absorptiométrie à rayons X en raison d'un

risque élevé de fractures (Baker et coll. 2021). Il n'a pas d'utilité pour les patients qui sont déjà traités pour l'ostéoporose.

2.2 L'IRM

L'évaluation par imagerie par résonance magnétique (IRM) de la structure et de la microarchitecture osseuses a été proposée comme une méthode pour évaluer la qualité des os et le risque de fracture in vivo et fournir un aperçu détaillé des conséquences architecturales de la progression et de la régression de la maladie en réponse au traitement (Sanguineti et coll. 2020). L'IRM est avantageuse car non invasive, ne nécessitant pas de rayonnement ionisant et capable d'évaluer à la fois l'os cortical et l'os trabéculaire (Helmstädter et coll. 2014). L'IRM de la microarchitecture osseuse a été décrite pour la première fois, il y a environ deux décennies, dans le radius distal et le calcaneum (Sanguineti et coll. 2020). L'IRM de la microarchitecture trabéculaire se réfère en fait à l'imagerie du contenu médullaire du compartiment du tissu osseux trabéculaire ; le signal médullaire hyperintense offre un contraste avec les plaques et bâtonnets trabéculaires, qui sont hypointenses sur les images IRM conventionnelles (Dvornik et coll. 2020). Le réseau trabéculaire peut être quantifié par IRM à haute résolution (micro-IRM), qui nécessite une résolution adéquate pour visualiser au moins partiellement les trabécules individuelles. L'analyse structurale basée sur la micro-IRM est donc techniquement exigeante en termes d'acquisition d'images et d'algorithmes nécessaires pour extraire les informations structurales dans des conditions de rapport signal sur bruit et de résolution limitée (Helmstädter et coll. 2014). Le rapport signal/bruit (SNR) accru fourni par les scanners à plus forte intensité de champ peut permettre des réductions de la taille des voxels et des temps de balayage et peut permettre le balayage de sites squelettiques plus proximaux, qui, en raison de leur emplacement anatomique plus profond (entraînant un SNR inférieur) sont plus difficiles à imager avec la même qualité et la même résolution (Sanguineti et coll. 2020). Alors que les premières études IRM de la microarchitecture osseuse ont été réalisées dans les extrémités distales (poignet, cheville), au cours de la dernière décennie, des sites anatomiques plus proximaux ont été étudiés, notamment le tibia proximal, le fémur distal et la hanche ou le fémur proximal (Helmstädter et coll. 2014).

2.3 La Radiographie

La radiographie décrit le processus de création d'images de projection en deux dimensions en exposant une anatomie d'intérêt aux rayons X et en mesurant l'atténuation qu'ils subissent lorsqu'ils traversent l'objet (Van Eerd et coll. 2021). C'est une forme très courante d'imagerie par rayons X et elle est utilisée dans les cliniques du monde entier. Les rayons X appartiennent au groupe des rayons électromagnétiques, par conséquent, ils suivent les règles du rayonnement électromagnétique (Gong et coll. 2013). Ce dernier transporte de l'énergie, également appelée énergie rayonnante, à travers l'espace par des ondes et des photons, tout comme les ondes radio, la lumière visible ou les micro-ondes (Van Eerd et coll. 2021). Elle peut être représentée soit par des photons, soit par un modèle d'onde. Le rayonnement peut être classé par sa longueur d'onde λ qui est la longueur d'une période de l'onde. La longueur d'onde peut également être représentée par la fréquence et la vitesse de propagation des ondes, la vitesse de la lumière (Wielpütz et coll. 2017). Le domaine d'application principal est l'examen des fractures et des modifications du système squelettique. Ici, le coefficient d'atténuation élevé des os par rapport au tissu environnant offre un bon contraste et permet une détection et une classification distinctes des fractures (Wielpütz et coll. 2017). De plus, la radiographie peut être utilisée pour détecter les changements de consistance ou de densité d'un os, par exemple en cas d'ostéoporose ou de cancer des os (Katsurada et coll. 2017). En plus, l'évaluation des poumons est également possible, et l'utilisation du contraste peut également aider à examiner les organes et les tissus mous du corps, y compris le tractus gastro-intestinal et l'utérus, comme dans le cadre d'une hystérosalpingographie (Wielpütz et coll. 2017). La radiographie est utile pour effectuer diverses procédures, notamment l'angiographie par cathéter, les biopsies stéréotaxiques du sein ainsi qu'une injection intra-articulaire de stéroïdes. La radiographie aide à l'évaluation de multiples pathologies, y compris les fractures, les types de pneumonie, les tumeurs malignes, ainsi que les anomalies anatomiques congénitales (Katsurada et coll. 2017).

2.4 La Tomographie

L'évaluation de la qualité osseuse locale sur les tomодensitogrammes avec la quantification en unités Hounsfield (HU) est de plus en plus utilisée (Ohlerth et coll. 2004). Des corrélations entre

l'HU et la densité minérale osseuse ont été établies et des données normatives ont été définies sur l'ensemble du rachis (Ohlerth et coll. 2004). Des recherches ont ensuite exploré l'utilité des valeurs HU dans l'évaluation du risque de fracture, la stabilité d'un implant et le succès d'une fusion vertébrale (Puchalski et coll. 2012). Les informations fournies par une simple mesure de l'HU peuvent alerter le médecin traitant d'une diminution de la qualité osseuse, ce qui peut être utile pour la prise en charge médicale et chirurgicale des patients (Puchalski et coll. 2012). Il est important de noter que ce dépistage opportuniste ne nécessite pas de temps supplémentaire pour le patient ou d'exposition aux rayonnements, et très peu de temps de la part du personnel de radiologie, ce qui améliore encore le rendement clinique de la tomодensitométrie ; un avantage évident de la TDM, par rapport au dépistage par DXA, est sa capacité à identifier avec précision les fractures par compression ostéoporotiques insoupçonnées, qui diagnostiquent clairement l'ostéoporose indépendamment du T-score DXA du patient (Puchalski et coll. 2012). La tomодensitométrie fournit en plus des mesures quantitatives de la structure osseuse et peut aussi être utilisée pour estimer mathématiquement la résistance des os (Puchalski et coll. 2012). Les techniques peuvent fournir des informations cliniquement pertinentes en améliorant notre compréhension du risque de fracture et en établissant l'efficacité de l'anti-fracture pour l'ostéoporose et d'autres troubles métaboliques osseux (Ohlerth et coll. 2004). La tomодensitométrie micro (μ CT) suit le même principe de tomодensitométrie utilisé pour les patients, mais offre une résolution plus élevée (Ulzheimer et coll. 2011). En utilisant une approche non destructive, des échantillons peuvent être numérisés et chaque coupe obtenue est utilisée pour construire un volume à l'aide d'une reconstruction tridimensionnelle (Ulzheimer et coll. 2011). Pour l'analyse osseuse, il est possible d'obtenir des informations sur la microarchitecture et la composition du tissu. L'os spongieux est évalué au moyen des caractéristiques des travées et de leur connectivité. Le cortex est évalué en fonction de son épaisseur et de sa porosité (Noo et coll. 2015). La densité minérale osseuse peut également être évaluée par la mesure de la quantité d'hydroxyapatite. D'autres paramètres tels que la structure-modèle-indice, l'anisotropie et la dimension fractale peuvent être évalués (Noo et coll. 2015). En conclusion, les déterminants intrinsèques et extrinsèques de la qualité osseuse peuvent être évalués par μ CT. En dentisterie, cette méthode peut être utilisée pour évaluer la perte osseuse, les altérations du métabolisme osseux ou les effets de l'utilisation de médicaments qui altèrent le

remodelage osseux, ainsi que pour évaluer le taux de réussite de la réparation osseuse ou des interventions chirurgicales (Noo et coll. 2015).

2.5 Les Ultrasons

Selon l'Organisation mondiale de la santé, seul un tiers de la population mondiale a un accès local à l'imagerie diagnostique ; donc plus de cinq milliards de personnes ne l'ont pas (Maw et coll. 2019). Cependant, des appareils à ultrasons de haute qualité et abordables ont été développés, ce qui améliorera l'accessibilité à l'imagerie diagnostique et pourrait aider à combler cette lacune (Becker et coll. 2016). Pour les deux tiers de la population mondiale n'ayant pas accès à l'imagerie diagnostique de base, cela serait d'une grande utilité pour identifier le besoin d'une imagerie plus poussée. Le service des urgences dans les établissements de soins secondaires bénéficierait également du PoCUS des traumatismes mineurs, prévenant les fractures manquées et augmentant la précision et la pertinence des références aux cliniques de fracture (Reynolds et coll. 2018). Contrairement aux méthodes basées sur les rayons X, l'interaction des ondes acoustiques avec le tissu osseux contient des informations sur les propriétés élastiques et structurelles du tissu (Maw et coll. 2019). Les méthodes d'échographie quantitative (QUS) représentent des alternatives puissantes à l'évaluation du risque de fracture basée sur les rayons X ionisants. De nouvelles méthodes applicables in vivo permettent de mesurer les propriétés pertinentes pour la fracture, par exemple, l'épaisseur et la rigidité corticales dans les régions anatomiques fragiles comme le radius distal et le fémur proximal (Becker et coll. 2016). Expérimentalement, la spectroscopie ultrasonore de résonance et la microscopie acoustique peuvent être utilisées pour évaluer le tenseur de rigidité à mésoéchelle et les cartes élastiques de la matrice tissulaire à une résolution microscopique, respectivement. Les méthodes QUS représentent donc actuellement l'approche la plus prometteuse pour l'évaluation non invasive des composants de la fragilité au-delà de la masse osseuse et de la microstructure osseuse, offrant des perspectives pour une meilleure évaluation du risque de fracture (Reynolds et coll. 2018). QUS est sensible aux changements liés à l'âge et à la ménopause ainsi qu'aux facteurs de risque cliniques et aux facteurs liés au mode de vie associés à l'ostéoporose (Reynolds et coll. 2018). Bien qu'une capacité limitée de QUS à surveiller l'intervention thérapeutique ait été démontrée, il s'agit toujours d'un domaine où sa précision est plus faible, par rapport à la DXA, ce qui entraîne

une applicabilité limitée. Alors que la DXA reste la méthode de référence pour le diagnostic de l'ostéoporose, QUS peut être utile pour la prédiction des personnes à risque de fracture future dans les zones où la disponibilité de la DXA est limitée (Maw et coll. 2019). La QUS est une technologie relativement nouvelle, du moins dans son application à la fragilité osseuse. Néanmoins, QUS a démontré qu'il est capable de détecter la fragilité osseuse ainsi que la DXA. Cependant, le diagnostic d'ostéoporose par QUS reste controversé, mais les problèmes sont davantage dus aux limitations des T-scores actuels qu'à la technique elle-même (Becker et coll. 2016).

2.6 Les problèmes connus

Outre les limitations communes que partagent tous les systèmes d'imagerie, par exemple la résolution spatiale et le rapport de contraste, les systèmes d'intensification d'image sont les plus connus pour les artefacts de vignettage et de distorsion (Su et coll. 2021). Le vignettage décrit une baisse de luminosité qui se produit au niveau des parties extérieures de l'écran. Elle est causée par la diffusion de la lumière qui dévie les photons lumineux dans le phosphore de sortie de la partie externe vers l'intérieur (Kemerink et coll. 2012). Cependant, aucune diffusion ne se produit complètement à l'extérieur du matériau vers les régions extérieures du luminophore, produisant une luminosité accrue dans les régions centrales. Un autre artefact courant est la distorsion de l'image (Kemerink et coll. 2012). Il est connu que l'optique électronique des intensificateurs d'images est sensible aux champs magnétiques ou électriques externes. Même le champ magnétique terrestre provoque des distorsions considérables dans l'image de sortie (Su et coll. 2021).

3. Les déterminants du pic de masse osseuse

Le pic de masse osseuse (PMO) est défini comme la quantité de tissu présent en fin de maturation squelettique. La résistance osseuse est principalement déterminée par la densité volumétrique, c'est-à-dire, la quantité de tissu osseux par unité de volume, par dimensions osseuses, par microarchitecture intra-osseuse, et par la qualité intrinsèque de l'os (Bonjour et

coll. 1994). Les patients présentant une fracture vertébrale ont une surface corporelle vertébrale transversale plus petite que les sujets non fracturés. Avant la puberté, aucune différence entre les deux sexes concernant la masse osseuse du squelette axial ou appendiculaire n'a été rapportée (Zhu & Zheng, 2021). De plus, il n'y a aucune preuve d'une différence entre les sexes dans la masse osseuse à la naissance. De même, la densité minérale osseuse volumétrique (DMO) semble être similaire chez les nouveau-nés féminins et masculins. Cette absence de différence entre les sexes dans la masse osseuse est maintenue jusqu'au début de la maturation pubertaire (Specker & Minett, 2013). La puberté est une période importante pour l'acquisition osseuse et contribue largement à la valeur PMO. Cette augmentation se produit environ 2 ans plus tard chez les hommes comparé aux femmes (Zhu & Zheng, 2021). Pendant la puberté, le taux d'accumulation de la DMO surfacique au niveau lombaire, au niveau de la colonne vertébrale et au niveau du col fémoral augmentent sur 3 ou 4 période par an chez les femmes et les hommes, respectivement (Zhu & Zheng, 2021). Le changement dans le taux d'accumulation de masse osseuse est moins marqué dans les diaphyses des os longs. La puberté affecte beaucoup plus la taille des os que la DMO volumétrique. Il n'y a pas de différence significative entre les sexes dans la densité trabéculaire volumétrique au bout de la maturation pubertaire. Cependant, les personnes noires ont une plus grande densité volumétrique que les personnes blanches : le nombre trabéculaire est similaire, mais les trabécules semblent être plus épais (Specker & Minett, 2013). Dans l'os périphérique cortical, il n'existe pas de différence entre les sexes au niveau de la section transversale de la diaphyse fémorale. Cependant, il est plus important chez les noirs que chez les blancs pour une épaisseur corticale identique. Le tissu osseux situé plus loin de l'axe central de l'os confère une plus grande résistance à la flexion. Il y a une asynchronie entre le gain en stature, la taille et la croissance de la masse osseuse. En effet, le pic de la vitesse de croissance staturale précède le pic de la vitesse maximale du gain minéral osseux. Chez les hommes, la plus grande différence survient dans le groupe d'âge de 13 à 14 ans et est plus prononcé pour la colonne lombaire et le col fémoral que pour la diaphyse fémorale (Schönauf, 2004). Chez les femmes, la plus grande différence se produit dans le groupe d'âge de 11 à 12 ans, correspondant dans les deux sexes aux stades pubertaires P2– P3. Ce phénomène peut être responsable de l'apparition d'une augmentation relative transitoire de l'os causant une sorte de fragilité (Zhu & Zheng, 2021). Plus le pic de masse osseuse atteint chez les jeunes adultes est élevé, plus un individu peut « se permettre » de perdre de la masse osseuse à un âge avancé sans

subir de fracture. Un pic de masse osseuse faible entraînera un risque plus élevé d'ostéoporose; au contraire, un pic de masse osseuse élevé fournira une réserve plus importante pour la vieillesse, réduisant ou retardant le risque d'une personne de devenir ostéoporotique (Schönauf, 2004). Par conséquent, l'acquisition d'une masse osseuse optimale est un facteur essentiel pour déterminer le risque futur d'ostéoporose et de fractures.

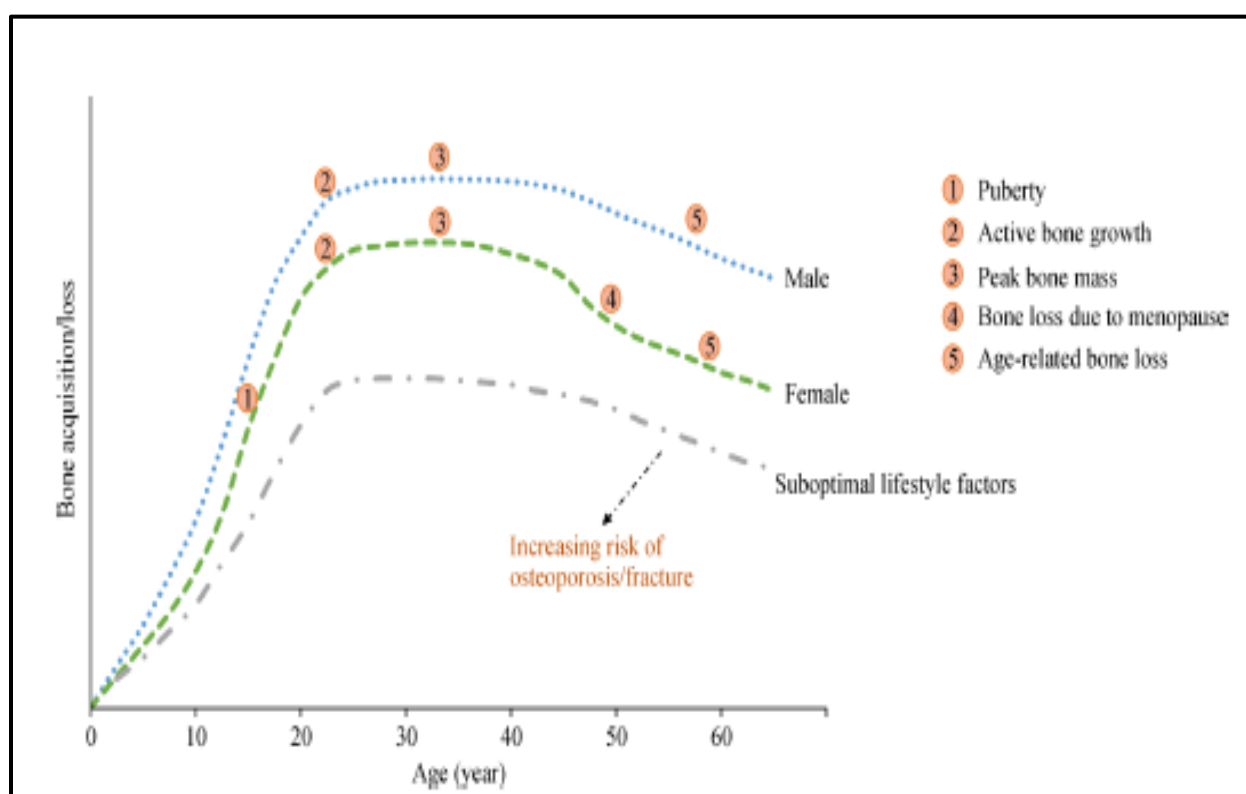


Figure 5 : Evolution de la masse osseuse durant la vie (Zhu et Zheng, 2021).

3.1 Les facteurs génétiques

La ressemblance familiale pour la masse minérale osseuse chez les mères et les filles est exprimée avant le début de la maturation pubertaire. La comparaison du degré de corrélation entre les paires de jumeaux monozygotes versus dizygotes permet d'estimer plus précisément la contribution de l'héritabilité à la variance de la masse minérale osseuse (Stewart et Ralston, 2000). Ce calcul suggère que l'héritabilité, c'est-à-dire les effets additifs des gènes, explique 60 à 80 % de la variance de la masse minérale osseuse adulte. Cet « effet génétique » semble être plus

important dans les sites squelettiques tels que la colonne lombaire par rapport au col fémoral (Zmuda et coll. 1999). Il est possible que des facteurs mécaniques (par exemple l'activité physique, le poids corporel, la force musculaire) exercent une plus grande influence sur la composante corticale du fémur proximal que sur l'armature trabéculaire prédominante des corps vertébraux, expliquant ainsi l'héritabilité relativement faible de la DMO fémorale (Zmuda et coll. 2006). Les interactions gène-environnement dans la réponse squelettique à la nutrition et à l'activité physique pendant la croissance sont un domaine compliqué à étudié. Celles-ci restent à aborder par des conceptions d'étude appropriées. L'identification des gènes impliqués interagissant avec les nutriments spécifiques aux os et la réponse à la charge mécanique représente un défi formidable, mais espérons-le, pas insurmontable (Stewart et Ralston, 2000).

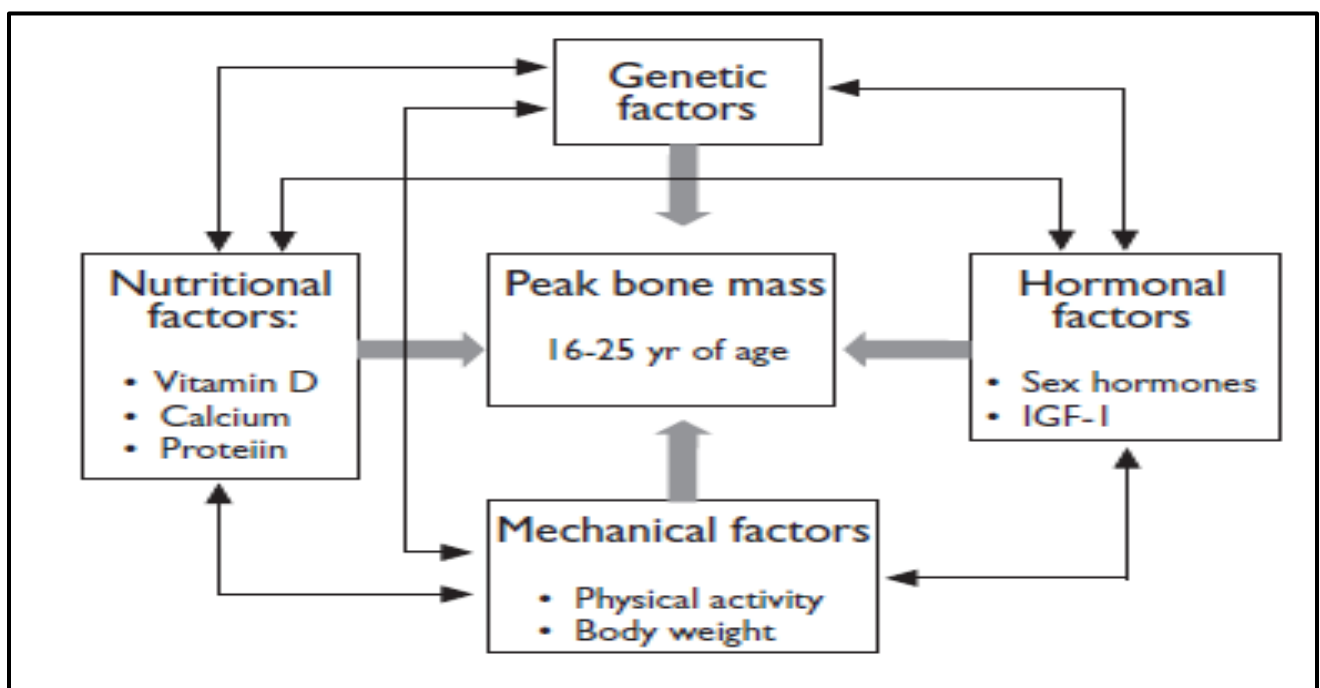


Figure 6 : Déterminants physiologiques du pic de masse osseuse (Bonjour et coll. 2009).

3.2 Les facteurs mécaniques

Les os en croissance sont généralement plus sensibles à la charge mécanique que les os adultes (Amin, 2010). L'activité physique augmente l'accumulation de masse minérale osseuse chez les enfants et les adolescents (Hart et coll. 2017). Cependant, l'impact semble être plus fort avant que pendant ou après la période de maturation pubertaire (Cole, 2011). Les enfants et les adolescents pratiquant divers sports de compétition tels que la gymnastique, le ski, le basketball, le football, le handball, le volleyball et le rugby et donc subissant un entraînement intense, affichent un gain de masse minérale osseuse (Hart et coll. 2017). Le gain plus important de DMO ou de CMO chez les jeunes athlètes par rapport aux témoins moins actifs est préférentiellement localisé dans les os porteurs, tels que le fémur proximal (Augat et coll. 2015). Des études chez des athlètes élite adultes indiquent que l'augmentation des gains de masse osseuse résultant d'une activité physique intense pendant l'enfance et l'adolescence se maintient même si l'entraînement s'atténue, voire cesse complètement (Osterhoff et coll. 2016). Les forces mécaniques affectent le squelette en améliorant la formation osseuse ostéoblastique, tout en inhibant la résorption osseuse ostéoclastique (Osterhoff et coll. 2016). L'effet sur le nombre et l'activité des ostéoblastes implique probablement plusieurs facteurs locaux. Certains semblent être produits par les ostéocytes (Augat et coll. 2015). La densité, la distribution et le vaste réseau de communication des ostéocytes les rendent particulièrement bien structurés pour fonctionner comme des détecteurs de contrainte mécanique en détectant le mouvement des fluides dans les canalicules osseux. Ils peuvent diriger la formation de nouvel os en activant les cellules de revêtement pour qu'elles se différencient en préostéoblastes (Amin, 2010). Une molécule clé impliquée dans ce processus de mécanotransduction semble être la sclérostine, le produit du gène SOST. Les patients atteints de sclérose et de masse osseuse élevée peuvent avoir des mutations soit au niveau du gène LRP5 soit au niveau du SOST (Hart et coll. 2017). La sclérostine peut se lier et s'opposer à LRP5, un co-récepteur Wnt nécessaire à la formation osseuse en réponse à une charge mécanique. La charge mécanique peut induire une réduction marquée de la sclérostine à la fois dans les ostéocytes et dans le réseau des canalicules (Forwood et coll. 2001). De plus, des preuves d'un rôle clé de cette voie moléculaire ont été récemment rapportées en démontrant que l'administration d'anticorps monoclonaux contre la sclérostine aux primates entraîne une augmentation spectaculaire de la formation osseuse, de l'épaisseur trabéculaire, de la DMO radiale, fémorale et vertébrale ainsi que de la résistance osseuse (Osterhoff et coll. 2016). Par conséquent, les gènes codant pour le co-récepteur LRP5-Wnt et la sclérostine sont impliqués

dans la réponse anabolique osseuse à une contrainte mécanique accrue. La mécano sensation et la transduction dans les ostéocytes impliquent encore d'autres facteurs, notamment l'oxyde nitrique (NO), les prostaglandines et l'ATP.⁴⁴ L'IGF-1, les canaux ioniques membranaires, les intégrines et les connexines, qui sont également impliqués localement dans la réponse des cellules à la signalisation mécanique dans l'os (Cole, 2011).

3.3 Les facteurs nutritionnels

Les variations de l'apport de certains nutriments chez les enfants et les adolescents en bonne santé, apparemment bien nourris, affectent l'accumulation de la masse osseuse, en particulier sur les sites sensibles aux fractures ostéoporotiques. Cela fait l'objet d'une attention croissante au cours des 15 dernières années (Sahni et coll. 2015). Ces études portent sur l'apport en calcium. Cependant, d'autres nutriments telles que les protéines, doivent également être pris en compte (Karpouzos et coll. 2017). Dans la plupart des régions du monde, l'apport de calcium est suffisant pour éviter l'apparition de troubles osseux cliniquement manifestes au cours de la croissance (Muñoz-Garach et coll. 2020). Néanmoins, en garantissant un apport en calcium et en vitamine D adéquats, nous nous attendons à ce que le gain de masse osseuse soit augmenté pendant la petite enfance et l'adolescence ainsi un pic de masse osseuse optimale pourra être obtenu. La prévention des fractures ostéoporotiques de l'adulte est la principale raison de cette préoccupation largement répandue (Muñoz-Garach et coll. 2020).

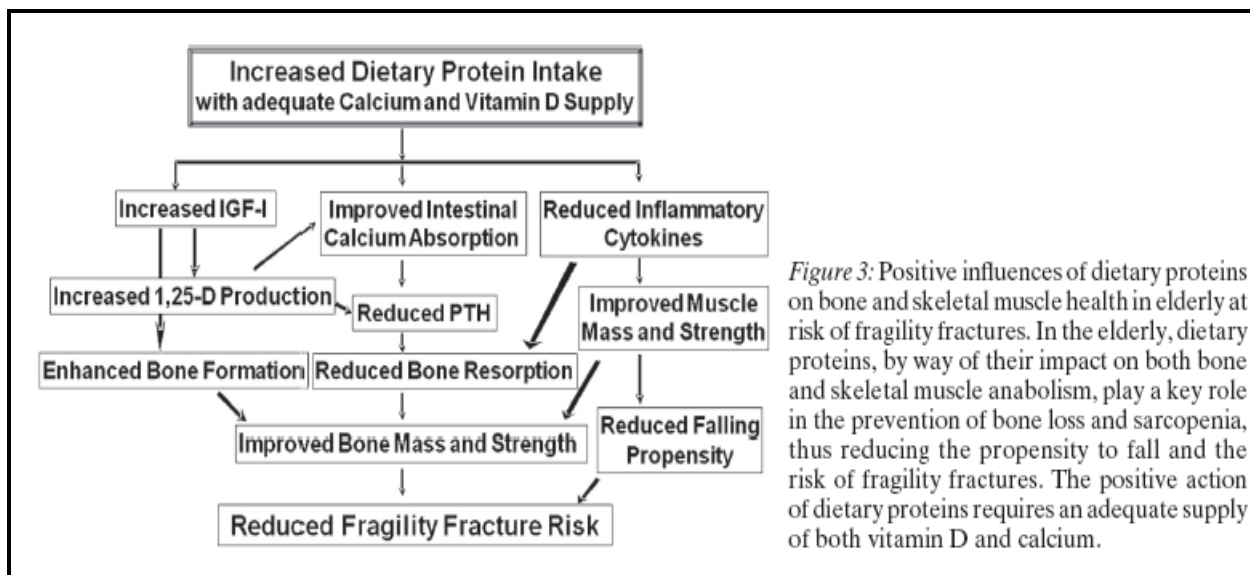


Figure : Effets positifs d'un apport riche en protéines sur les paramètres de santé osseuse chez les personnes âgées fragiles (Bonjour, 2011).

3.3.1 Recommandations de consommation de calcium

Les agences internationales et nationales ont adopté des recommandations pour l'apport en calcium dès la petite enfance et jusqu'aux dernières décennies de la vie (Karpouzou et coll. 2017). Les décisions de ces organismes de recommandation peuvent être basées soit sur un bilan calcique, permettant d'estimer la rétention maximale, soit sur une méthode factorielle qui calcule à partir des données disponibles l'accrétion de calcium et les pertes endogènes modifiées par l'absorption fractionnaire (Rizzoli, 2014). Les études observationnelles et interventionnelles sont également prises en considération. Les recommandations varient considérablement selon les agences régionales. Ainsi, pour les enfants de 6 à 10 ans, les apports journaliers recommandés en calcium sont fixés à 500, 700, 800, et jusqu'à 1200 mg, respectivement au Royaume-Uni, dans les pays nordiques européens, en France et aux États-Unis d'Amérique. Pour les adolescentes âgées de 11 à 17 ans, elles sont fixées respectivement à 800, 900, 1200 et jusqu'à 1500 mg/jour dans les mêmes régions géographiques (Price et coll. 2012). La variabilité des recommandations d'apport en calcium peut s'expliquer en partie par les résultats discordants obtenus dans les études observationnelles et interventionnelles (Price et coll. 2012).

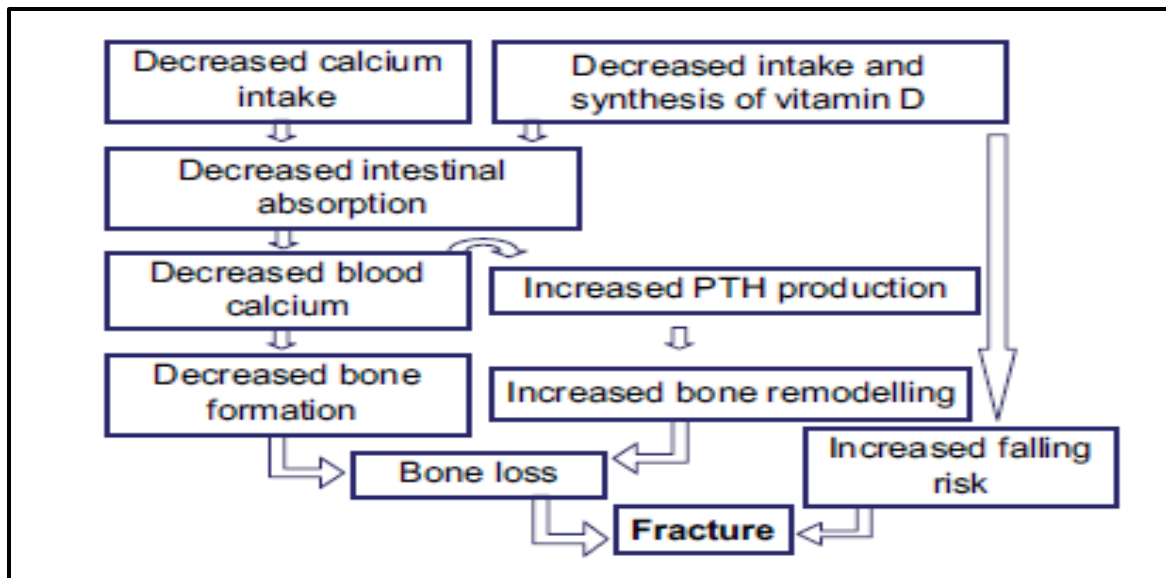


Figure 8 : Les mécanismes augmentant le risque de fracture par l'intermédiaire d'un déficit en calcium et en vitamine D (Rizzoli, 2008).

3.4 Les facteurs hormonaux

Il est bien documenté que les œstrogènes jouent un rôle essentiel dans la croissance osseuse. Ils exercent des effets biphasiques en accélérant la croissance osseuse au début de la puberté alors que dans les deux sexes, les œstrogènes sont des déterminants clés de la fermeture des plaques de croissance (Sarra et coll. 2013) Au cours de la maturation pubertaire, une analyse en coupe transversale de l'os appendiculaire, au moins dans le membre supérieur, révèle un dimorphisme de genre distinct. Chez les sujets féminins, la masse minérale osseuse augmente davantage par accumulation endo-osseuse que périostée (Cannarella et coll. 2019). Chez les sujets masculins, les modifications structurelles opposées sont observées avec des augmentations plus importantes de l'apposition périostée que de l'apposition endo-osseuse entraînant une augmentation des périmètres externe et interne de la structure corticale. À la fin de la maturation pubertaire, l'épaisseur corticale est plus importante chez les sujets masculins que féminins. Dans les corps vertébraux, le dimorphisme structurel du genre s'exprime principalement dans l'axe frontal, qui est 10 à 15 % plus grand chez les hommes par rapports aux femmes (Cauley et coll. 2015). Ces différences morphologiques dans la géométrie et la distribution de la masse minérale des os axiaux et appendiculaires confèrent une plus grande résistance mécanique du squelette masculin (Lucaci et Acalovschi, 2012) Dans une large mesure, ils expliquent le plus grand risque de

fractures ostéoporotiques survenant chez les femmes adultes. L'augmentation de l'apposition minérale osseuse au niveau de la surface endo-osseuse au cours de la puberté chez les sujets féminins peut représenter téléologiquement une adaptation biologique permettant la mobilisation rapide de la minéralité osseuse en réponse aux besoins accrus pendant la grossesse et l'allaitement (Cannarella et coll. 2019). Pendant la puberté, le niveau plasmatique d'IGF-1 augmente de manière transitoire selon un schéma similaire à la courbe de gain de masse et de taille osseuse. L'IGF-1 influence positivement la croissance en longueur et en largeur des pièces squelettiques (Sarra et coll. 2013). Ce facteur exerce une action directe à la fois sur les chondrocytes de la plaque de croissance et les cellules ostéogéniques responsables de la construction des constituants du tissu osseux cortical et trabéculaire (Maataoui et coll. 2017). Cette activité s'exprime également par des modifications parallèles des marqueurs biochimiques circulants de la formation osseuse, l'ostéocalcine et la phosphatase alcaline. De plus, l'IGF-1 exerce un impact important sur les fonctions rénales endocriniennes et de transport qui sont essentielles pour l'économie minérale osseuse. Les récepteurs IGF-1 sont localisés dans les cellules tubulaires rénales (Maataoui et coll. 2017). Ils sont reliés à la machinerie de production de la forme hormonale de la vitamine D, à savoir le 1,25(OH)₂D et au système de transport du phosphate inorganique (Pi) localisé dans la membrane luminale des cellules tubulaires. En augmentant la production et le niveau circulant de 1,25(OH)₂D, l'IGF-1 stimule indirectement l'absorption intestinale de Ca et Pi (Sarra et coll. 2013). Couplé à la stimulation de la capacité tubulaire à réabsorber le Pi, le produit Ca-Pi extracellulaire est augmenté par l'IGF-1 qui, par cette double action rénale, favorise la minéralisation de la matrice osseuse. De plus, au niveau osseux, l'IGF-1 améliore encore directement la formation ostéoblastique de la matrice extracellulaire (Sarra et coll. 2013). Dans les chondrocytes de la plaque de croissance ainsi que dans leur membrane plasmique, les vésicules de la matrice extracellulaire sont équipées d'un système de transport du phosphate qui joue un rôle clé dans le processus de calcification primaire et donc dans le développement osseux (Cauley et coll. 2015). Ce système de transport Pi est également présent dans d'autres cellules ostéogéniques et, fait intéressant, est régulé par l'IGF-1. La production hépatique d'IGF-1, qui est la principale source de son taux circulant, est influencée non seulement par la GH, mais aussi par d'autres facteurs, notamment par les acides aminés des protéines alimentaires (Cauley et coll. 2015).

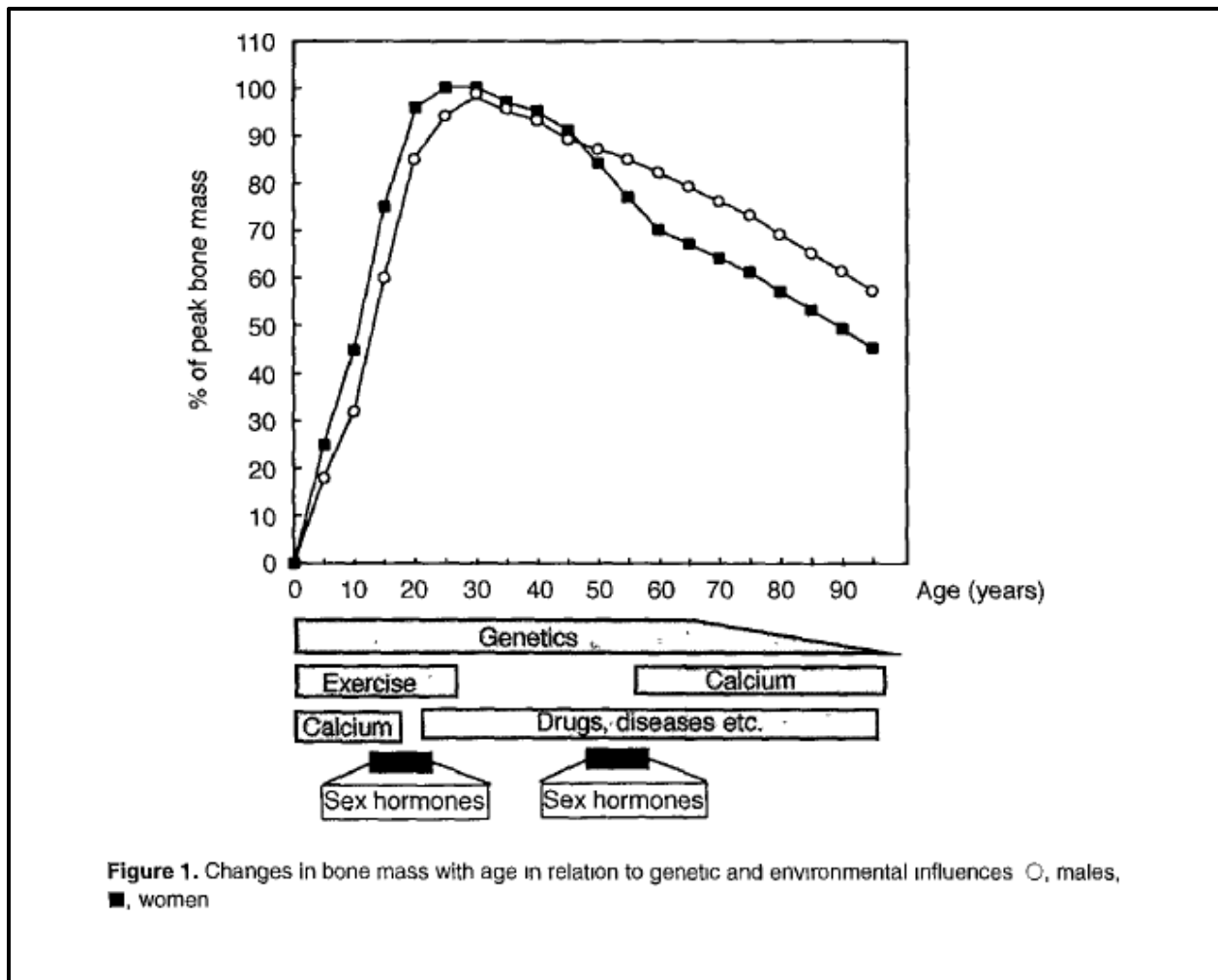


Figure 9 : Modifications de la masse osseuse avec l'âge en relation avec des influences génétiques et environnementales (Ralston, 1997)

4. Réactions des os aux contraintes mécaniques

Dans la plupart des cas, l'os adapte sa structure à l'environnement mécanique typique auquel il est exposé. Conformément à ce phénomène, un passé d'activité physique est associée à des caractéristiques structurales bénéfiques dans l'os mature du squelette (Troy et coll. 2018). Des caractéristiques telles qu'une plus grande surface transversale, une DMO plus élevée et des moments d'inertie plus importants se traduisent collectivement par un os plus fort et ont été observées chez les gymnastes par rapport aux non-gymnastes (Bareither et coll. 2006) et entre les bras dominants et non dominants des joueurs de sports de raquette (Kontulainen et coll.

2003). Ces différences observées sont dues à l'adaptation fonctionnelle, le processus par lequel les cellules d'un os modifient sa structure en réponse à la charge. L'activité physique génère des forces externes (réaction au sol et inertielle) et internes (muscle squelettique) sur le squelette. Ces forces provoquent de très petites déformations dans le tissu osseux, entraînant une contrainte mécanique (ϵ), une mesure normalisée de la déformation. Cette contrainte mécanique, ou une conséquence de la contrainte telle que l'écoulement de fluide dans l'os d'un endroit à un autre, est détectée par les ostéocytes, les cellules mécano-sensibles qui résident dans l'os. Lorsque des stimuli inhabituels sont détectés, les ostéocytes initient une réponse adaptative par l'action des ostéoclastes, qui résorbent le tissu osseux et les ostéoblastes, puis produisent un nouveau tissu osseux. Pour une force externe donnée, les os fragiles se déforment davantage, ce qui entraîne des tensions tissulaires relativement importantes, tandis que les os solides subissent des tensions faibles. Cela provoque une réponse biologique plus robuste de construction osseuse dans l'os le plus fragile qui aboutit finalement à un os plus fort - un phénomène décrit par certains comme un "mécanostat" (Frost et coll. 2003). Ce système implique les cellules osseuses, principalement les ostéocytes, qui peuvent détecter et répondre aux contraintes mécaniques. Les ostéocytes jouent un rôle clé dans le processus de remodelage en captant les charges mécaniques et en transmettant l'information aux ostéoblastes et aux ostéoclastes, qui maintiennent alors l'homéostasie squelettique (Milgrom et coll. 2000). La sclérostine est une protéine produite dans les ostéocytes, qui joue un rôle central dans la régulation de la formation osseuse. Elle fonctionne comme un antagoniste de Wnt, bloquant la voie de signalisation canonique Wnt/ β -caténine. La voie de signalisation Wnt conduit à une augmentation des populations de cellules ostéoprogénitrices et à une diminution de l'apoptose des ostéoblastes matures. La charge mécanique régule négativement l'expression de la sclérostine dans les os, augmentant ainsi la formation osseuse ostéoblastique et diminuant la résorption osseuse par l'inhibition de l'activité des ostéoclastes (Földhazy et coll. 2005). La formation osseuse est augmentée dans les régions à forte tension, en particulier la surface osseuse périostée, tandis que le remodelage osseux et la porosité sont réduits. Par conséquent, la charge mécanique peut entraîner une augmentation de la section transversale et de la densité tissulaire des os. De plus, cette théorie indique que l'effet squelettique du chargement mécanique est spécifique au site, avec une plus grande réponse au niveau des sites squelettiques où les impacts de chargement sont plus importants. La majorité des exercices avec mise en charge provoquent une charge physique sur les membres inférieurs ;

comme prévu, des effets squelettiques positifs sur les régions de la hanche ont été rapportés dans des études antérieures et des revues de la littérature (Yang et coll. 2015). De plus, il a été suggéré que l'adaptation osseuse à la charge mécanique affecte non seulement la DMO, mais aussi les marqueurs géométriques de la résistance osseuse (Bhatia et coll. 2015). Cela serait pertinent pour la prévention des fractures car la fragilité osseuse est une conséquence à la fois des anomalies matérielles et structurelles du squelette (Mancuso et coll. 2018). Pour générer la réponse adaptative de l'os (ostéogenèse) à la charge mécanique, une amplitude, une vitesse et une fréquence de charge suffisantes sont nécessaires. De nombreuses études animales ont montré que le chargement doit être dynamique et non statique (Lee et coll. 2018), induire des contraintes à haute fréquence (Lee et coll. 2017) et être appliqué rapidement (Manske et coll. 2015). Si une intensité de chargement adéquate est atteinte, relativement peu de répétitions de chargement sont suffisantes pour générer une réponse squelettique adaptative (Kroker et coll. 2017). Étant donné que les ostéocytes sont désensibilisés en raison de charges répétitives, de courtes périodes avec un intervalle de repos sont plus bénéfiques que le même nombre de charges effectuées simultanément (Macdonald et coll. 2011). De plus, comme l'os s'adapte aux schémas de charge habituels tels que le mouvement unidirectionnel, une diversification de la charge tel qu'un entraînement multidirectionnel est nécessaire pour stimuler une réponse squelettique adaptative (Kawalilak et coll. 2014). Deux types d'exercices ont émergé : (1) Les exercices aérobies avec mise en charge (marche et course à pied), (2) Les exercices de force et de résistance : ils sont réalisés avec charge (soulever de poids) ou sans. L'une des formes les plus courantes d'entraînement aérobique est la marche, un exercice très bien accepté par les personnes âgées, car il est inoffensif, autogéré et facilement praticable. Les effets de la marche sur la DMO ont été largement considérés, même si les résultats ne sont pas toujours cohérents dans les différentes études (Blam et coll. 2013). Les méta-analyses ont montré l'absence d'effets significatifs sur le rachis lombaire ou sur le col fémoral de la marche seule. De même, à partir des études analysées par Nelson et coll. (2007), il n'y a aucune preuve d'une corrélation étroite entre l'augmentation de la DMO et l'exercice de la marche. Cependant, l'efficacité de la marche à maintenir le niveau de DMO et à prévenir sa perte est déjà un excellent résultat de ce type d'exercice simple. De plus, il est important de considérer certains paramètres qui peuvent influencer les effets de la marche, tels que la vitesse de la marche rapide/lente ou pente/descente. En fait, il existe des preuves qu'une intervention d'une durée de plus de 6 mois peut avoir des effets significatifs et positifs sur

la DMO du col fémoral chez les femmes péri- et post-ménopausées (Ma et coll. 2018). Certaines études montrent comment une marche rapide ou un jogging peuvent avoir des effets positifs sur la DMO de la hanche et de la colonne vertébrale chez les femmes en âge de ménopause (Bolan et coll. 2013). Ainsi, certaines activités à faible impact, telles que le jogging combiné à la montée d'escaliers et à la marche, limitent significativement la baisse de la DMO au niveau de la hanche et de la colonne vertébrale chez les femmes ménopausées. La marche et la course lente peuvent constituer un niveau de contrainte mécanique suffisamment élevé déterminant une force de réaction au sol importante capable de stimuler la masse osseuse (Hingorjo et coll. 2018). En comparant différents types d'exercices physiques avec des contrôles, Howe et coll. (2011) ont montré un effet significatif sur la DMO des exercices statiques bipodaux ou monopodaux sur la colonne vertébrale et le poignet pour les exercices dynamiques à faible impact (y compris la marche et le Tai Chi). Concernant le Tai Chi, la question fait l'objet d'un débat croissant ; la littérature récente (Chow et coll. 2018) suggère un effet positif sur l'atténuation de la perte de DMO au niveau du rachis lombaire et du col fémoral proximal et sur les biomarqueurs du métabolisme osseux. Cependant, pour être efficace, cette activité doit durer au minimum 12 mois (Chow et coll. 2018).

4.1 Exercices de force et de résistance

Le renforcement musculaire est la stratégie la plus étudiée pour augmenter la masse osseuse chez les personnes âgées. La logique réside dans le stimulus mécanique produit indirectement sur l'os (Hingorjo et coll. 2018). Comme les exercices de mise en charge, les exercices de force déterminent une force de réaction articulaire et un renforcement musculaire, produisant un bénéfice clinique important sur la DMO, au niveau du rachis lombaire et, dans une plus large mesure, au niveau du col fémoral (Kelley et coll. 2012). Ce type d'activité est également défini comme « non impactant » et peut être réalisé avec une charge (soulever des poids) ou sans charge (Morseth et coll. 2011). Des études ont examiné l'effet du renforcement des muscles des membres supérieurs et inférieurs, plutôt que des groupes spécifiques tels que les psoas-iliaques et les extenseurs rachidiens. D'après les preuves recueillies par Zehnacker et coll. (2007) l'efficacité de l'entraînement en force dans les sites de la hanche et de la colonne vertébrale est liée à l'intensité de l'entraînement ; l'exercice nécessite des charges élevées (70-90% d'une répétition

maximale) pour 3-8 répétitions de 2-3 séries effectuées au moins pendant 1 an, 3 fois par semaine pendant 45-70 minutes par séance. L'entraînement multi-composants consiste en une combinaison de différents exercices (aérobic, renforcement, résistance progressive, équilibre et danse) et vise à augmenter ou à préserver la masse osseuse. Cela implique que les mêmes interventions soient fournies à toutes les personnes, à la différence d'une formation multifactorielle, personnalisée sur les caractéristiques individuelles (Hopewell et coll. 2018). L'association de plusieurs types d'exercices est conseillée aux patients atteints d'ostéoporose dans le but de contrer la réduction de la masse osseuse (Daly et coll. 2017). La combinaison de plusieurs types d'exercices aurait un effet significatif sur la DMO au niveau de trois sites : col fémoral et grand trochanter, mais le bénéfice maximum serait atteint au niveau du rachis (Howe et coll. 2011). Cependant, diverses divergences méthodologiques et de rapport concernant la combinaison d'exercices proposée, les caractéristiques des patients avec ou sans fractures et les différentes techniques de mesures utilisées rendent actuellement difficile la détermination du meilleur entraînement du programme d'exercices. La révision de Gomez-Cabello et coll. (2012) rapporte substantiellement deux études (Kemmler et coll. 2010) qui démontrent une amélioration significative de la DMO au niveau du rachis lombaire, du col du fémur et du grand trochanter, suite à des programmes incluant des exercices de renforcement musculaire et d'impact. La méta-analyse menée par Nikander et coll. (2010) rapporte chez les femmes ménopausées des résultats différents sur les effets de l'exercice. Alors que l'entraînement contre résistance semble avoir un bon effet sur la DMO lombaire, l'association de ce type d'exercice avec des exercices à impact dit « faible à modéré » comme la course lente, la marche et la montée d'escaliers est beaucoup plus efficace pour préserver la DMO au niveau lombaire et au niveau fémoral (Martyn et coll. 2010). Il est intéressant de noter comment les programmes d'exercices à impact élevé les plus difficiles, tels que le saut, ne sont efficaces que lorsqu'ils sont associés à d'autres exercices à faible impact. Bolan et coll. (2013) rapportent dans leur revue systématique un effet ostéogénique positif de l'entraînement en résistance seul ou associé à des activités de mise en charge à fort impact et rappellent que l'intensité et la variation des exercices en charge sont deux éléments fondamentaux de l'exercice pour éviter les phénomènes d'adaptation et produire une amélioration de la masse osseuse plutôt que de simplement diminuer la perte.

4.2 Considérations pratiques pour une réponse ostéogénique optimale

4.2.1 Principes de l'ACSM s'appliquant à la réponse ostéogénique à l'entraînement physique

Le collège américain de médecine du sport (ACSM) a émis plusieurs principes qui s'appliquent à la réponse ostéogénique aux contraintes mécaniques (Kohrt et coll. 2004). Ces principes apparaissent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Principes de l'ACSM s'appliquant à la réponse ostéogénique aux contraintes mécaniques

Nom du principe	Explication
Spécificité	La réponse ostéogénique est locale et concerne uniquement les zones osseuses sous tension. Ce principe explique les différences en DMO entre bras dominant et bras non-dominant chez les joueurs de tennis.
Surcharge	Les gains osseux s'obtiennent quand la charge habituelle est dépassée. Une surcharge progressive doit être présente pour optimiser les gains osseux.
Réversibilité	L'arrêt de la pratique physique est associé à une perte de DMO (au moins partielle). La pratique d'activités physiques doit être régulière pour conserver les gains osseux.
Capital de départ	Plus la DMO de départ est faible, plus le potentiel d'augmentation de la DMO en réponse à un entraînement physique est important.
Potentiel génétique maximal	La valeur maximale de DMO qui peut être atteinte après plusieurs années d'entraînement est aussi affectée par des facteurs génétiques. Ce principe explique les larges différences en termes de DMO existant entre plusieurs athlètes de dimensions comparables.

4.2.2 La désensibilisation aux contraintes mécaniques

Le tissu osseux se désensibilise rapidement aux contraintes mécaniques. Quand le nombre de cycle augmente, la mécano-sensibilité diminue. Quand les contraintes mécaniques s'arrêtent, la mécano-sensibilité se rétablit suivant une formule mathématique. Ainsi, l'impact ostéogénique de l'entraînement physique est optimal si les séries sont séparées de plusieurs heures (Turner et Robling, 2003).

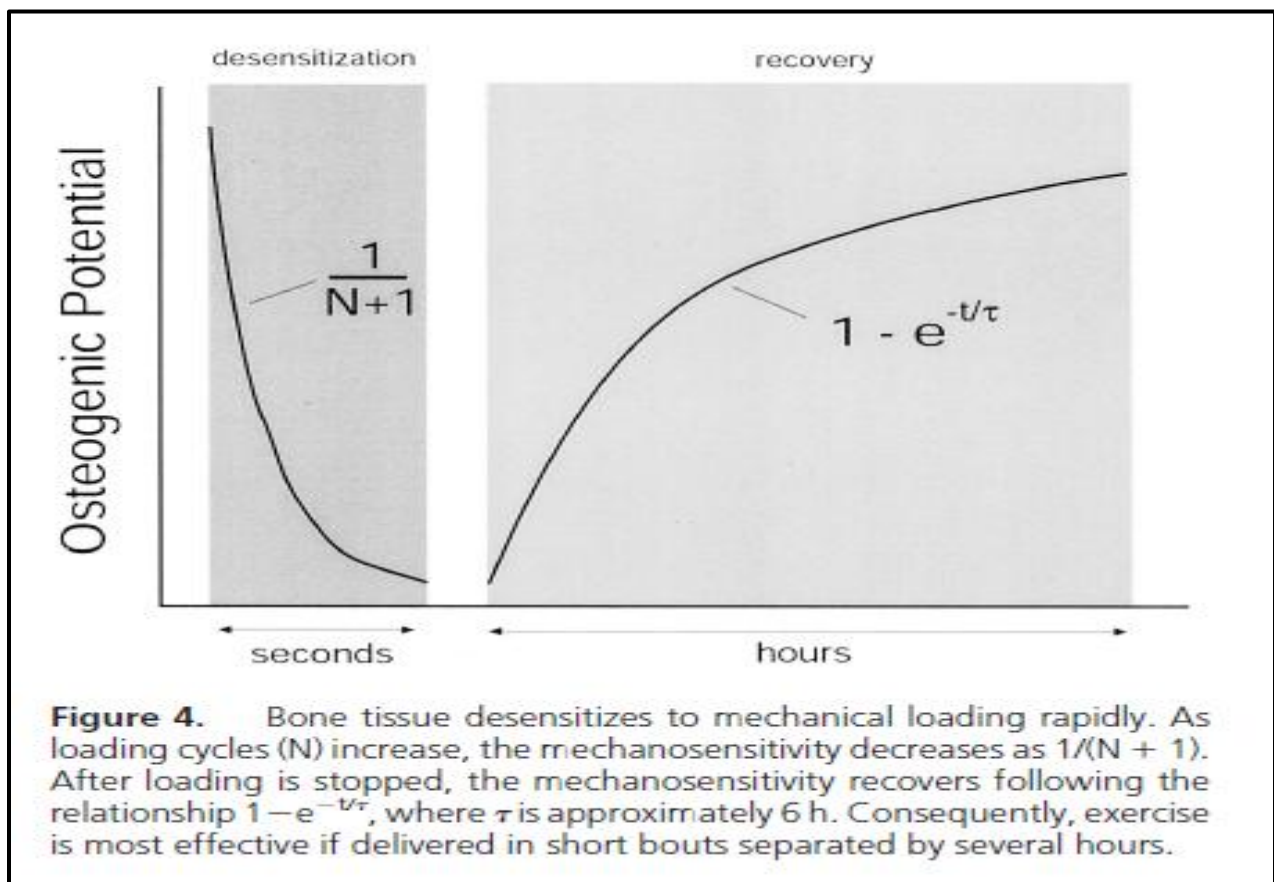


Figure 10 : Le tissu osseux se désensibilise rapidement aux contraintes mécaniques (Turner et Robling, 2003).

4.2.3 Le nombre de séances et de cycles par semaine

Pour le même nombre de cycles réalisés par semaine, l'indice ostéogénique est multiplié par trois si l'exercice est réalisé cinq fois par semaine comparé à un exercice réalisé une fois par semaine. De plus, faire deux séances par jour semble augmenter aussi l'indice ostéogénique de 50 pour 100. Le fait de faire trois séances par jour ne semble pas avoir un effet ostéogénique additionnel par rapport à deux séances par jour. Ces éléments aident à mieux planifier les séances d'entraînement pour une réponse ostéogénique optimale (Turner et Robling, 2003).

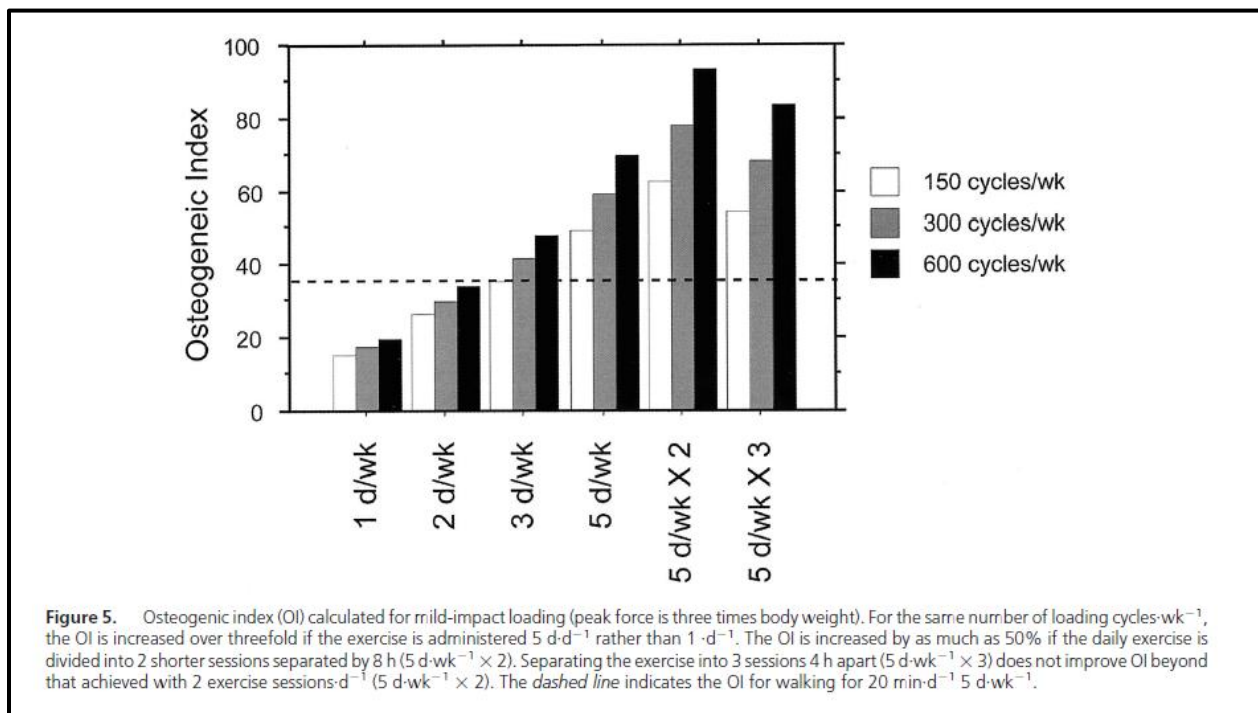


Figure 11 : Indice ostéogénique de l'exercice calculé en fonction du nombre de cycles et de la fréquence d'entraînement par semaine (Turner et Robling, 2003).

4.2.4 L'âge du début de la pratique sportive

L'âge du début de la pratique sportive conditionne les gains osseux. Ainsi, les différences entre bras dominant et bras non-dominant chez les joueurs de tennis sont beaucoup plus importantes si la pratique commence avant la ménarche (Kannus et coll. 1995).

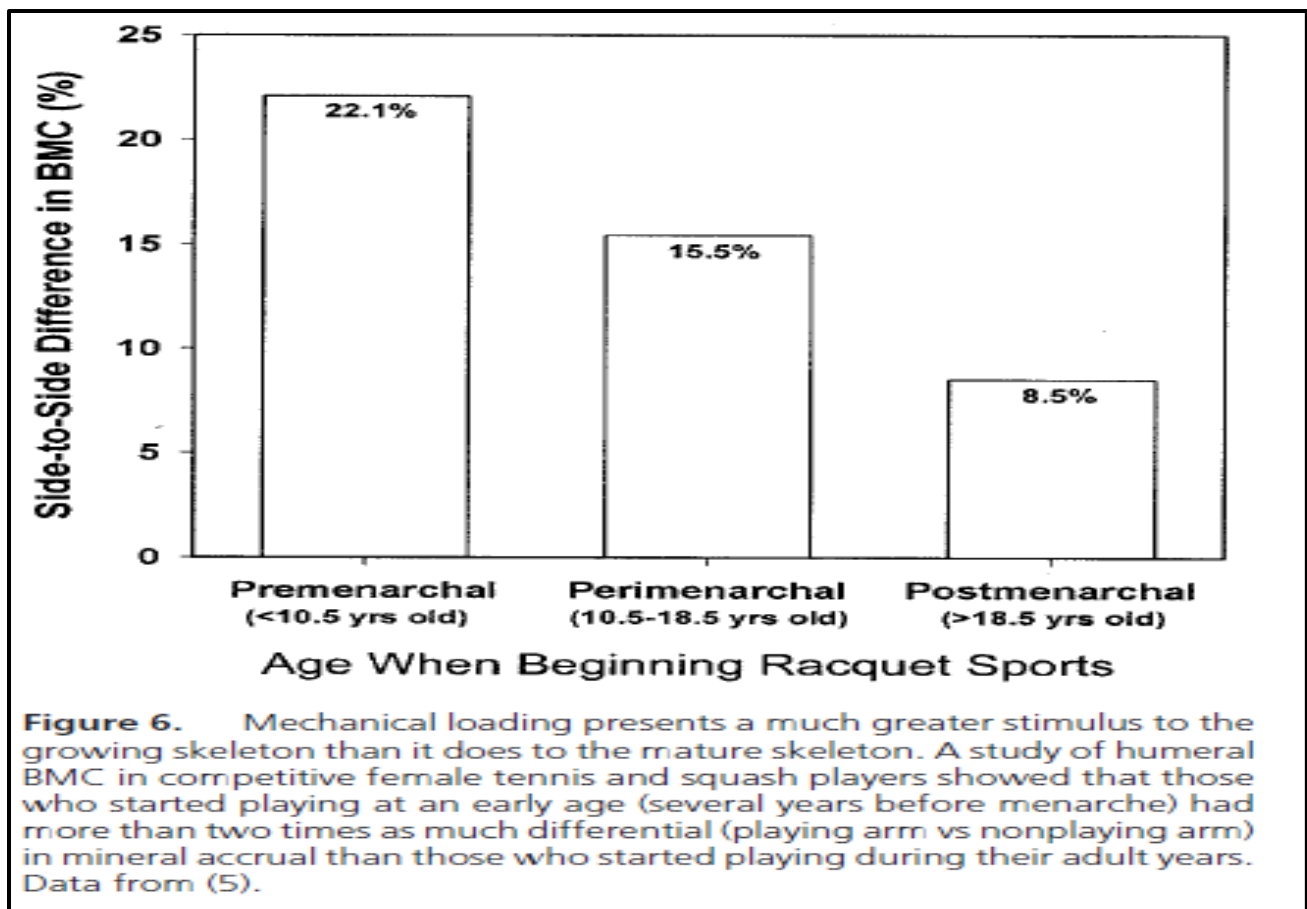


Figure 12 : Différences entre le CMO du bras dominant et du bras non-dominant chez les joueurs de tennis en fonction de l'âge du début de pratique (Kannus et coll. 1995).

4.2.5 Le type d'activité physique pratiqué

Les activités physiques caractérisées par des impacts biomécaniques élevées ont des effets ostéogéniques importants. La figure suivante illustre les valeurs de CSA et de Z par type de discipline sportive (Bailey et Brooke-wavell, 2008).

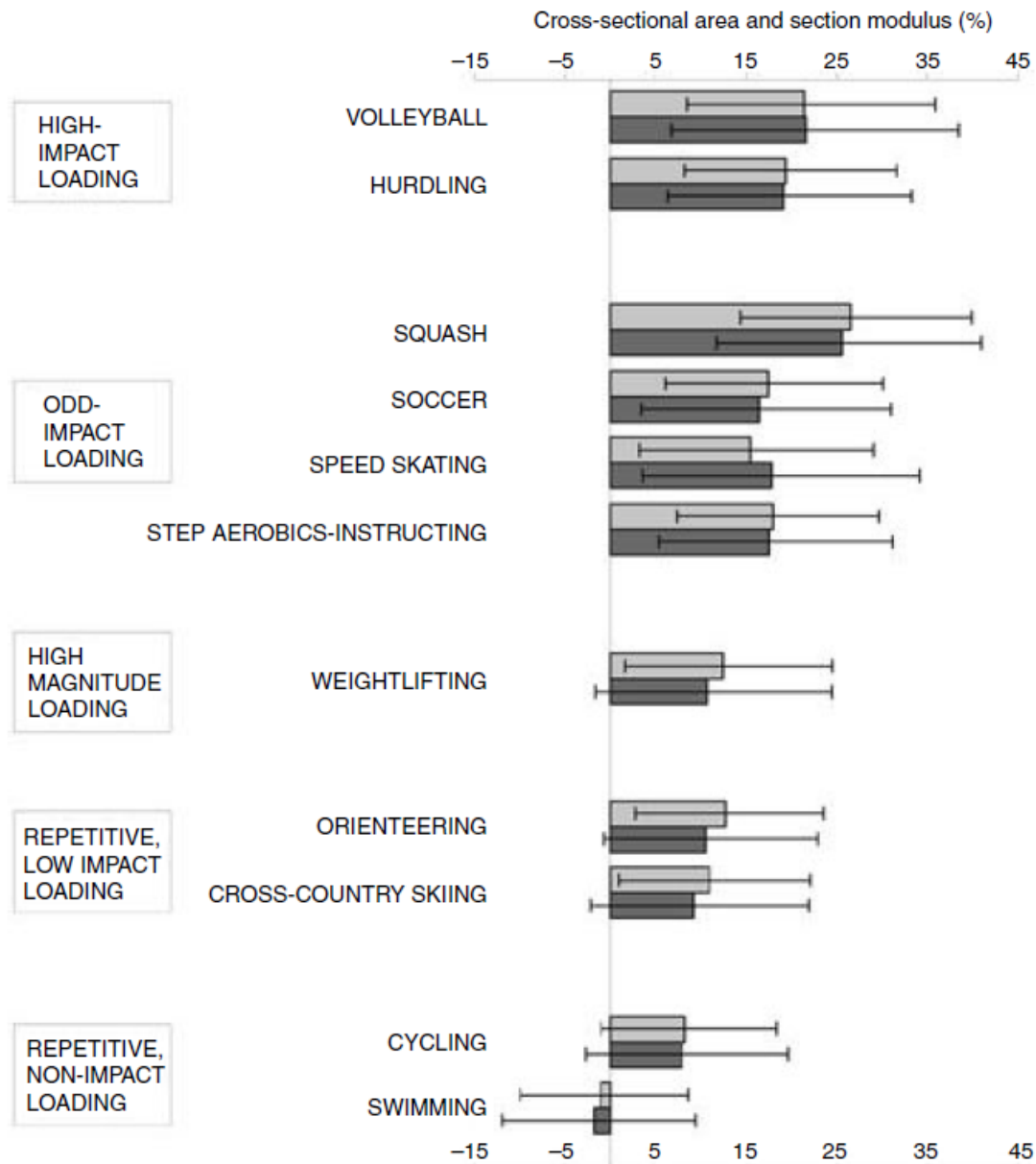


Fig. 2. Differences in cross-sectional area (□) and section modulus (a predictor of strength in bending; ■) between athletes participating in sports of different loading modalities and controls. Values are means and 95 % CI represented by horizontal bars. Where the 95 % CI does not cross the zero line (the value for the controls) the difference was significant ($P < 0.05$). (From Nikander *et al.*⁽²⁹⁾ Reproduced from *J Bone Miner Res* (2005) 20, 520–528 with permission of the American Society for Bone and Mineral Research.)

Figure 13 : Différences de section transversale(○) et de module de section (un prédicteur de la force en flexion●) entre les athlètes participant à des sports de différentes modalités de

chargement et contrôles. Les valeurs sont des moyennes et un IC à 95 % représenté par des barres horizontales. Lorsque l'IC à 95 % ne franchit pas la ligne zéro (la valeur pour les témoins), la différence était significative ($P < 0.05$) (Bailey et Brooke-wavell, 2008).

4.3 Mécanotransduction du remodelage osseux

4.3.1 Fenêtres de contraintes mécaniques

Afin de déterminer les applications sur l'étiologie de l'ostéopénie ou de l'ostéoporose, il faut comprendre les réponses biochimiques aux contraintes mécaniques appliquées sur un site-spécifiques des os. Ces transformations du fonctionnement cellulaire ainsi provoquées vont mener à des changements de forme et de structure de l'os. Ces contraintes mécaniques sont détectées par des récepteurs à haute sensibilité.

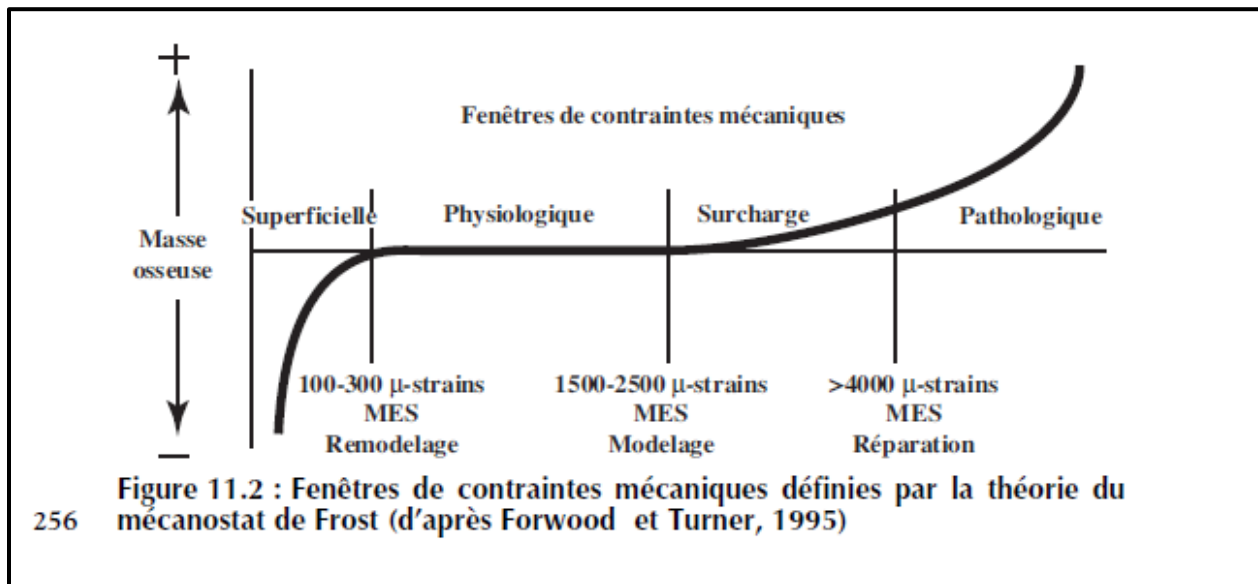


Figure 14 : Fenêtres de contraintes mécaniques définies par la théorie du mécanostat de Frost (Forwood et Turner, 1995)

4.3.2 Mécanotransduction et mécanismes cellulaires

Des mouvements de liquides dans les espaces interstitiels sont créés et causés par la déformation osseuse induite par les contraintes mécaniques (Forwood et Turner, 1995 ; Burr et coll. 2002). Ces flux liquidiens franchissent la membrane des ostéocytes et produisent ainsi une contrainte à l'intérieur des cellules. Si cette contrainte a un niveau de force et de vitesse suffisant, elle peut entraîner une réponse cellulaire. Les ostéocytes fonctionneraient ainsi comme des mesures de contraintes (Huiskes et coll. 2000). Des messagers biochimiques (prostaglandines) sont relâchés en réponse aux gradients de flux liquidiens (Ehrlich et Lanyon, 2002). Le rôle de ces messagers est d'envoyer des signaux qui se dispersent jusqu'à la surface de l'os, la zone de recrutement des ostéoblastes. Cette réaction est appelée mécanotransduction car le signal mécanique est transformé en message chimique.

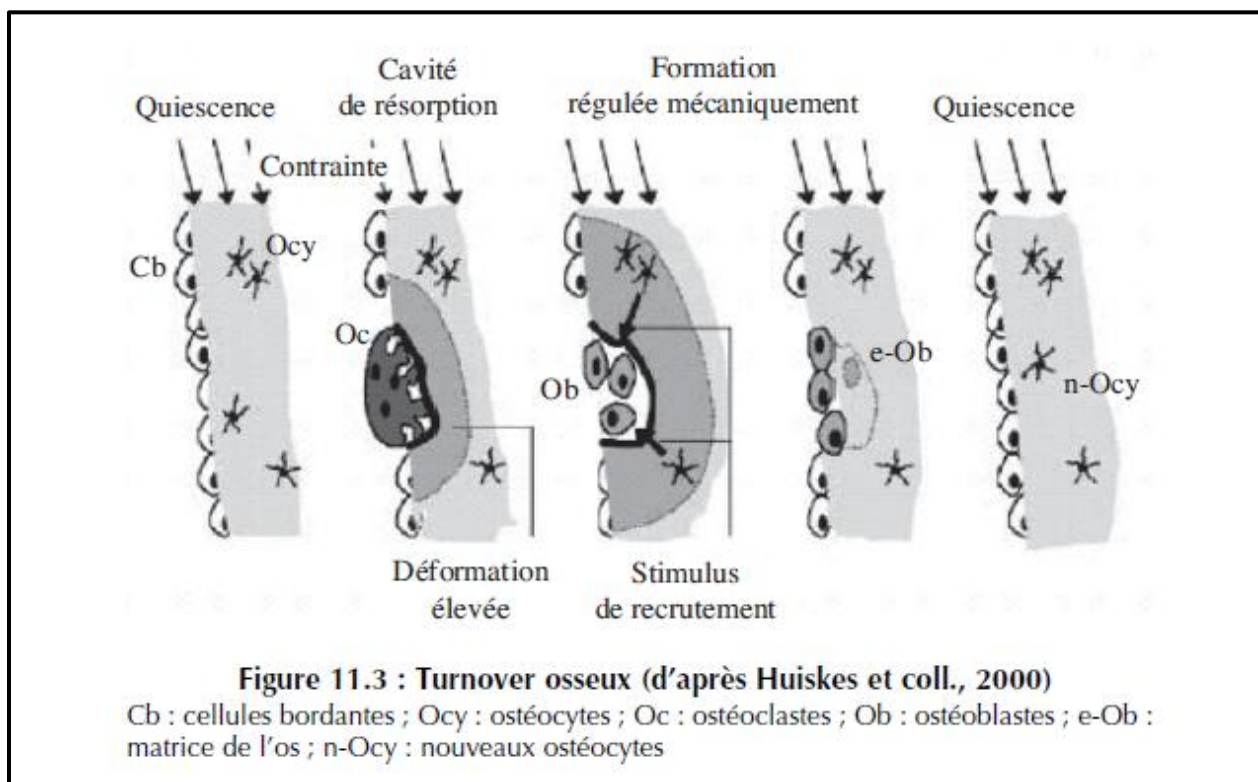


Figure 15 : Turnover osseux (Forwood et Turner, 1995).

5. Influence de la pratique des sports collectifs sur les paramètres osseux

5.1 Influence de la pratique du rugby sur les paramètres osseux

La participation au rugby est associée à une meilleure forme physique, à une masse osseuse axiale et appendiculaire accrue et à un renouvellement osseux accru chez les athlètes adultes. De plus, l'adaptation osseuse positive de ces athlètes peut être liée à une augmentation du taux de remodelage osseux en faveur de la formation osseuse. Des relations positives significatives ont été trouvées entre la pratique du rugby et la DMO et le CMO, spécifiquement au niveau de la hanche, de l'avant-bras et du trochanter.

5.1.1 Etudes longitudinales menées sur l'influence du Rugby sur les paramètres osseux

Le tableau suivant résume les résultats de plusieurs études longitudinales menées sur l'influence du rugby sur les paramètres osseux. Il apparait que la pratique du rugby a un impact positif sur les paramètres osseux.

Tableau 2 : Etudes longitudinales menées sur l'influence du rugby sur les paramètres osseux

Auteurs	Population	Méthodes	Résultats	Conclusion
Georgeson et coll. (2012)	37 joueurs de rugby (hommes)	DXA	Changements anthropométriques significatifs observés chez les joueurs au cours d'une saison de ligue de rugby.	Le rugby a un grand impact positif sur la santé osseuse.
Lees et coll. (2017)	35 joueurs de rugby (hommes)	3 tests DXA (pré-saison, mi-saison et fin de saison)	Changements importants au niveau du CMO et de la DMO.	Une saison de rugby offre des gains importants au niveau des mesures osseuses.
Jones et coll. (2018)	12 joueurs de rugby (hommes)	Etude de 6 ans. variables osseuses mesurées par DXA	Une grande augmentation au niveau des mesures osseuses après 6 ans de rugby.	L'intensité dans le rugby est responsable des changements dans la structure osseuse des joueurs.

5.1.2 Etudes transversales menées sur l'influence du Rugby sur les paramètres osseux

Les études transversales indiquent que les valeurs de CMO et de DMO sont systématiquement supérieures chez les joueurs de rugby par rapport aux sujets témoins.

Tableau 3 : Etudes transversales menées sur l'influence du rugby sur les paramètres osseux

Auteurs	Population	Méthodes	Résultats	Conclusion
Elloumi et coll. (2009)	22 joueurs de rugby (hommes) 14 témoins (hommes)	DMO et CMO mesurés par DXA.	Meilleurs DMO et CMO présentés par les joueurs de rugby.	L'adaptation osseuse positive de ces athlètes peut être liée à une augmentation du taux de remodelage osseux en faveur de la formation osseuse.
Hind et coll. (2015)	52 joueurs de rugby (hommes). 32 pas sportifs (hommes)	DMO et la CMO mesurés par DXA	Les joueurs de rugby avaient des résultats supérieurs par rapport aux non sportifs.	Le rugby a des effets positifs sur la structure osseuse.
Elloumi et coll. (2006)	20 joueurs de rugby 29 contrôles	DMO et CMO mesurés par DXA	Mesures osseuses beaucoup plus importantes chez les joueurs de rugby.	Le rugby a un grand impact sur la structure osseuse des joueurs.
Nevill et coll. (2004)	106 athlètes de différent sport (rugby, volleyball, natation...)	variables osseuses mesurées par DXA	Le rugby a présenté des résultats très positifs au niveau des mesures osseuses.	Le rugby est un sport qui affecte énormément la santé osseuse.

	15 non sportifs			
Egan et coll. , (2006)	30 joueuses de rugby (femmes) 20 joueuses de Netball 11 coureuses de fond 25 femmes sédentaires	DMO mesurée par DXA	Les joueuses de rugby avaient les valeurs de DMO les plus élevées.	Les changements osseux dépendent de l'intensité de l'impact du jeu.
Morel et coll. (2001)	704 athlètes (rugby, natation, volleyball, basketball....)	DMO mesurée par DXA	Les joueurs de rugby ont présenté les valeurs de DMO les plus élevées.	Les sports à grand impact comme le rugby influencent fortement les valeurs de DMO.
Nevill et coll. (2003)	Athlètes (rugby, escalade, kayak, haltérophilie)	DMO et CMO mesurés par DXA	Les joueurs de rugby ont présenté des résultats de DMO très importantes.	Le rugby a des effets positifs sur la structure osseuse.
Nichols et coll. (2007)	femmes athlètes (rugby, football, natation, volleyball) femmes sédentaires	mesures osseuses prises par DXA	Le rugby a affecté positivement les mesures osseuses.	Le rugby est un sport qui affecte énormément la santé osseuse.
Elloumi et coll (2009)	22 rugbyman 14 sédentaires	DMO et CMO mesurés par DXA	Les joueurs de rugby avaient des meilleures valeurs de DMO et de CMO.	Le rugby a un grand impact sur les variables osseuses.

5.2 Influence de la pratique du Basketball sur les paramètres osseux

Il existe une relation positive entre la pratique du basketball et les gains de densité osseuse, en plus d'une corrélation entre la force musculaire isocinétique produite dans ce jeu et la DMO. L'entraînement au basketball augmente la masse osseuse au niveau du rachis lombaire et du fémur, les sites squelettiques les plus soumis à fort impact dans ce sport. Comparativement aux personnes sédentaires, les basketteurs ont une DMO significativement plus élevée au niveau du corps entier, de la colonne lombaire et de l'humérus dominant.

5.2.1 Etudes longitudinales menées sur l'influence du Basketball sur les paramètres osseux

Le tableau suivant résume les résultats de plusieurs études longitudinales sur l'influence du basketball sur les paramètres osseux.

Tableau 4 : Etudes longitudinales menées sur l'influence du basketball sur les paramètres osseux

Auteurs	Population	Méthodes	Résultats	Conclusion
Rebai et coll. (2012)	29 joueuses de basketball 22 sédentaires	Groupe actif : entraînement 8 heures/ semaine. DMO et CMO mesurés par DXA	Les joueuses de basketball ont présenté des valeurs de DMO et du CMO supérieurs.	La pratique du basketball est liée à l'amélioration de la masse et de la densité minérale osseuse.

5.2.2 Etudes transversales menées sur l'influence du Basketball sur les paramètres osseux

Le tableau suivant met en évidence l'impact positif de la pratique du basketball sur les paramètres osseux.

Tableau 5 : Etudes transversales menées sur l'influence du basketball sur les paramètres osseux

Auteurs	Population	Méthodes	Résultats	Conclusion
Stojanović et coll. (2020)	Joueuses de basketball, volleyball, football groupe sédentaire	DMO mesurée par DXA	Les joueuses de basketball présentaient une DMO significativement plus élevée que les non-athlètes	Le basketball affecte la DMO plus que la natation, le football et le volleyball.
Agostinete et coll. (2016)	82 garçons : contrôles (n = 13) basketball (n = 14) karaté (n = 9) football (n = 18) judo (n = 12) et natation (n = 16)	DMO mesurée par DXA	L'accumulation de la DMO dans les membres supérieurs et le corps entier était significativement plus élevée parmi les joueurs de basketball par rapport aux autres groupes.	Le groupe de basketball avait des valeurs de DMO significativement plus élevées que les autres groupes.
Zribi et coll. (2014)	48 joueurs de basketball 50 témoins	CMO et la surface osseuse (BA) mesurés par DXA. Tests de course et de saut.	Joueurs de basketball : meilleurs résultats à tous les tests de condition physique par rapport aux témoins.	La pratique du basketball à l'âge pré-pubère est associée à une augmentation de la masse maigre et osseuse dans les sites chargés.
Carbuhn et coll. (2010)	67 athlètes féminines collégiales : softball (17)	DXA corps entier	Groupe basketball a présenté des meilleurs résultats à tous les niveaux	Les joueurs de basketball présentaient des valeurs de DMO et de CMO plus élevées que les autres

	basket-ball (10) volley-ball (7) natation (16) sauteurs sur piste et sprinteuses (17)			athlètes.
Bagur-Calafat et coll. (2015)	Joueurs de basketball d'élite groupe témoins	Masse osseuse, les heures d'exercice physique, l'alimentation	Les joueurs de basketball ont une masse osseuse plus élevée surtout au niveau du rachis lombaire et du fémur proximal.	Le basketball augmente la masse osseuse de la colonne lombaire et du fémur.
Denova-Gutiérrez et coll. (2021)	Joueurs de basketball, football, tennis et musculation	CMO mesuré par DXA	CMO plus élevé chez les joueurs de football et de basketball.	Le football, le basketball, le tennis et l'haltérophilie, améliorent le CMO par rapport aux individus sédentaires.
Agostinete et coll. (2017)	53 adolescents masculins (20 non-athlètes, 15 nageurs et 18 basketteurs)	CMO et DMO mesurés par DXA	Les basketteurs affichent les valeurs les plus élevées de CMO et de DMO.	Les joueurs de basketball présentent un CMO et une DMO plus élevés que les nageurs et le groupe témoin.
Scerpella et coll. (2018)	85 joueurs de basketball, de hockey et de football	DMO et CMO mesurés par DXA	Les valeurs supérieures du CMO et de la DMO dans les groupes d'athlètes sont dûes à l'entraînement.	Les valeurs de DMO et de CMO mettent en évidence l'importance du basketball sur les valeurs

				ostéogénique.
--	--	--	--	---------------

5.3 Influence de la pratique du football sur les paramètres osseux

La plupart des résultats actuels sont prometteurs en ce qui concerne l'effet ostéogénique de l'entraînement au football en tant qu'activité physique bénéfique pour la santé des hommes jeunes et âgés, car un entraînement régulier au football tout au long de la vie peut réduire la perte osseuse liée à l'âge et le risque d'ostéoporose et de fractures associées. On observe un impact significatif de ce jeu sur la DMO du fémur proximal, la DMO du trochanter fémoral, la DMO des jambes et le CMO du corps entier.

5.3.1 Etudes longitudinales menées sur l'influence du football sur les paramètres osseux

Le tableau suivant met en évidence l'influence positive de la pratique du football sur les paramètres osseux.

Tableau 6 : Etudes longitudinales menées sur l'influence du football sur les paramètres osseux

Auteurs	Population	Méthodes	Résultats	Conclusion
Mohr et coll. (2015)	83 femmes préménopausées	Groupe EF (21) Groupe NIHI (21) Groupe NIM (21)	Augmentations des marqueurs du remodelage osseux, avec des augmentations concomitantes de la	L'entrainement au football semble fournir un puissant stimulus ostéogénique chez les femmes d'âge

		Group témoin (20) 3 sessions/semaine pour 15 semaines. DXA effectuées	masse osseuse des jambes.	moyen.
Vicente-Rodriguez et coll. (2003)	104 garçons	53 footballeurs effectuant 3h d'entraînement par semaine et 51 contrôles. Variables osseuses mesurées par DXA.	Les meilleurs DMO et CMO ont été mesurés chez les joueurs de football.	La participation au football est associée à : -augmentation de la CMO - amélioration de la DMO de la colonne fémorale et lombaire
Zouch et coll. (2015)	65 garçons (âgés de 10 à 13 ans)	Suivi de 3 ans : 23 footballeurs, 17 témoins 2 à 5 h d'entraînement plus 1 match/sem	Les meilleures valeurs de DMO et CMO ont été révélées par les joueurs de football.	La pratique du football a un effet ostéogénique positif sur les joueurs.
Ubago-Guisado et coll. (2018)	39 nageurs 37 footballeurs 28 cyclistes	Entraînement de 12 mois DMO mesurée par DXA + TBS	Les footballeurs ont présenté des meilleures mesures osseuses.	Les effets ostéogéniques diffèrent d'un sport à l'autre.
Seabra et coll. (2017)	28 joueurs de futsal 20 nageurs	Mesures anthropométriques -composition corporelle	Les footballeurs ont présentés des meilleurs résultats à tous les niveaux.	Le football doit être considéré comme une stratégie de santé publique prometteuse pour

	22 adolescents non sportifs	-état de maturation -activité physique quotidienne -apport en calcium		l'acquisition et le développement d'une masse osseuse saine.
Clemente et coll. (2021)	Femmes et hommes non sportif	DMO mesuré avant et après des entraînements de football	Les valeurs de DMO ont augmenté suite à l'entraînement réalisé.	Le football a des effets positifs sur la santé osseuse.
Gijon-Nogueron et coll. (2017)	53 enfants footballeurs	3 ans d'entraînement continu. CMO et DMO mesurés	Les valeurs de DMO ont augmenté suite à l'entraînement réalisé.	Le football a des effets positifs sur la structure osseuse du corps des joueurs.

EF : entraînement football, NIHI : natation intermittente à haute intensité, NIM : natation à intensité modérée.

5.3.2 Etudes transversales menées sur l'influence du Football sur les paramètres osseux

Le tableau suivant résume les résultats de plusieurs études transversales menées sur l'influence du football sur les paramètres osseux.

Tableau 7 : Etudes transversales menées sur l'influence du football sur les paramètres osseux

Auteurs	Population	Méthodes	Résultats	Conclusion
Lozano-Berges et coll. (2017)	Enfants et adolescents (garçons et fille)	DMO et CMO mesurés par DXA	La pratique du football est positivement associée à la DMO du	Le football affecte positivement la masse osseuse pendant la

			corps entier	croissance.
Hammami et coll. (2018)	joueurs de football (garçons et filles)	CMO et DMO mesuré par DXA	Le football affecte positivement sur toutes les mesures osseuses en plus des fonctions métabolique et cardiaque.	le football offre beaucoup d'avantages au niveau de la santé osseuse et du corps entier.
Calbet et coll. (2001)	33 footballeurs (hommes) 19 sujets inactifs (hommes)	DMO et CMO été mesuré par DXA	Valeurs positives de masse maigre, CMO et DMO.	Le football à long terme, à partir de l'enfance, est associé à une augmentation considérable du CMO et de la DMO.
Lozano-Berges et coll. (2019)	110 footballeurs (75 hommes / 35 femmes)	Les masses osseuses et maigres ont été mesurées par DXA	CMO et DMO plus élevés chez les joueurs âgés que les joueurs péri pubertaires	Jouer au football pendant la péri puberté sert pour réduire les futurs problèmes d'ostéoporose à l'âge adulte.
Vicente-Rodriguez et coll. (2004)	17 footballeurs 11 sujets inactifs	CMO et DMO mesuré par DXA	Meilleurs DMO, CMO et résultats de tests athlétiques chez les joueurs de football.	Le football entraîne une plus grande acquisition de masse osseuse.
Nebigh et coll. (2009)	91 joueurs de football (hommes) 61 sujets inactifs	DMO et CMO ont été mesurés par DXA.	Meilleurs valeurs de CMO et DMO chez les footballeurs.	Les joueurs de football présentent des meilleurs résultats au niveau du DMO ET CMO.
Hagman et coll. (2018)	140 hommes (joueurs de football formés à vie (65 à 80 ans), des	DMO et CMO ont été mesurés par DXA	DMO et CMO ont été plus élevés chez les joueurs de football	le football avait des effets très positifs sur la santé osseuse

	joueurs élite (35) (18 à 30 ans), des personnes âgées contrôles du même âge (35) et jeunes (35) hommes)			
Gomez-Campos et coll. (2019)	167 footballeurs	poids, taille, DMO, CMO ont été déterminés en utilisant une double absorptiométrie à rayons X (DXA)	Les valeurs de DMO, CMO été supérieurs chez les joueurs de football.	Le football a des effets positifs sur les mesures ostéogénique.
Tavares et coll. (2019)	66 hommes (18,5 à 29,9 ans) (footballeurs et contrôles)	CMO et DMO mesurés par DXA	Les joueurs de football ont montré des valeurs plus élevées de contenu minéral osseux du corps entier	Le football est associé à de meilleurs paramètres de santé osseuse.
Baker et coll. (2020)	43 joueurs (femmes et hommes) de football 43 contrôls	DMO et CMO mesurés par DXA	Meilleures valeurs présentées par les footballeurs.	Pas de différences dans les valeurs entre le groupe de femmes et le groupe d'hommes.

5.4 Influence de la pratique du handball sur les paramètres osseux

Dans le handball, il existe diverses actions telles que lancer, passer, sauter, bloquer, courir, etc. qui en font un sport de contact intermittent à haute intensité. Les différents postes de jeu sont les gardiens, les ailiers, les spécialistes, les pivots et les défenseurs (Bragazzi et coll. 2020). En effet, c'est un sport avec des actions défensives et offensives de grande vitesse pour atteindre l'objectif ultime de marquer un but. Les caractéristiques spécifiques du handball sont des changements fréquents d'intensité, des compétences spécifiques et des facteurs sociaux. Ces aspects définissent les déterminants de la coordination, de l'endurance, de la force et de la cognition dans ce sport. Pour atteindre des performances optimales, les actions doivent être réalisées avec une intensité maximale (Bragazzi et coll. 2020). Le handball est un sport qui implique des contraintes mécaniques élevées sur les membres inférieurs en raison de la course, des sauts et des atterrissages à haute intensité et provoque des réactions ostéogéniques (Pereira et coll. 2021). Les nombreuses actions intenses et les changements de direction effectués pendant le handball par équipe à petite échelle entraîneraient des améliorations de la force musculaire des membres inférieurs, de la puissance musculaire, de l'endurance musculaire et de la santé osseuse chez les adultes entraînés par rapport aux témoins non sportifs (Fagundes et coll. 2022). Tout aussi important, l'entraînement au handball en équipe a entraîné des gains significatifs dans la masse maigre du corps entier et des membres inférieurs, une diminution du pourcentage de graisse corporelle ainsi que des augmentations du DMO du corps entier, du CMO régional des jambes et de la DMO de la hanche, respectivement (Vicente-Rodriguez et coll. 2004). Plusieurs études ont démontré des augmentations du CMO du corps entier et du CMO régional des jambes après un entraînement en handball. De plus, les changements longitudinaux de la DMO locale de la hanche et du T-score de la hanche étaient plus importants dans le groupe handball que dans le groupe témoin (Pereira et coll. 2021). Une forte amplitude de tension sur le squelette est nécessaire pour induire une réponse ostéogénique maximale à l'effort, qui peut être obtenue en effectuant des changements rapides et énergiques de direction lors de la course. La nature intermittente et restreinte de l'espace du format de jeu de handball en équipe entraîne une fréquence élevée de sauts, de virages, de coupes latérales et de changements de direction, ce qui est susceptible d'entraîner un impact élevé et de fortes tensions sur les os exposés à l'exercice (Missawi et coll. 2016). La forme physique du handball est un type de jeu intermittent comparable qui a déjà été suggéré pour

provoquer des améliorations substantielles de la structure osseuse chez les participants jeunes, d'âges moyens et âgés (Pereira et coll. 2021).

5.4.1 Caractéristiques physiques et physiologique des handballeurs

La taille moyenne des joueuses de handball variait de 163 cm et 179 cm dans les équipes élités femmes, avec une masse corporelle qui variait entre 65 kg et 78 kg et un pourcentage de graisse de 15 % à 31 % (Martínez-Rodríguez et coll. 2020). Le $\text{VO}_2 \text{ max}$ était de $55,5 \pm 3,9 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ dans une étude récente et de $51,3 \pm 2,3 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ dans une autre recherche, toutes deux menées sur un tapis roulant, $45,3 \pm 5,5 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ chez les joueurs brésiliens et $47,2 \pm 4,5 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ chez les joueurs espagnols (Manchado et coll. 2013). Vargas et al. (2010) ont rapporté des valeurs de $45,3 \pm 3,0 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ dans une étude menée sur une bicyclette ergométrique que chez des joueurs brésiliens de handball de première ligue (Manchado et coll. 2013). Plusieurs articles incluaient des valeurs de vitesse de course correspondant à 3 ou 4 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ de lactate sanguin déterminées dans un test de course incrémentiel (Rodriguez et coll. 2017). En ce qui concerne la force, le test de développé couché à 1 répétition maximum a révélé des résultats importants de $45,8 \pm 5,7$ à $48,9 \pm 6,5 \text{ kg}$ (Abdessemed et coll. 1999). Les joueuses de handball présentaient des résultats de $2,64 \pm 0,09$ et $2,71 \pm 0,08$ secondes pour des sprints de 15 m (Granados et coll. 2007).

La taille moyenne des joueurs de handball masculins variait de 188 (cm) et 195 (cm) mesurée dans les équipes élités nationales, une masse corporelle qui varie entre 88 (kg) et 105 (kg) (Martínez-Rodríguez et coll. 2020). Le $\text{VO}_2 \text{ max}$ était de $5.18 \pm 0.66 \text{ L/min}$ et une vitesse de lancer proche de $25.7 \pm 1.5 \text{ (m/s)}$. Plusieurs articles incluaient des valeurs de lactate sanguin déterminées dans un test de course incrémentiel $8.5 \pm 1.6 \text{ (mmol.l}^{-1}\text{)}$ (Michalsik et Aagaard, 2015). En ce qui concerne l'explosivité, le test de détente verticale a révélé des résultats importants de $0.40 \pm 0.04 \text{ (m)}$. Les joueurs de handball hommes présentaient des résultats de 4.16 ± 0.24 secondes pour des sprints de 30 m (Ruscello et coll. 2021).

5.4.2 Etudes longitudinale menées sur l'influence du handball sur les paramètres osseux

Tableau 8 : Etudes longitudinales menées sur l'influence du handball sur les paramètres osseux

Auteurs	Population	Méthodes	Résultats	Conclusion
Pereira et coll. (2021)	67 femmes ménopausées	Groupe actif : entraînement de 16 semaines 2 à 3 séances/semaine DMO, CMO, OC, P1NP et CTX mesurés	Tous les résultats ont changé positivement chez le groupe actif.	Le handball avait un impact sur le remodelage osseux et était efficace pour améliorer la santé osseuse et l'équilibre postural chez les femmes ménopausées.
Hornstrup et coll. (2019)	Hommes de 20 à 30 ans	Groupe actif : entraînement de handball 2 séances/semaine pour 12 semaines Groupe témoin inactif : DMO et CMO mesurés par DXA	Le groupe handball a présenté des meilleurs résultats que le groupe témoins sur tous les niveaux.	Le handball a un impact positif sur la santé osseuse et la composition corporelle du corps.
Krahenbühl et coll. (2020)	53 adolescentes (12-17 ans)	Groupe actif : 6 mois de participation à des compétitions officielles. Groupe témoin (27)	La santé osseuse dans le groupe actif était meilleure que celle dans le groupe sédentaire.	Le handball affecte positivement les mesures osseuse et corporel du corps entier.

		DMO et CMO testées par DXA		
Fristrup et coll. (2020)	26 hommes 28 femmes	Groupe actif : 12 semaines d'entraînement Groupe inactif DMO et CMO mesurés par DXA	Le groupe handball a présenté des meilleurs résultats que le groupe control.	Le handball affecte positivement les mesures corporelles du corps entier.
Hornstrup et coll. (2018)	28 femmes non entraînés	Groupe actif : 12 semaines d'entraînement Groupe témoins inactif	Le groupe handball a présenté des meilleurs résultats que le groupe sédentaire.	Le handball a des effets bénéfiques marqués sur la condition musculo-squelettique.

5.4.3 Etudes transversales menées sur l'influence du handball sur les paramètres osseux

Tableau 9 : Etudes transversales menées sur l'influence du handball sur les paramètres osseux

Auteurs	Population	Méthodes	Résultats	Conclusion
Martínez-Rodríguez et coll. (2021)	36 joueurs masculins (18 juniors et 18 seniors)	Mesures anthropométriques profil complet mesures échographiques calcanéennes	Les joueurs seniors avaient une meilleure composition corporelle que les joueurs juniors	Le handball a un impact très positif sur la composition corporelle.

Bahri et coll. (2013)	un groupe de joueurs de handball adolescents. un groupe contrôle du même âge	DMO mesurée par DXA	Les DMO des joueurs de handball étaient plus importants	La pratique régulière du handball semble être un facteur ostéogénique. Il peut être conseillé chez les adolescents pour optimiser l'os.
Vicente-Rodriguez et coll. (2004)	24 joueurs de handball (filles). 27 filles sédentaires	DMO et la CMO mesurés par DXA	DMO et CMO supérieurs chez les handballeurs	Le handball est associé à une augmentation des masses maigres et osseuses et à une amélioration de la DMO axiale et appendiculaire.
Hagman et coll. (2021)	joueurs de handball (60-80 ans) (35) témoins âgés non formés (35), jeunes (18-30 ans) joueurs de football d'élite (30), jeunes témoins non formés (30).	DMO mesurée par DXA	Le groupe de handball plus âgé avait les meilleurs résultats de DMO.	L'entraînement de handball en équipe tout au long de la vie est associé à une minéralisation osseuse supérieure et à un renouvellement osseux modifié chez les femmes âgées et les jeunes femmes.
Martínez-Rodríguez et coll. (2021)	33 joueurs de handball 18 juniors (âge : $16,7 \pm 0,50$) 15 seniors (âge : $24,8 \pm 4,71$)	Tests de force max, agilité, vitesse, tests athlétiques	Les joueurs plus âgés et entraînés sont en meilleure forme physique que les juniors.	Le handball a un impact très positif sur la forme physique des joueurs.
Fagundes et coll.	115 joueuses de handball	DMO et CMO mesurés	Le groupe handball avait	Le handball affecte la santé

(2021)	142 joueuses de football 136 femmes sédentaires	par DXA	des meilleurs résultats que le groupe football et sédentaires.	osseuse très positivement
Martínez-Rodríguez et coll. (2021)	joueurs handball âgés et junior	DMO mesurée par DXA.	Les joueurs âgés ont présenté des meilleurs résultats de DMO et de compositions corporelles.	Le handball a un impact positif sur le corps entier.
Boshnjaku et coll. (2016)	30 joueuses de handball 30 joueuses de football	DMO mesurée par DXA	Le groupe handball a présenté une DMO plus élevée que le groupe football	Le handball est un jeu d'intensité plus élevé que le football avec un plus grand impact sur la santé osseuse.

5.5 Synthèse

La plupart des études indiquent que les sports collectifs à fort impact augmentent la densité osseuse. Le grand impact dans ces jeux mène à une déformation qui se produit dans l'os et entraîne un niveau de formation plus élevé et une inhibition de la résorption dans le cycle de remodelage normal de l'os ; il provoque une activation directe de la formation osseuse ostéoblastique à partir de l'état de repos. Tous les sports sont associés à des valeurs de DMO et CMO plus élevées dans diverses populations. Les sites des gains osseux diffèrent d'un sport à un autre relativement aux caractéristiques du jeu. De plus, ces activités ont un effet sur la composition corporelle, en particulier sur les muscles squelettiques. Le muscle squelettique est le plus grand composant de tissu non adipeux au

niveau du système tissulaire de la composition corporelle chez l'homme, et il joue un rôle important dans l'activité physique et de nombreux processus biochimiques.

6. Questionnaires évaluant les contraintes mécaniques sur les os

Plusieurs questionnaires ont été développés afin de mesurer l'impact biomécanique de l'activité physique sur les os. Ces questionnaires évaluent les pics de contraintes sur les sites squelettiques et l'implication du poids du corps et les réactions de force au sol. Des moyens de calculs sont utilisés pour chaque questionnaire afin d'estimer les contraintes osseuses sur les différents sites squelettiques (hanche, rachis lombaire et avant-bras).

6.1 Questionnaire de Dolan et coll. (2006)

Le questionnaire inclut 6 étapes qui calculent l'exposition aux contraintes osseuses passées ainsi qu'aux contraintes osseuses récentes. La méthode de calcul détaillée est expliquée par la figure ci-dessous.

TABLE 1. Steps for calculating bone loading across the reference periods.

Step 1: Calculate bone loading unit (BLU) for each individual activity.

Example: gymnastics

Gymnastics load score for hip or spine = 3

Gymnastics loading rate score for hip or spine = 3

Calculation: load score + (loading rate score $\times$ 3) = BLUExample: (3) + (3 $\times$ 3) = 12**Step 2: Calculate the bone loading value for each activity listed in a reference period.**

Bone Loading Unit

Seasons

Years

Frequency

Loading Value

Calculation:

Specific to activity and skeletal site

*

0.25 for

*

No.

*

1-3 $\times$ month⁻¹ = 1

=

1-2 $\times$ wk⁻¹ = 23-5 $\times$ wk⁻¹ = 3> 5 $\times$ wk⁻¹ = 4

Example:

*

2

*

4 yr

*

1-2 $\times$ wk⁻¹

=

12

0.50

4

2

=

48

Step 3: Calculate the total bone loading in each reference period.

Loading value gymnastics

Loading value

Loading value

Loading value

Loading value biking

Total loading for elementary

dodge-

ball

all

+42

+34

+32

+28

= 184

48

Step 4: Calculate total bone loading across all reference periods.

Elementary

Junior

High school

Young adult

Adult

Total

184+

150+

95+

150+

200

779

Step 5: Calculate total bone loading exposure.

Total bone loading exposure in a 40-yr-old woman

Total bone loading/total years assessed by BLHQ

[779/(40 - 5)] = 22.3

Step 6: Calculate recent bone loading exposure.

Recent bone loading exposure in a 40-yr-old woman

Adult reference period/years in recent reference period

[200/(40 - 30)] = 20.0

Figure 16 : Etapes pour calculer les contraintes osseuses à travers les périodes de référence

(Dolan et coll. 2006)

Dans leur étude, les auteurs précisent que les femmes ayant un score faible à ce questionnaire ont généralement de faibles valeurs de DMO au niveau du col fémoral (Dolan et coll. 2006). Ces auteurs ont défini des unités de contraintes osseuses pour chaque activité comme précisé par la figure ci-dessous.

APPENDIX B. The index of bone loading units (BLU) for each activity.		
Activities	Hip BLU	Spine BLU
Aerobics	8	5
Backpacking	7.8	9
Badminton	4	4
Ballet/jazz/tap	8	4.9
Basketball	11.7	8.4
Baton twirling	4	4
Biking (mountain)	7.3	11.1
Biking (road)	4.1	4.6
Bowling	4	5
Boxing	5	7
Cheerleading	11.6	11.1
Climbing trees	5	5
Dancing	7.3	4.3
Diving (off board)	5	4
Dodgeball	7.6	7.7
Drill team	5	5
Elliptical trainer/stairmaster	5	5
Farm work	5	6
Field hockey/ice hockey	8	5
Football/flag football	8.3	7.9
Four corners	4.2	4.2
Four-square	4.2	4.2
Frisbee	4	5
Frisbee (ultimate)/lacrosse	8	5
Gardening	4.1	4.6
Golf	4.1	7.9
Gymnastics	12	12
Hiking	7.9	7.4
Hopscotch	11.1	10.6
Horseback	7	11.1
House building	5	6
Jump rope	11.1	10.7
Jungle gym/monkey bars	5	5
Karate/tae bo/taekwondo	8	5
Kickball	7.7	7.3
Kickboxing	5	5
Pep club	5	5
Plyometrics	12	11
Rafting	4	5
Raquetball/handball	8.1	8.3
Rock climbing	5	5
Rugby	8	8
Running/jogging	8.1	8.1
Scuba diving	4	5
Skating (roller/ice)	7.4	4.4
Skiing (alpine/water)	7.9	8
Skiing (cross-country)	7.6	4.6
Skiing	11	11
Sledding	4	11
Snow shoveling	5	6
Snowboarding	8.1	8.1
Soccer	8.4	8.3
Softball/baseball	8	11.1
Surfing	5	5
Swimming	4	4
Swings	4	4
Tag/chase	8	7.6
Tennis	8	11
Tetherball	4.1	7.4
Track (sprinting/jumping)	11.7	11.1
Track (throwing)	5.1	8.1
Trampoline jumping	5	4
Triathlon	5.4	5.6
Volleyball	11.9	11.3
Walking	7	4
Water aerobics	4	4
Water polo	7	5
Weight lifting (free)	5.3	5.6
Weight lifting (machines)	4.6	5
Windsurfing	5	5
Yoga	4	5

Figure 17 : Unités de contraintes osseuses par activité physique (Dolan et coll. 2006).

6.2 Questionnaire de Groothausen et coll. (1997)

Dans un premier temps, les auteurs précisent les niveaux de réaction du sol rencontrés dans plusieurs activités physiques comme le précise la figure ci-dessous.

Table 1 Ground Reaction Forces of Selected Physical Activities Found in Literature Expressed in Multiple of Body Weight

Activity	Ground reaction force (multiples of body weight)	References
Aerobics	2.8	Michaud et al. (19)
Basketball	4.1–6.0	Valiant and Cavanagh (34)
Gymnastics: somersault	11.0	Bruggeman (4)
Judo	1.2–1.6	Tezuka et al. (32)
Soccer: shooting	2.4	Asami and Nolte (2)
Softball: hitting	2.1	Roberts et al. (24)
Sprinting	1.6	Messier and Owen (18)
	5.0	Winter and Bishop (38)
	2.0–5.0	Mechelen (17)
Volleyball	2.1	Bates et al. (3)
Walking	4.8	Adrian and Laughlin (1)
	1.6	Cochran (5)

Figure 18 : Niveaux de réaction du sol rencontrés dans plusieurs activités physiques
(Groothausen et coll. 1997).

Dans un deuxième temps, les scores de contraintes osseuses sont établis en fonction des forces de réactions au sol ; 4 scores ont été définis comme indiqué dans la figure suivante.

Table 2 Classification of the Peak Strain Scores Based on Ground Reaction Forces and Estimation Criteria

Peak score	Ground reaction forces	Estimation criteria	Examples
3	$>4 \times$ body weight	Activities including jumping actions	Basketball, gymnastics
2	$2-4 \times$ body weight	Activities including sprinting and turning actions	Badminton, baseball, tennis
1	$1-2 \times$ body weight	Weight-bearing activities	Ballroom dancing, jogging
0	$<1 \times$ body weight	All other activities	Bicycling, swimming

Figure 19 : Classification des pics de contraintes osseuses en fonction des forces de réactions au sol rencontrées dans plusieurs activités physiques (Groothausen et coll. 1997).

Ainsi, deux méthodes de calcul sont possibles. La méthode A prend en considération le total des contraintes osseuses de toutes les activités physiques pratiquées pendant une certaine période (addition des différents scores relatifs à chaque activité). La méthode de B inclut uniquement la valeur la plus élevée de contraintes osseuses. La durée des exercices et les intensités métaboliques ne sont pas prises en compte par ce questionnaire. Il en ressort que le score calculé est un déterminant positif de la DMO lombaire à l'âge de 27 ans (Groothausen et coll. 1997).

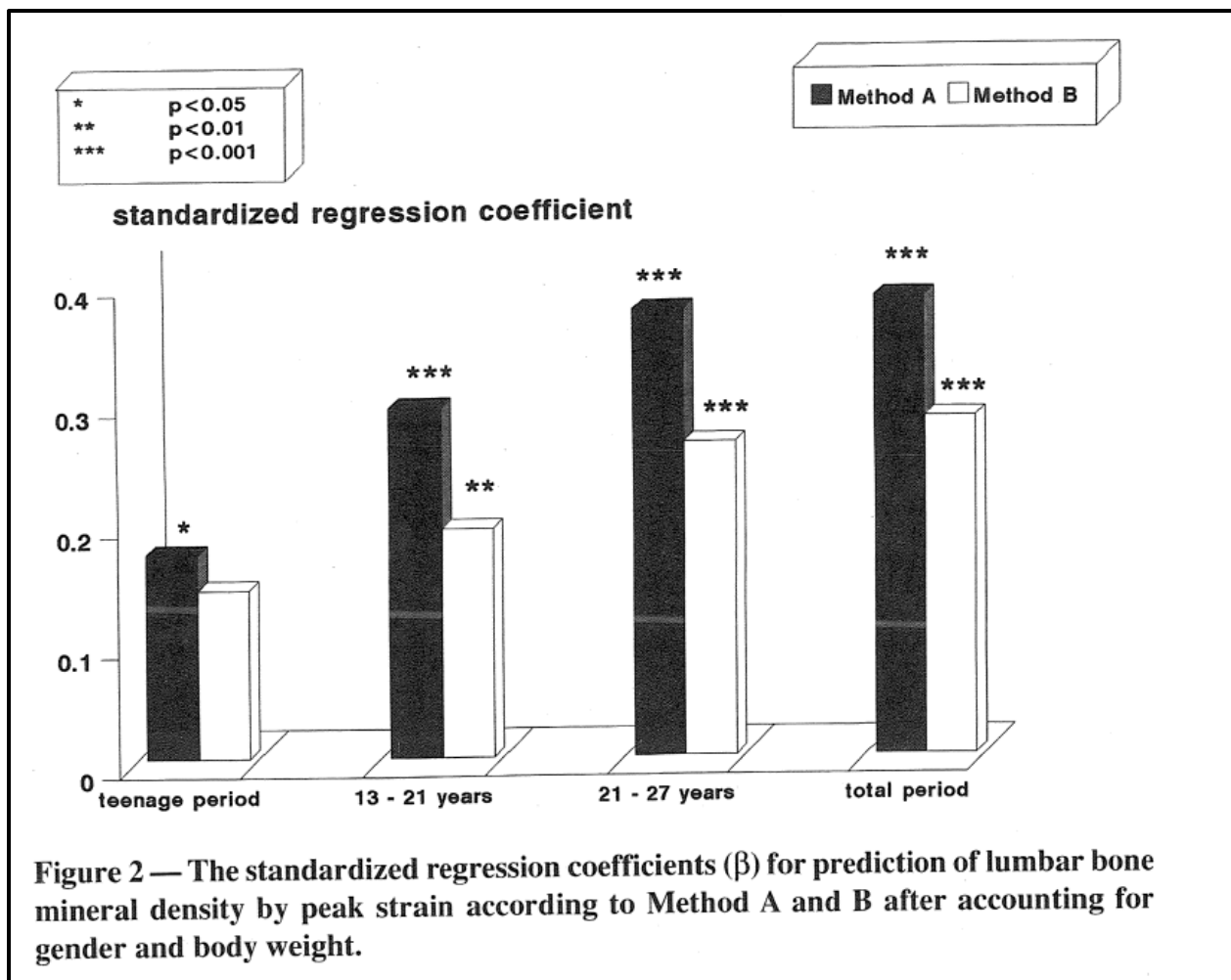


Figure 20 : Coefficients de régression pour la prédiction de la DMO lombaire suivant les deux méthodes (Groothausen et coll. 1997).

6.3 Questionnaire de Weeks et Beck (2008)

Ce questionnaire nommé BPAQ est basé sur un algorithme de calcul disponible sur internet qui prend en considération le type et la fréquence des séances pratiquées. Le questionnaire donne 3 paramètres : current BPAQ, past BPAQ et total BPAQ.

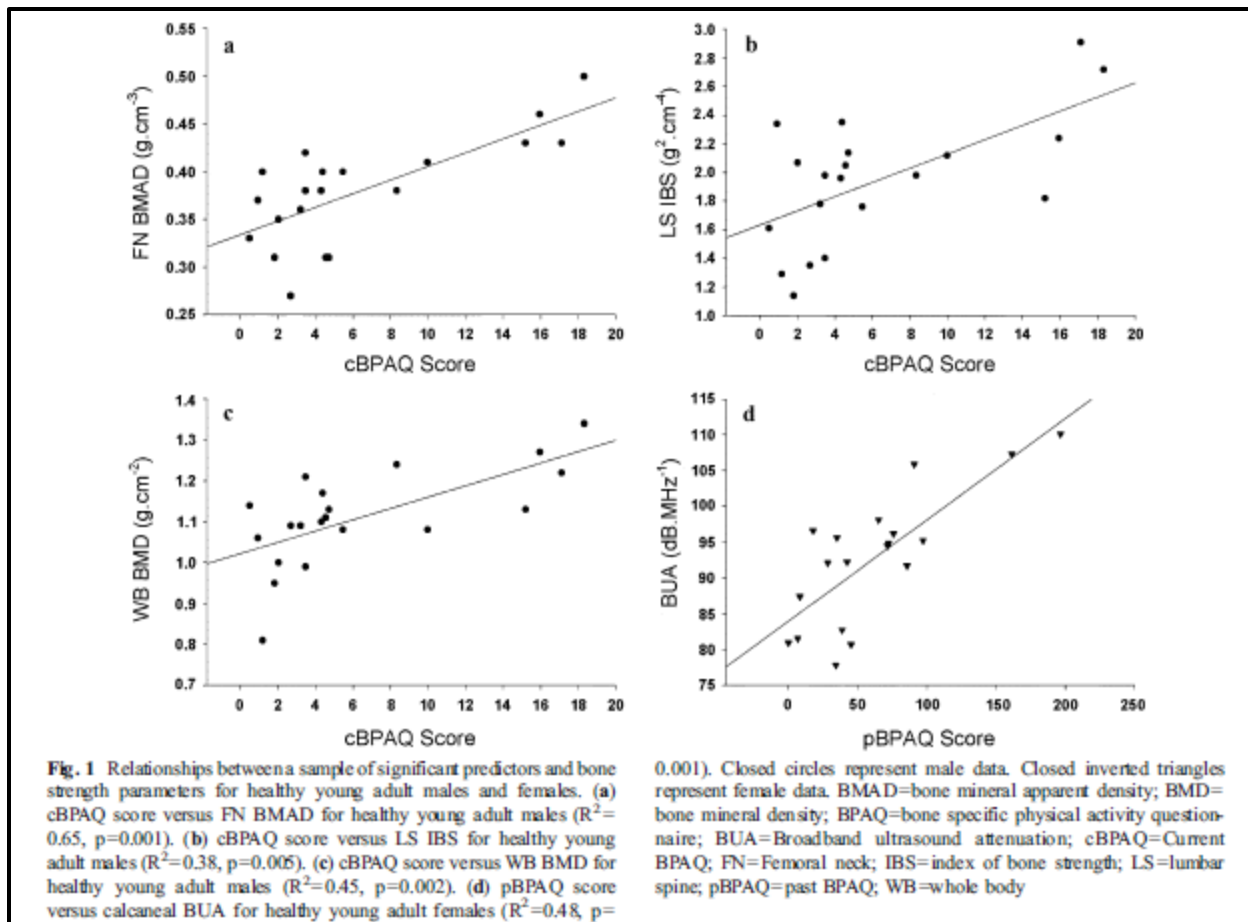


Figure 21 : Corrélations entre le BPAQ et les paramètres de santé osseuse (Weeks et Beck, 2008).

Les scores de ce test sont positivement corrélés à la DMO, à la DMOA, à la BUA et aussi à l'IBS au niveau lombaire (Weeks et Beck, 2008).

6.4 Questionnaire de Farr et coll. (2011)

Farr et coll. (2001) ont comparé la capacité de 4 questionnaires différents (un premier basé sur l'évaluation par pedomètres, un deuxième basé sur l'activité physique pratiquée pendant les trois derniers jours, le troisième étant le BPAQ et le quatrième étant le PYPAQ adapté) pour la prédiction les indices de résistance osseuse mesurés par tomographie. Les auteurs concluent que

le PYPAQ adapté est le meilleur déterminant des indices osseux chez 329 filles âgées de 8 à 13 ans (Farr et coll. 2011). Le PYPAQ est conçu pour évaluer le niveau de pratique d'activités physiques pendant la dernière année (Shedd et coll. 2007). Farr et coll. (2011) ont modifié l'algorithme original afin d'adapter ce questionnaire à l'objectif principal de l'étude qui est la capacité des questionnaires à prédire les indices de résistance osseuse chez les enfants et les adolescents.

6.5. Synthèse sur les questionnaires évaluant les contraintes mécaniques osseuses

En synthèse, il apparaît que les scores des 4 questionnaires cités ci-dessus sont positivement corrélés aux indices osseux. Les sujets ayant un score faible à ces questionnaires ont plus de chance d'avoir une DMO faible. En pratique clinique, comme la DMO est le paramètre de santé osseuse le plus mesuré, le BPAQ semble être le plus prédictif par rapport aux deux autres questionnaires (questionnaires de Dolan et coll. 2006 et de Groothausen et coll. 1997).

Tableau 10 : Récapitulatif sur les relations entre les scores obtenus par les différents questionnaires et la DMO

	DMO
Questionnaire	r^2
Score BPAQ (Weeks et Beck, 2008)	0.36 – 0.68
Peak strain score (Groothausen et coll. 1997)	0.08 – 0.25
BLHQ score (Dolan et coll. 2006)	0.10 – 0.11

7. Facteurs corrélables aux indices de résistance osseuse du col fémoral

Le CSI, le BSI et l'ISI sont des paramètres osseux calculés à partir de la DMO du col fémoral et des dimensions corporelles (Karamangla et coll. 2004). Ces indices améliorent la prédiction des fractures de la hanche chez les personnes âgées (Ayoub et coll. 2014 ; Li et coll. 2013). De ce fait, plusieurs études ont eu pour objectif de définir les facteurs corrélables à ces indices chez les jeunes adultes et les personnes âgées.

7.1 L'âge

Plusieurs études ont démontré que l'âge est négativement corrélé aux valeurs de CSI, de BSI et d'ISI (Karamangla et coll. 2004 ; Li et coll. 2013). Ces corrélations mettent en évidence une augmentation du risque de fractures chez les personnes âgées (Ayoub et coll. 2014 ; Karamangla et coll. 2004).

7.2 Le poids corporel

Plusieurs études ont démontré que le poids corporel, l'indice de masse corporelle, la masse grasse et le pourcentage de masse grasse sont négativement corrélés au CSI, au BSI et à l'ISI (Kim et coll. 2017). En effet, l'obésité et le surpoids sont associés à de faibles valeurs de CSI, de BSI et d'ISI (El khoury et coll. 2017). Ainsi, l'augmentation de la DMO au niveau fémoral chez les sujets en surpoids et obèses n'est pas suffisante pour compenser l'excès de poids.

7.3 Le niveau d'activité physique

Le volume hebdomadaire d'activité physique (h/sem) est positivement corrélé à ces indices (Mori et coll. 2014 ; Sardinha et coll. 2008 ; Zakhem et coll. 2020). De plus, la consommation maximale d'oxygène (ml/mn/kg) est aussi un facteur corrélable à ces indices comme démontré chez les jeunes adultes (El Khoury et coll. 2018).

7.4 Le niveau de performance physique

La vitesse de sprint est un déterminant positif de ces indices osseux comme démontré dans plusieurs études (Finianos et coll. 2021a ; Finianos et coll. 2021b). D'autre part, les qualités de détente verticale et horizontale sont positivement corrélées à ces indices (Khawaja et coll. 2021). Ainsi, il semble que les tests physiques qui mettent en évidence la puissance musculaire relative au poids corporel sont prédictifs du CSI, du BSI et de l'ISI.

7.5 La masse maigre et le SMI

La masse maigre, la masse maigre appendiculaire et le SMI sont des déterminants positifs des indices de résistance de col fémoral chez les personnes âgées (Abdul Al et coll. 2021 ; Kim et coll. 2015a).

7.6 La concentration en vitamine D

La concentration sanguine en vitamine D est positivement corrélée aux indices de résistance du col fémoral chez les jeunes adultes et les personnes âgées ; certaines corrélations positives disparaissent après ajustement pour l'IMC (Alwan et coll. 2016 ; Berro et coll. 2018 ; Kim et coll. 2015b).

7.7 La pratique des sports collectifs

Deux études antécédentes ont démontré que la pratique du football est associée à des valeurs élevées de CSI, de BSI et d'ISI (El Hage, 2014 ; Finianos et coll. 2021a). De futures études seront nécessaires afin de comparer les valeurs de CSI, de BSI et d'ISI par discipline sportive.

7.8 La consommation protéique journalière

Kim et coll. (2018) ont démontré que la consommation protéique journalière est positivement corrélée au CSI, au BSI et à l'ISI dans les deux sexes. Ces résultats mettent en évidence l'importance des apports protéiques pour préserver les paramètres de santé osseuse.

7.9 La concentration sérique en ferritine

Dans une étude menée sur 693 femmes âgées de plus de 45 ans, il a été démontré que la concentration sérique en ferritine est négativement corrélée au CSI, au BSI et à l'ISI (Ahn et coll. 2016a). Ces relations ont été retrouvées en utilisant des régressions linéaires multiples qui prennent en considération plusieurs paramètres cliniques.

7.10 Le statut socio-économique

Dans une étude menée sur 722 sujets adultes, il a été démontré que le statut socio-économique à l'enfance est associé aux valeurs de CSI, de BSI et de l'ISI à l'âge adulte (Karlman et coll. 2013).

7.11 La résistance à l'insuline

La résistance à l'insuline est associée à de faibles valeurs de CSI, de BSI et d'ISI (Ahn et coll. 2016b). Ces corrélations permettent d'expliquer en partie la prévalence élevée de fractures ostéoporotiques chez les sujets diabétiques malgré une DMO élevée (Ishii et coll. 2012 ; Srikanthan et coll. 2014).

7.12 La fonction pulmonaire

Une étude menée sur 936 hommes âgés de plus de 19 ans a démontré qu'une fonction pulmonaire réduite est associée à de faibles valeurs de CSI, de BSI et d'ISI même après ajustement pour la consommation antérieure de tabac (Jung et coll. 2022). Ces résultats

soulignent l'importance d'évaluer les indices de résistance osseuse du col fémoral chez les adultes ayant une capacité pulmonaire réduite.

7.13 Les marqueurs d'inflammation

Dans un essai clinique mené sur 1872 femmes, il a été démontré que les niveaux de CRP sont inversement corrélés aux indices de résistance osseuse du col fémoral (Ishii et coll. 2013). Ces résultats mettent en évidence un effet néfaste de l'inflammation sur les paramètres de santé osseuse (Ishii et coll. 2013).

7.14 Synthèse sur les facteurs corrélables aux indices de résistance osseuse du col fémoral

Plusieurs facteurs sont corrélables aux indices de résistance osseuse du col fémoral. La DMO et ces indices osseux (CSI, BSI et ISI) n'ont pas forcément les mêmes déterminants. La VO_2 max relative (ml/mn/kg), la vitesse de sprint et l'IMC semblent être les meilleurs déterminants des indices de résistance osseuse du col fémoral.

Synthèse et objectifs

L'ostéoporose est une maladie osseuse fréquente qui touche les deux sexes. La méthode de référence du diagnostic de l'ostéoporose est la DXA. Cette technique permet d'évaluer le CMO, la DMO, les indices de géométrie osseuse de la hanche (CSA, CSMI, Z, SI et BR), les indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI) et le score de l'os trabéculaire (TBS). Les fractures ostéoporotiques de la hanche ont des conséquences graves et sont associées à un risque élevé de morbidité et de mortalité. Les conséquences économiques de cette maladie sont également importantes. Ainsi, la mise en place de stratégies visant à prévenir l'ostéoporose semble être nécessaire.

La perte osseuse avec l'avancée en âge est inévitable ; une diminution de 10 % de la DMO est associée à un doublement du risque de fracture vertébrale alors que le risque de fracture de la hanche est augmenté de 2,5 fois. L'optimisation du pic de DMO est une stratégie importante dans le domaine de la prévention de l'ostéoporose. Ce pic est influencé par plusieurs facteurs y compris les facteurs mécaniques.

Il est bien admis que l'influence de l'activité physique sur la DMO dépend surtout du type d'activité physique pratiqué ; l'activité physique caractérisée par des contraintes biomécaniques élevées a un effet ostéogénique plus important que celle caractérisée par le métabolisme énergétique. Les mécanismes décrivant la transformation du signal biomécanique en un signal biochimique ont été auparavant détaillés. Ainsi, la pratique régulière des sports collectifs semble améliorer l'acquisition osseuse pendant l'adolescence dans les deux sexes.

Des études ont indiqué que la réponse ostéogénique à l'exercice physique est plus importante chez les hommes que chez les femmes. D'autre part, plusieurs études ont démontré que la $VO_2\text{max}$, la force maximale et la vitesse de sprint sont des déterminants positifs de la DMO chez les jeunes adultes. Ces paramètres de performance physique sont élevés chez les joueurs de handball. Le but de la présente thèse était de comparer les paramètres de santé osseuse (CMO, DMO, indices géométriques du CF (CSA, CSMI, Z, BR, SI) et indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI)) chez des jeunes adultes pratiquant le handball et des jeunes adultes inactifs.

Cette thèse est basée sur les hypothèses suivantes :

- La pratique du handball est associée à une augmentation des valeurs de DMO dans les deux sexes.
- L'effet positif de la pratique du handball sur les paramètres osseux est plus large chez les hommes que chez les femmes.

Deuxième partie : Contribution personnelle

Méthodologie générale

1. Conception des études menées

La thèse est basée sur deux études principales. Ces deux études transversales ont comparé les paramètres osseux chez des jeunes adultes pratiquant le handball et des jeunes adultes inactifs. Le tableau suivant décrit les études réalisées.

Tableau 11 : Conception des études menées dans le cadre de la thèse

Titre de la publication	Population	Paramètres mesurés	Objectif
Maliha, E., Pinti, A., Bassim, P., Toumi, H., & El Hage, R. (2021). Composite Indices of Femoral Neck Strength in Young Adult Male Handball Players. <i>Journal of clinical densitometry: the official journal of the International Society for Clinical Densitometry</i> ,	24 jeunes hommes pratiquant le handball vs. 20 jeunes hommes inactifs	Paramètres osseux : CMO, DMO, CSA, CSMI, Z, SI, BR, CSI, BSI et ISI. Composition corporelle : masse maigre et masse grasse. Paramètres de performance : Force, vitesse, puissance et VMA. Paramètres nutritionnels : CCJ e CPJ. Autres paramètres : Sommeil.	Comparer les paramètres osseux chez des jeunes hommes pratiquant le handball et des jeunes hommes inactifs.

S1094-6950(21)00096-2. Advance online publication. https://doi.org/10.1016/j.jocd.2021.11.012			
Maliha, E., Khawaja, A., Toumi, H., Jennane, R., Pinti, A., El Hage, R. (2022). Bone health parameters in young adult female handball Players. <i>In International Conference on Bioengineering and Biomedical Signal and Image Processing. Springer, Cham.</i>	20 femmes pratiquant le handball vs. 18 jeunes femmes inactives	Paramètres osseux : CMO, DMO, CSA, CSMI, Z, SI, BR, CSI, BSI et ISI. Composition corporelle : masse maigre et masse grasse. Paramètres de performance : Force, vitesse, puissance et VMA. Paramètres nutritionnels : CCJ e CPJ. Autres paramètres : Sommeil.	Comparer les paramètres osseux chez des jeunes femmes pratiquant le handball et des jeunes femmes inactives.

CMO : Contenu Minéral Osseux ; DMO : Densité Minérale Osseuse ; CSA : Surface de la section transversale ; CSMI : Moment d'inertie de la surface transversale ; Z : Module de section ; SI : Indice de résistance ; BR : *Buckling Ratio* ; CSI : Indice de résistance en compression ; BSI : Indice de résistance en flexion ; ISI : Indice de force aux contraintes ; CCJ : Consommation Calcique Journalière ; CPJ : Consommation Protéique Journalière ; VMA : Vitesse Maximale Aérobie.

2. Sujets et méthodes

2.1 Recrutement des sujets

44 jeunes hommes (24 jeunes hommes pratiquant le handball et 20 jeunes hommes inactifs) et 38 jeunes femmes (20 jeunes femmes pratiquant le handball et 18 jeunes femmes inactives) dont l'âge est compris entre 18 et 30 ans ont participé à cette étude. Les sujets ont été recrutés dans deux Universités privées. La population a été divisée en deux groupes selon le niveau de pratique physique. Les sujets pratiquant le handball s'entraînaient au moins 3 fois par semaine depuis plus de cinq ans et participaient aux championnats du

Liban en Handball. Les sujets inactifs ne pratiquaient pas de sports à impacts et avaient un niveau d'activité physique inférieur au minimum recommandé par l'organisation mondiale de la santé (OMS). Les sujets n'avaient pas d'antécédent de maladie métabolique ou osseuse et n'avaient jamais subi d'immobilisation prolongée.

2.2 Mesure des paramètres anthropométriques et osseux

Les mesures du poids et de la taille des sujets ont été réalisées par l'intermédiaire d'une balance électronique et d'une toise. L'indice de masse corporelle a été calculé : $IMC = \text{poids} / \text{taille}^2$. La composition corporelle, le CMO et la DMO ont été mesurés par DXA (DXA; GE-Lunar iDXA, Madison, WI). La CSA, le CSMI, le Z, le BR et le SI ont été évalués par DXA. Les indices de résistance osseuse du col fémoral ont été calculés à partir des mesures densitométriques et des dimensions corporelles selon la formule de Karlamangla et coll. (2004). Le tableau suivant explique l'intérêt et l'utilité de chaque paramètre osseux mesuré dans cette thèse.

Tableau 12 : Paramètres osseux mesurés dans le cadre de la thèse

Abréviation		Calcul	Importance ou fonction
CMO	Contenu minéral osseux	Mesuré directement par DXA.	Indice permettant de quantifier la masse osseuse.
DMO	Densité minérale osseuse	Mesuré directement par DXA.	Indice très important corrélable à la résistance biomécanique de l'os qui permet de prédire le risque de fracture.
CSA	Surface de la section transversale	Mesuré directement par DXA.	Indicateur de résistance osseuse en compression.
CSMI	Moment d'inertie de la surface transversale	Mesuré directement par DXA.	Moment d'inertie polaire mesurant la résistance osseuse en flexion. Paramètre important de

			rigidité structurale du col fémoral.
Z	Module de section	Mesuré directement par DXA.	Indice reflétant la résistance à la flexion.
BR	Buckling Ratio ou degré d'instabilité corticale	Mesuré directement par DXA.	C'est le ratio entre la distance entre le centre de l'os et le bord externe et l'épaisseur de l'os cortical
SI	Indice de résistance	Mesuré directement par DXA.	Indicateur de la résistance du col fémoral à la force générée lors d'une chute sur le grand trochanter.
CSI	Indice de résistance en compression	$(DMO\ CF * largeur\ CF) / poids$	Indice qui reflète l'habileté du col fémoral à résister à la charge axiale en compression.
BSI	Indice de résistance en flexion	$(DMO\ CF * (largeur\ CF)^2) / (longueur\ de\ l'axe\ de\ la\ hanche * poids)$	Indice qui reflète l'habileté du col fémoral à résister à la force en flexion.
ISI	Indice de force aux contraintes	$(DMO\ CF * largeur\ CF * longueur\ de\ l'axe\ de\ la\ hanche) / (taille * poids)$	Indice qui reflète l'habileté du col fémoral à absorber l'énergie générée par les contraintes mécaniques lors de la chute d'une position debout.

CMO : Contenu Minéral Osseux ; DMO : Densité Minérale Osseuse ; CF : Col Fémoral ; CSA : Surface de la section transversale ; CSMI : Moment d'inertie de la surface transversale ; Z : Module de section ; BR : *Buckling Ratio* ; SI : Indice de résistance ; CSI : Indice de résistance en compression ; BSI : Indice de résistance en flexion ; ISI : Indice de force aux contraintes.

2.3 Evaluation des qualités physiques

Les tests expérimentaux ont été réalisés selon le calendrier suivant (avec 72 heures de récupération entre les différents jours) :

Jour 1 : Evaluation de la force maximale en développé couché et en flexion des jambes (leg curl) ;

Jour 2 : Evaluation de la force maximale en soulevé de terre et en pull-over avec haltères ;

Jour 3 : Evaluation de la force maximale en squat et tirage poitrine à la poulie haute ;

Jour 4 : Evaluation du sprint 20 mètres et de la vitesse de tir ;

Jour 5 : Evaluation de la vitesse maximale aérobie sur tapis roulant ;

Jour 6 : Evaluation des tests athlétiques (triple bonds, décabonds et 5 sauts pieds joints) et des qualités de détente (détente horizontale, détente verticale (Sargent test), Counter Movement Jump (évalué par myotest), Squat-Jump (évalué par myotest) ;

Jour 7 : Evaluation de la puissance maximale des membres inférieurs par le test de charge-vitesse sur bicyclette ergométrique.

2.3.1 Evaluation de la force maximale

La force maximale (1-RM) des exercices cités ci-dessous a été évaluée de manière directe selon les instructions de Kraemer et coll. (2006). La séance visant à évaluer la force maximale a débuté par un échauffement standardisé incluant un travail aérobie et des exercices de musculation à faible intensité. Une séance de familiarisation aux exercices a été réalisée avant le début des séances de mesures de la force maximale.

2.3.2 Evaluation de la performance en sprint

La performance au sprint 20 mètres a été évaluée par des cellules photo-électriques (BROWER Timing Systems). 3 essais ont été réalisés (espacés de 2 minutes de récupération) et la meilleure performance a été retenue. La séance visant à évaluer la performance en sprint

et la vitesse de tir a débuté par un échauffement standardisé incluant de la course à pieds et des éducatifs de course.

2.3.3 Evaluation de la vitesse de tir

La vitesse de tir au handball a été mesurée par un radar portable (pocket radar). La distance du but était de 7 mètres. Le protocole détaillé du tir a été préalablement expliqué par Rios et coll. (2021). 3 essais ont été réalisés et la meilleure performance a été retenue. Il a été démontré que l'évaluation de la vitesse du tir par ces types de radars portables est fiable et reproductible (Hernández-Belmonte et coll. 2021).

2.3.4 Evaluation des tests athlétiques et des qualités de détente horizontale et verticale

Après un échauffement standardisé incluant de la course à pieds et des éducatifs de course, les mesures de la détente horizontale, des triple bonds, des décabonds et des 5 sauts pieds joints ont été réalisées ; 3 essais ont été réalisés pour chaque type de test et le meilleur essai a été retenu. 2 minutes de récupération ont été prises entre les différents essais et les différents exercices. L'évaluation de la détente verticale par la Sargent test a suivi les évaluations des tests athlétiques. Enfin, l'évaluation du CMJ et du SJ a eu lieu à la fin de la séance. 3 essais ont été réalisés pour chaque type de saut et le meilleur essai a été retenu. 2 minutes de récupération ont été prises entre les différents essais et les différents exercices de sauts verticaux.

2.3.5 Evaluation de la puissance maximale par le test charge-vitesse

Le protocole de Vandewalle et coll. (1985) a été utilisé pour estimer la puissance maximale des membres inférieurs sur bicyclette ergométrique. La puissance maximale en watts a ainsi été calculée (charge en kg * vitesse de pédalage (tr/minutes). Un échauffement standardisé a précédé les mesures de puissance.

2.3.6 Evaluation de la vitesse maximale aérobie (VMA) sur tapis roulant

La vitesse maximale aérobie a été mesurée sur tapis roulant. Un test triangulaire a été utilisé : chaque palier avait une durée de 2 minutes et l'augmentation de la vitesse était de 1,5 à 2 km/h par palier (Flandrois et coll. 1982).

2.4 Questionnaires utilisés

Des questionnaires valides ont été utilisés pour estimer la consommation calcique journalière, la consommation protéique journalière, la qualité du sommeil, le niveau usuel d'activité physique et le BPAQ évaluant les contraintes biomécaniques sur les os. Ces paramètres ont été évalués car ils influencent les paramètres osseux.

2.4.1 La consommation calcique journalière (CCJ)

Le questionnaire de Fardellone et coll. (1991) a été utilisé pour estimer la consommation calcique journalière.

2.4.2 La consommation protéique journalière (CPJ)

Le questionnaire de Morin et coll. (2005) a été utilisé pour évaluer la consommation protéique journalière (CPJ).

2.4.3 La qualité de sommeil (PSQI)

L'indice de qualité du sommeil de Pittsburgh a évalué (Buysse et coll. 1989).

2.4.4 Le niveau d'activité physique (IPAQ)

Le niveau usuel d'activité physique a été évalué par le questionnaire IPAQ. Ce questionnaire évalue la marche, l'activité physique modérée, l'activité physique intense et le temps assis (Hagströmer et coll. 2006).

2.4.5 Le BPAQ

Le BPAQ est un questionnaire qui estime les contraintes biomécaniques sur les os. 3 paramètres sont retenus : current BPAQ score, past BPAQ score et total BPAQ score (Weeks et Beck 2008). Ce questionnaire est considéré comme l'un des meilleurs questionnaires permettant de quantifier les contraintes osseuses (Weeks et Beck 2008).

2.5 Etude statistique

Les données sont exprimées en moyennes plus ou moins à la déviation standard (SD). Les analyses statistiques ont été réalisées chez les hommes seuls et les femmes seules. Les différences entre les deux groupes (joueurs de handball et sujets inactifs) dans chaque sexe ont été précisées par le t-test de Student par série non appariée pour les distributions normales et par le test de Mann-Whitney pour les distributions non normales. La taille d'effet du d de Cohen a été calculée pour quantifier l'effet de la pratique du handball sur les paramètres osseux. Les corrélations ont été précisées par le test de Pearson. Des analyses de covariance (ANCOVA) ont été utilisées afin d'explorer les différences entre les deux groupes après ajustement pour la masse maigre ou la force maximale en soulevé de terre. Les analyses statistiques ont été effectuées par le logiciel Number Cruncher Statistical System ((NCSS, 2001; NCSS, Kaysville, UT). Une valeur de p strictement inférieure à 0,05 était exigée afin d'affirmer le caractère significatif des résultats.

Etude 1 : Indices de résistance osseuse du col fémoral chez des jeunes hommes pratiquant le handball

1. Résumé

L'objectif de cette étude était de comparer les indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI) chez des jeunes hommes pratiquant le handball et des jeunes hommes inactifs. 24 hommes pratiquant le handball et 20 hommes inactifs ont participé à cette étude. Le poids et la taille ont été mesurés, et l'indice de masse corporelle (IMC) a été calculé. La DMO a été mesurée au niveau du corps entier (CE), du rachis lombaire (L1-L4), de la hanche totale (HT) et du col fémoral (CF). Les indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI) ont été calculés suivant la méthode de Karlamangla et coll. (2004). Nous avons en plus calculé la taille d'effet (valeurs de d de Cohen) pour évaluer les différences entre les deux groupes concernant les indices de résistance osseuse du col fémoral. Dans cette étude, le poids, la taille et l'IMC n'étaient pas différents entre les deux groupes. La DMO CE, La DMO lombaire, la DMO HT, la DMO CF, le CSI, le BSI et l'ISI étaient significativement supérieurs chez les hommes pratiquant le handball par rapport aux hommes inactifs. Les valeurs de d de Cohen étaient de 1,34 pour le CSI, 1,13 pour le BSI et 1,17 pour l'ISI. Les différences entre les deux groupes étaient de 21,3 % pour le CSI, 24,4 % pour le BSI et 19 % pour l'ISI. Cette étude suggère que la pratique du handball est associée à des valeurs élevées de CSI, BSI et ISI chez les hommes. La pratique du handball semble être importante pour la prévention des fractures ostéoporotiques plus tard dans la vie. Il serait intéressant dans le futur de mener des études longitudinales explorant les effets du handball sur les paramètres osseux chez les adolescents, les jeunes adultes et les personnes âgées.

2. Résultats

2.1 Caractéristiques cliniques et variables osseuses de la population étudiée

Le poids, la taille, l'indice de masse corporelle, le SI, et le PSQI n'étaient pas significativement différents entre les deux groupes. Le temps d'activité physique, la DMO du corps entier, le CMO du corps entier, la DMO du rachis lombaire (L1-L4), la DMO de la

hanche entière, la DMO du col fémoral, les indices géométriques de résistance osseuse du col fémoral comme la surface de section transversale (CSA), le module de section (Z), le moment d'inertie de la surface transversale (CSMI), et les indices de résistance osseuse du col fémoral (le CSI, le BSI et l'ISI) étaient significativement plus élevés dans le groupe de handballeurs par rapport aux hommes inactifs. La masse maigre était significativement plus élevée chez les joueurs de handball par rapport aux sujets témoins ($61,330 \pm 6,293$ vs. $50,144 \pm 5,756$; $p < 0,001$). La masse grasse et le pourcentage de masse grasse étaient significativement plus élevés dans le groupe contrôle par rapport au groupe de handballeurs ($p < 0,001$). Le développé couché, la force de flexion du genou, le squat et le pullover, le soulevé de terre et le force de traction derrière la nuque, les détentes verticale et horizontale, le décabonds, les 5 sauts et le triple saut, le sprint de 20 mètres, le tir, la puissance maximale évaluée par le test charge-vitesse, la VMA, le squat jump, le counter movement jump, le temps d'activité physique ainsi que les consommations en protéines et en calcium étaient significativement plus élevés dans le groupe de handballeurs par rapport au groupe contrôle inactif.

Tableau 13 : Caractéristiques cliniques et variables osseuses de la population étudiée

	Jeunes hommes pratiquant le handball (n=24)	Jeunes hommes inactifs (n=20)	Valeur de p
Age (années)	25,2 ± 0,9	26,2 ± 1,3	0,003
Poids (kg)	82,1 ± 12,2	76,8 ± 13,1	0,17
Taille (cm)	177,4 ± 5,9	176 ± 6,6	0,43
IMC (kg/m ²)	26,0 ± 3,1	24,7 ± 3,7	0,24
CMO CE (g)	3431 ± 425	2859 ± 270	< 0,001
DMO CE (g/cm ²)	1,374 ± 0,093	1,230 ± 0,069	< 0,001
DMO L1-L4 (g/cm ²)	1,457 ± 0,108	1,217 ± 0,132	< 0,001
T-score DMO L1-L4	2,70 ± 0,83	0,76 ± 0,84	< 0,001

DMO HE (g/cm ²)	1,259 ± 0,063	1,033 ± 0,086	< 0,001
DMO CF (g/cm ²)	1,279 ± 0,075	0,981 ± 0,133	< 0,001
T-score DMO CF	1,97 ± 0,57	0,05 ± 0,53	< 0,001
CSA (mm ²)	213 ± 22	167 ± 32	< 0,001
CSMI (mm ⁴)	19,2 ± 3,9	15,4 ± 4,5	0,005
Z (mm ³)	1074 ± 170	827 ± 234	< 0,001
BR	2,97 ± 1,38	4,91 ± 1,51	< 0,001
SI	1,82 ± 0,47	1,61 ± 0,33	0,09
CSI (g/kg-m)	5,79 ± 0,93	4,77 ± 0,48	< 0,001
BSI (g/kg-m)	1,83 ± 0,41	1,47 ± 0,14	< 0,001
ISI (g/kg-m)	0,382 ± 0,061	0,321 ± 0,038	< 0,001
Développé couché (kg)	124,4 ± 19,3	43,9 ± 9,0	< 0,001
Extension genou (kg)	100,7 ± 8,9	41,8 ± 8,2	< 0,001
Flexion genou (kg)	111 ± 21,4	35,4 ± 7,9	< 0,001
Squat (kg)	164,7 ± 25,4	59,6 ± 10,8	< 0,001
Pull Over (kg)	52,2 ± 7,6	24,8 ± 5,0	< 0,001
Traction (kg)	107,5 ± 8,5	48,4 ± 10,3	< 0,001
Soulevé de terre (kg)	170,7 ± 33,2	70,3 ± 11,3	< 0,001
Détente verticale (cm)	62,9 ± 4,0	46,5 ± 4,3	< 0,001
Détente horizontale (m)	2,5 ± 0,0678	2,1 ± 0,165	< 0,001

Décabonds (m)	23,4 ± 0,83	18,9 ± 0,83	< 0,001
Triple sauts (m)	6,8 ± 0,94	5,1 ± 0,21	< 0,001
5 sauts (m)	12,1 ± 0,91	7,8 ± 0,50	< 0,001
Sprint 20m (s)	3,06 ± 0,03	4,00 ± 0,27	<0,001
Vitesse de tir (km/h)	45,2 ± 2,4	34,2 ± 1,0	< 0,001
Puissance (Watts)	946,4 ± 127,8	612 ± 37,1	< 0,001
VMA (km/h)	15,7 ± 0,9	10,7 ± 0,5	<0,001
SJ (cm)	35,3 ± 4,7	26,6 ± 1,1	< 0,001
Counter movement jump (cm)	40,1 ± 4,8	34,0 ± 1,0	< 0,001
Protéines (g/jour)	105,2 ± 7,0	98,1 ± 7,1	0,003
Calcium (mg/jour)	1064 ± 89	870 ± 63	< 0,001
PSQI	9,2 ± 1,6	9,4 ± 0,7	0,085

IMC : « indice de masse corporelle » ; CMO CE : « contenu minéral osseux du corps entier » ; DMO CE : « densité minérale osseuse corps entier » ; DMO HE : « densité minérale osseuse de la hanche entière » ; DMO CF : « densité minérale osseuse col du fémur » ; CSA : « cross sectional area » ; CSI : « compression strength index » ; BSI : « bending strength index » ; ISI : « impact strength index ». CSMI: « cross sectional moment of inertia » ; BR: « buckling ratio; Z: section modulus » ; SI: « strength index ». En gras, différences significatives entre les 2 groupes.

2.2 Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les variables osseuses de la population étudiée

Le poids était positivement corrélé au CMO CE, à la DMO CE, à la DMO HE, à la DMO CF, à la CSA, au CSMI, au Z et négativement corrélé à ISI. La taille était positivement corrélée

au CMO CE, à la DMO CE, à la DMO (L1-L4), à la CSA, au CSMI et au Z. L'indice de masse corporelle était positivement corrélé au CMO CE, à la DMO CE, à la DMO L1-L4, à la DMO HE, à la DMO CF, à la CSA, au CSMI, au SI, au Z et négativement corrélé à ISI. Le temps d'activité physique était positivement corrélé à tous les aspects de la DMO, du CMO et à tous les indices géométriques de résistance osseuse, excepté une corrélation négative entre l'AP et le BR. Le temps de sédentarité était positivement corrélé au BR. La consommation en calcium ainsi que l'apport protéique étaient positivement corrélés à DMO CE, DMO L1-L4, DMO HE, DMO CF, CSA, CSMI et Z. La consommation en calcium était aussi positivement corrélée au CMO CE. Le temps de sommeil était positivement corrélé aux indices : CSMI, Z et SI. Le force maximale en développé couché, extension/flexion du genou, squat, pullover, traction derrière la nuque, soulevé de terre, détente verticale, détente horizontale, décabonds, les 5 sauts, la vitesse de tir et la puissance maximale (évaluée par le test de charge-vitesse) étaient positivement corrélés aux CMO CE, DMO CE, DMO L1-L4, DMO HE, DMO CF, CSA, CSMI, Z, SI, CSI, BSI, ISI, et négativement corrélés au BR. Le triple saut, le *squat-jump*, et le *counter movement jump* étaient positivement corrélés aux CMO CE, DMO CE, DMO L1-L4, DMO HE, DMO CF, CSA, Z, SI, CSI, BSI, ISI mais négativement corrélés au BR. La durée du sprint (20 m) était négativement corrélée au CMO CE, DMO CE, DMO L1-L4, DMO HE, DMO CF, CSA, CSMI, Z, SI, CSI, BSI, ISI. La masse maigre était positivement corrélée au CMO CE ($r = 0,79$; $p < 0,001$), à la DMO CE ($r = 0,80$; $p < 0,001$), à la DMO L2-L4 ($r = 0,79$; $p < 0,001$), à la DMO HT ($r = 0,79$; $p < 0,001$), à la DMO CF ($r = 0,75$; $p < 0,001$), à la CSA ($r = 0,83$; $p < 0,001$), au CSMI ($r = 0,76$; $p < 0,001$), au Z ($r = 0,77$; $p < 0,001$) et au SI ($r = 0,32$; $p < 0,05$). La masse maigre n'était pas corrélée aux indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI). La masse maigre était négativement corrélée au BR ($-0,37$; $p < 0,05$).

Tableau 14 : Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les variables osseuses de la population étudiée

	CMO CE (g)	DMO CE (g/cm ²)	DMO L1-L4 (g/cm ²)	DMO HE (g/cm ²)	DMO CF (g/cm ²)	CSA (mm ²)	CSMI (mm ⁴)	Z (mm ³)	BR	SI	CSI (g/kg-m)	BSI (g/kg-m)	ISI (g/kg-m)
Age (années)	-0,29	-0,12	-0,21	-0,39 **	-0,41 **	-0,33 *	-0,20	-0,29	0,37 *	-0,18	-0,42 **	-0,34 *	-0,41**
Poids (kg)	0,56***	0,62***	0,57***	0,47**	0,46**	0,60***	0,61***	0,55***	-0,03	-0,06	-0,28	-0,12	-0,36*
taille (m)	0,52 ***	0,40 **	0,38 *	0,18	0,16	0,38 *	0,53 ***	0,37 *	0,23	0,06	-0,00	0,11	-0,08
IMC (kg/m ²)	0,61 ***	0,61 ***	0,56 ***	0,42 **	0,41 **	0,59 ***	0,65 ***	0,55 ***	0,06	0,06	-0,24	-0,07	-0,33*
Développé couché (kg)	0,80 ***	0,64 ***	0,73 ***	0,82 ***	0,85 ***	0,80 ***	0,61 ***	0,70 ***	-0,51 ***	0,39 **	0,62 ***	0,58 ***	0,55***
Extension genou (kg)	0,76 ***	0,69 ***	0,75 ***	0,87 ***	0,88 ***	0,83 ***	0,63 ***	0,73 ***	-0,53 ***	0,44 **	0,59 ***	0,55 ***	0,52***
Flexion genou (kg)	0,80 ***	0,65 ***	0,69 ***	0,79 ***	0,83 ***	0,80 ***	0,63 ***	0,71 ***	-0,45 **	0,42 **	0,57 ***	0,55 ***	0,51***
Squat (kg)	0,78***	0,70***	0,72***	0,83	0,85	0,83	0,68	0,75	-0,47	0,42	0,54	0,51	0,47

				***	***	***	***	***	**	**	***	***	**
Pullover (kg)	0,82	0,68	0,76	0,83	0,85	0,83	0,65	0,72	-0,48	0,38	0,54	0,53	0,46
	***	***	***	***	***	***	***	***	***	**	***	***	**
Lateral Pull Down (kg)	0,76***	0,68	0,77	0,86	0,87	0,82	0,62	0,72	-0,53	0,40	0,59	0,55	0,52
		***	***	***	***	***	***	***	***	**	***	***	***
Soulevé de terre (kg)	0,82***	0,61	0,67	0,79	0,83	0,80	0,64	0,72	-0,44	0,42	0,58	0,56	0,51
		***	***	***	***	***	***	***	**	**	***	***	***
Détente verticale (cm)	0,59***	0,50***	0,62***	0,68***	0,70***	0,64	0,39	0,50	-0,57	0,40	0,67	0,61	0,63
						***	**	***	***	**	***	***	***
Détente horizontale (m)	0,67	0,66	0,76	0,78	0,78	0,79	0,61	0,69	-0,52	0,48	0,59	0,57	0,53
	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Décabonds (m)	0,63	0,58	0,69	0,76	0,75	0,68	0,45	0,56	-0,63	0,34	0,60	0,54	0,56
	***	***	***	***	***	***	**	***	***	*	***	***	***
Triple sauts (m)	0,52	0,37	0,46	0,60	0,62	0,50	0,26	0,39	-0,58	0,29	0,57	0,49	0,54
	***	*	**	***	***	***		**	***		***	***	***
5 sauts (m)	0,61	0,56	0,65	0,76	0,75	0,66	0,43	0,55	-0,61	0,35	0,62	0,54	0,59

	***	***	***	***	***	***	**	***	***	*	***	***	***
Sprint 20 m(s)	-0,58 ***	-0,58 ***	-0,62 ***	-0,75 ***	-0,72 ***	-0,64 ***	-0,47 **	-0,56 ***	0,52 ***	-0,36 *	-0,60 ***	-0,50 ***	-0,57 ***
Vitesse de tir (km/h)	0,77 ***	0,70 ***	0,74 ***	0,84 ***	0,86 ***	0,80 ***	0,58 ***	0,68 ***	-0,55 ***	0,42 **	0,63 ***	0,58 ***	0,56 ***
Puissance (watts)	0,85 ***	0,74 ***	0,71 ***	0,78 ***	0,79 ***	0,80 ***	0,67 ***	0,70 ***	-0,43 **	0,31 *	0,41 **	0,40 **	0,35 *
VMA (km/h)	0,52 ***	0,52 ***	0,62 ***	0,76 ***	0,74 ***	0,61 ***	0,38 **	0,52 ***	-0,65 ***	0,32 *	0,67 ***	0,54 ***	0,63 ***
Squat-Jump (cm)	0,57 ***	0,44 **	0,50 ***	0,60 ***	0,59 ***	0,49 ***	0,29	0,38 *	-0,54 ***	0,26	0,56 ***	0,49 ***	0,55 ***
Counter movement jump (cm)	0,60 ***	0,42 **	0,40 **	0,53 ***	0,53 ***	0,50 ***	0,29	0,36 *	-0,41 **	0,35 *	0,52 ***	0,50 ***	0,49 ***
Temps assis (h/jour)	-0,70 ***	-0,66 ***	-0,86 ***	-0,79 ***	-0,81 ***	-0,84 ***	-0,71 ***	-0,76 ***	0,49 ***	-0,41 **	-0,49 ***	-0,49 ***	-0,41 **
Activité physique	0,63 ***	0,67 ***	0,74 ***	0,83 ***	0,81 ***	0,74 ***	0,53 ***	0,64 ***	-0,59 ***	0,33 *	0,57 ***	0,48 ***	0,53 ***

(h/semaine)													
Protéines (g/jour)	0,09	0,61 ***	0,67 ***	0,60 ***	0,58 ***	0,64 ***	0,57 ***	0,55 ***	-0,25	0,07	-0,17	-0,10	-0,25
Calcium (mg/jour)	0,59 ***	0,66 ***	0,61 ***	0,61 ***	0,60 ***	0,72 ***	0,67 ***	0,65 ***	-0,15	0,21	-0,13	-0,00	-0,23
PSQI	0,09	-0,03	-0,15	-0,03	0,04	0,21	0,34 *	0,32 *	0,05	0,44 **	0,11	0,14	0,12

IMC : « indice de masse corporelle » ; CE : « corps entier » ; CMO : « Contenu minéral osseux » ; DMO : « densité minérale osseuse » ; L1-L4 : « rachis lombaire » ; HE : « hanche entiere » ; CF : « col du fémur » ; CSA : « cross-sectional area » ; CSMI : « cross-sectional moment of inertia » ; Z « section modulus » ; BR : « buckling ratio » ; SI : « strength index » ; CSI : « compression strength index » ; BSI : « bending strength index » ; ISI : « impact strength index ». * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

2.3 Paramètres osseux ajustés pour la masse maigre et la force maximale en soulevé de terre

Après ajustement pour la masse maigre (en utilisant une analyse de covariance (ANCOVA)), la DMO CE, la DMO L2-L4, la DMO HT, la DMO CF, la CSA, le Z, le SI, le CSI, le BSI et l'ISI sont restés significativement supérieurs chez les handballeurs par rapport aux sujets témoins. Après ajustement pour la force maximale en soulevé de terre (en utilisant une analyse de covariance), le CMO CE, la DMO CE, la DMO L2-L4, la DMO HT, la DMO CF, le CSI et l'ISI sont restés significativement supérieurs chez les handballeurs par rapport aux sujets témoins.

Letter to the Editor

Composite Indices of Femoral Neck Strength in Young Adult Male Handball Players

Dear Editor,

Osteoporosis is a systemic disease characterized by a decrease in bone mineral density (BMD), a deterioration of bone quality, and an increase in bone fragility caused by genetic and lifestyle factors (1–4). BMD is recognized as a strong predictor of osteoporosis and fracture risk (5–7). Currently, around 200 million people worldwide suffer from osteoporosis (1,2). Although osteoporosis is more common in women compared to men, mortality rate associated with hip fractures appears to be higher in men than in women (2–4). Accordingly, osteoporosis is a serious health problem for both genders (1–4,8,9).

It has been calculated that a 10% increase in peak BMD at the population level reduces the risk of fracture later in life by approximately 50% (5). Also, it has been reported that a 10% increase in peak bone mass gain can delay the onset of osteoporosis by 13 years (5). In addition, a 6.4% decrease in bone mass in childhood has been associated with a twofold risk of fracture in adulthood (6). In comparison, a 10% increase in the age of menopause, or a 10% reduction in age-related (non-menopausal) bone loss would only delay the onset of osteoporosis by 2 years (5). Thus, this theoretical analysis indicates that peak bone mass could be the single most important factor for the prevention of osteoporosis later in life (5). Peak bone mass is influenced by several factors including genetics, nutrition, and mechanical factors (7–11). Herein, we have previously shown that lean mass, body weight, physical activity level and muscular strength are positively correlated to BMD values in Lebanese adults (12–19).

Bone mineral density (BMD) measured by dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) remains the best available method for evaluating future fracture risk (7). However, only 50% to 70 % of total bone strength can be explained by BMD; in fact, two thirds of individuals who suffer a fracture do not have osteoporosis as defined by using BMD values (20,21). These results suggest that the BMD measurement alone is not sufficient to adequately predict future fracture risk (20,21). There is now

substantial evidence showing that body size and femoral neck geometry contribute to fracture risk independently of BMD (22–24). Consequently, Karlamangla et al (24) developed the concept of composite indices of femoral neck strength (compression strength index (CSI), bending strength index (BSI) and impact strength index (ISI)) based on theoretical considerations from a biomechanical viewpoint. These indices integrate body size, femoral neck size, and femoral neck BMD to capture the structural contributions to bone strength (resistance to fracture forces) relative to load (forces placed on the hip during a fall) (24–27). These indices associate inversely with incident hip fracture risk in elderly women from different countries (24–27). A study conducted on Lebanese postmenopausal women has shown that CSI is associated with history of osteoporotic fractures (28).

We have previously shown that physical activity level, sprinting performance and maximum oxygen consumption (VO_2 max, ml/mn/kg) are positively correlated to CSI, BSI and ISI in different groups while fat mass, body fat percent and BMI are negatively correlated to these bone indices (29–38). In addition, soccer practice has been shown to be associated with greater composite indices of femoral neck strength in both genders (32,33). Although handball practice seems to enhance bone mass (39–43), its influence on composite indices of femoral neck strength remains unknown. Handball players require specific training that allows them to perform cyclic and acyclic activities efficiently during 60 minutes of match play (44–48). Handball is a game with a large number of explosive movements such as accelerations, turns, jumps, and throws (44–48). As a result, handball players have high VO_2 max (ml/mn/kg) values and very good performances in sprinting, jumping and throwing events (44–48).

The aim of the present study was to explore the influence of handball practice on composite indices of femoral neck strength CSI, BSI, and ISI) in a group of young adult men. To do so, we compared composite indices of femoral neck strength in handball players and insufficiently active men. We hypothesized that handball players would have

greater indices of femoral neck strength (CSI, BSI and ISI) compared to insufficiently active men.

The present study was carried out in accordance with the declaration of Helsinki (regarding human experimentation developed for the medical community by the World Medical Association). 44 Lebanese young men whose ages range from 24 to 29 years (25.7 ± 1.2 years) participated in our study. All participants were Caucasians, non-smokers and had no history of major orthopedic problems or other disorders known to affect bone metabolism. Other inclusion criteria included no diagnosis of comorbidities and history of fracture. The population was divided into 2 groups based on their physical activity status: 24 handball players and 20 insufficiently active men (controls). Being insufficiently active was defined as "doing some physical activity but less than 150 minutes of moderate intensity physical activity or less than 60 minutes of vigorous-intensity physical activity a week accumulated across work, home, transport or discretionary domains" (49). The handball players were regular participants in national or regional competitions. They had been training in their clubs 4 to 6 times per week, for 6 to 9 h/week for the past 5 years.

Height (m) and weight (kg) were measured, and body mass index (BMI; kg/m^2) was calculated. BMD was assessed by DXA (DXA; GE-Lunar iDXA, Madison, WI). BMD measurements (in g/cm^2) were completed for the lumbar spine (L1-L4), the total hip (TH) and the FN (FN) using dual-energy X-ray densitometry (DXA; GE-Lunar iDXA, Madison, WI). Composite indices of FN strength were calculated as previously described by Karlamangla et al (24). CSI ($\text{CSI} = [\text{FN BMD} * \text{FN width} / \text{weight}]$) and BSI ($\text{BSI} = [\text{FN BMD} * \text{FN width}^2] / [\text{hip axis length} * \text{weight}]$) express the forces that the FN has to withstand in axial compressive and bending forces, whereas ISI ($\text{ISI} = [\text{FN BMD} * \text{FN width} * \text{hip axis length}] / [\text{height} * \text{weight}]$) expresses the energy that the FN has to absorb in an impact from standing height (24). The three indices (CSI, BSI and ISI) are expressed in g/kg^m (24).

Parametric unpaired t-tests were used to compare the means of the two groups (handball players vs controls). Moreover, to determine the differences in composite indices of femoral neck strength between the two groups (handball players vs controls), we calculated Cohen's d (which is the difference between the means of the two groups divided by a pooled standard deviation) for three parameters (CSI, BSI and ISI). Cohens' d is a standardized measure of the effect of a factor (which is handball practice in our study) independent of the scale of the parameter under consideration. It has been reported that

a Cohen's d of 0.2 corresponds to a small effect size, 0.5 to a medium effect size and 0.8 to a large effect size (50). Percentage differences between the two groups (handball players vs controls) for CSI, BSI and ISI have also been calculated. Percentage differences between the two groups were calculated using the following formula: percentage difference = $((\text{mean bone parameter value for handball players} - \text{mean bone parameter value for controls}) / \text{mean bone parameter value for controls}) * 100$.

In our study, age, weight, height and BMI were not significantly different between the two groups (Handball players vs controls). Handball players had significantly greater L1-L4 BMD (1.463 ± 0.107 vs 1.222 ± 0.131 ; $p < 0.001$), TH BMD (1.259 ± 0.063 vs 1.033 ± 0.086 ; $p < 0.001$) and FN BMD (1.279 ± 0.073 vs 0.981 ± 0.133 ; $p < 0.001$) values compared to controls. Handball players had significantly higher CSI (5.79 ± 0.93 vs 4.77 ± 0.48 ; $p < 0.001$; Cohen's d = 1.34; percentage difference = 21.3 %), BSI (1.83 ± 0.41 vs 1.47 ± 0.14 ; $p < 0.001$; Cohen's d = 1.13; percentage difference = 24.4 %) and ISI (0.382 ± 0.061 vs 0.321 ± 0.038 ; $p < 0.001$; Cohen's d = 1.17; percentage difference = 19 %) values compared to controls. The current study suggests that handball practice is associated with greater indices of composite indices of femoral neck strength in young men. Importantly, calculated effect sizes (Cohen's d values) for the three studied parameters (CSI, BSI and ISI) were large (>0.8) highlighting the importance of handball practice on these bone strength indices. The current study has several limitations including its cross-sectional design, the relatively low number of subjects recruited, the lack of inclusion of an active group and the lack of assessment of radius BMD. However, up to our knowledge, this is the first study to evaluate composite indices of femoral neck strength in handball players. Handball practice during adolescence and early adulthood seems important to prevent hip osteoporotic fractures later in life. Future longitudinal studies are necessary to confirm our preliminary results.

Elie Maliha

Antonio Pinti

Paméla Bassim

Hechmi Toumi

Rawad El Hage

¹ Department of Physical Education, Division of

Education, Faculty of Arts and Sciences, University of

Balamand, Kelhat El-Koura, Lebanon

² I3MTO, EA 4708, Université d'Orléans, Orléans, France

³ Laboratoire DeVisu - Design, Visuel, Urbain, EA 2445,

Université polytechnique Hauts-de-France (UPHF),

Valenciennes, France

E-mail: rawadelhage21@hotmail.com

Conflicts of Interest: The authors state that they have no conflicts of interest.

References

- Maalouf G, Bachour F, Hlais S, et al. 2013 Epidemiology of hip fractures in Lebanon: a nationwide survey. *Orthop Traumatol Surg Res* 99(6):675–680.
- Rinonapoli G, Ruggiero C, Meccariello L, et al. 2021 Osteoporosis in men: a review of an underestimated bone condition. *Int J Mol Sci* 22(4):2105.
- Seeman E. 2001 Unresolved issues in osteoporosis in men. *Rev Endocr Metab Disord* 2(1):45–64.
- Kamel HK. 2005 Male osteoporosis: new trends in diagnosis and therapy. *Drugs Aging* 22(9):741–748.
- Hernandez CJ, Beaupre GS, Carter DR. 2003 A theoretical analysis of the relative influences of peak BMD, age-related bone loss and menopause on the development of osteoporosis. *Osteoporos Int* 14(10):843–847.
- Goulding A, Jones IE, Taylor RW, et al. 2000 More broken bones: a 4-year double cohort study of young girls with and without distal forearm fractures. *J Bone Miner Res* 15(10):2011–2018.
- Marshall D, Johnell O, Wedel H. 1996 Meta-analysis of how well measures of bone mineral density predict occurrence of osteoporotic fractures. *Br Med J* 312(7041):1254–1259.
- Bonjour JP, Chevalley T, Ferrari S, Rizzoli R. 2009 The importance and relevance of peak bone mass in the prevalence of osteoporosis. *Salud Publica Mex* 51(1):S5–17 Suppl.
- Chew CK, Clarke BL. 2018 Causes of low peak bone mass in women. *Maturitas* 111:61–68.
- Zhu X, Zheng H. 2021 Factors influencing peak bone mass gain. *Front Med* 15(1):53–69.
- Weaver CM, Gordon CM, Janz KF, et al. 2016 The National Osteoporosis Foundation's position statement on peak bone mass development and lifestyle factors: a systematic review and implementation recommendations. *Osteoporos Int* 27(4):1281–1386.
- El Hage R, Bachour F, Sebaaly A, et al. 2014 The influence of weight status on radial bone mineral density in Lebanese women. *Calcif Tissue Int* 94(4):465–467.
- El Hage R, Bachour F, Khairallah W, et al. 2014 The influence of obesity and overweight on hip bone mineral density in Lebanese women. *J Clin Densitom* 17(1):216–217.
- Khawaja A, Sabbagh P, Prioux J, et al. 2021 The relationships between skeletal muscle index and bone variables in a group of young adults. *J Clin Densitom* 24(1):78–87.
- Saddik H, Pinti A, Antoun A, et al. 2021 Limb muscular strength and bone mineral density in elderly subjects with low skeletal muscle mass index. *J Clin Densitom*: In press.
- Nasr R, N Al Rassy, Watelain E, et al. 2020 Muscular maximal strength indices and bone variables in a group of elderly women. *J Clin Densitom* 23(3):465–471.
- El Hage R, Baddoura R. 2012 Anthropometric predictors of geometric indices of hip bone strength in a group of Lebanese postmenopausal women. *J Clin Densitom* 15(2):191–197.
- El Khoury C, Pinti A, Lespessailles E, et al. 2018 Physical performance variables and bone mineral density in a group of young overweight and obese men. *J Clin Densitom* 21(1):41–47.
- Berro AJ, Rassy NA, Ahmaidi S, et al. 2019 Physical performance variables and bone parameters in a group of young overweight and obese women. *J Clin Densitom* 22(2):293–299.
- Siris ES, Miller PD, Barrett-Connor E, et al. 2001 Identification and fracture outcomes of undiagnosed low bone mineral density in postmenopausal women: results from the National Osteoporosis Risk Assessment. *JAMA* 286(22):2815–2822.
- Nguyen ND, Eisman JA, Center JR, Nguyen TV. 2007 Risk factors for fracture in nonosteoporotic men and women. *J Clin Endocrinol Metab* 92(3):955–962.
- Nelson DA, Beck TJ, Wu G, et al. 2011 Ethnic differences in femur geometry in the women's health initiative observational study. *Osteoporos Int* 22:1377–1388.
- Alonso CG, Curiel MD, Carranza FH, et al. 2000 Femoral bone mineral density, neck-shaft angle and mean femoral neck width as predictors of hip fracture in men and women. Multicenter Project for Research in Osteoporosis. *Osteoporos Int* 11:714–720.
- Karlamangla AS, Barrett-Connor E, Young J, Greendale GA. 2004 Hip fracture risk assessment using composite indices of femoral neck strength: the Rancho Bernardo study. *Osteoporos Int* 15:62–70.
- Yu N, Liu YJ, Pei Y, et al. 2010 Evaluation of compressive strength index of the femoral neck in caucasians and chinese. *Calcif Tissue Int* 87:324–332.
- Ishii S, Cauley JA, Crandall CJ, et al. 2012 Diabetes and femoral neck strength: findings from the hip strength across the menopausal transition study. *J Clin Endocrinol Metab* 97:190–197.
- Ishii S, Greendale GA, Cauley JA, et al. 2012 Fracture risk assessment without race/ethnicity information. *J Clin Endocrinol Metab* 97:3593–3602.
- Ayoub ML, Maalouf G, Bachour F, et al. 2014 DXA-based variables and osteoporotic fractures in Lebanese postmenopausal women. *Orthop Traumatol Surg Res* 100:855–858.
- Finianos B, Zunquin G, El Hage R. 2021 Composite Indices of Femoral Neck Strength in Middle-Aged Inactive Subjects Vs Former Football Players. *J Clin Densitom* 24(2):214–224.
- Zakhem E, Sabbagh P, Ghanem-Zakhem A, et al. 2020 Influence of Physical Activity Level on Composite Indices of Femoral Neck Strength in a Group of Young Overweight Men. *J Clin Densitom* 23(4):596–603.
- Zakhem E, Sabbagh P, C Al Khoury, et al. 2021 Positive correlations between physical activity level and composite indices of femoral neck strength in a group of young overweight and obese men. *Sci Sports* 36(3):210–217.
- El Hage R, Zakhem E, Zunquin G, et al. 2014 Does soccer practice influence compressive strength, bending strength, and impact strength indices of the femoral neck in young men? *J Clin Densitom* 17(1):213–214.
- El Hage R. 2014 Composite indices of femoral neck strength in adult female soccer players. *J Clin Densitom* 17(1):212–213.
- Finianos B, Sabbagh P, Zunquin G, El Hage R. 2021 Relationships between sprinting performance and composite indices of femoral neck strength in a group of young adults. *Sci Sports* 36(4):325–326.
- G El Khoury, Zouhal H, Cabagno G, et al. 2018 Maximal oxygen consumption and composite indices of femoral neck strength in a group of young overweight and obese men. *J Clin Densitom* 21(2):310–311.
- Berro AJ, Fayad N, Pinti A, et al. 2017 Maximal oxygen consumption and composite indices of femoral neck strength in a group of young women. In: Rojas I, Ortuño F. (eds) *Bioinformatics and Biomedical Engineering. IWBBIO 2017. Lecture Notes in Computer Science*, vol 10208:369–375.
- C El Khoury, Toumi H, Lespessailles E, et al. 2017 Decreased composite indices of femoral neck strength in young obese men. *J Clin Densitom* 20(2):268–270.

38. Rocher E, El Hage R, Chappard C, et al. 2013 Bone mineral density, hip bone geometry, and calcaneus trabecular bone texture in obese and normal-weight children. *J Clin Densitom* 16(2):244–249.
39. Missawi K, Zouch M, Chakroun Y, et al. 2016 Handball practice enhances bone mass in specific sites among prepubescent boys. *J Clin Densitom* 19(3):389–395.
40. Vicente-Rodriguez G, Dorado C, Perez-Gomez J, et al. 2004 Enhanced bone mass and physical fitness in young female handball players. *Bone* 35(5):1208–1215.
41. Krahenbühl T, Barros-Filho AA, Barbeta CJO, et al. 2020 Geometric indices of femur bone strength in female handball players. *Women Health* 60(10):1118–1128.
42. Frstrup B, Krstrup P, Andersen JL, et al. 2020 Effects of small-sided recreational team handball training on mechanical muscle function, body composition and bone mineralization in untrained young adults-A randomized controlled trial. *PLoS One* 15(11):e0241359.
43. Krahenbühl T, Gonçalves EM, Guimarães RF, et al. 2016 Competitive swimming and handball participation have a positive influence on bone parameters as assessed by phalangeal quantitative ultrasound in female adolescents. *Pediatr Exerc Sci* 28(3):423–430.
44. Ortega-Becerra M, Belloso-Vergara A, Pareja-Blanco F. 2020 Physical and physiological demands during handball matches in male adolescent players. *J Hum Kinet* 72:253–263.
45. Póvoas SCA, Castagna C, Resende C, et al. 2017 Physical and physiological demands of recreational team handball for adult untrained men. *Biomed Res Int*:6204603:2017.
46. Rannou F, Prioux J, Zouhal H, et al. 2001 Physiological profile of handball players. *J Sports Med Phys Fitness* 41(3):349–353.
47. Sporis G, Vuleta D, Vuleta D Jr, Milanović D. 2010 Fitness profiling in handball: physical and physiological characteristics of elite players. *Coll Antropol* 34(3):1009–1014.
48. Manchado C, Tortosa-Martínez J, Vila H, et al. 2013 Performance factors in women's team handball: physical and physiological aspects—a review. *J Strength Cond Res* 27(6):1708–1719.
49. World Health Organization. 2010 Global Recommendations on Physical Activity for Health. World Health Organization; 2010.
50. Sawilowsky S. 2009 New effect size rules of thumb. *J Mod Appl Stat Methods* 8(2):26.

Etude 2 : Paramètres de santé osseuse chez des jeunes femmes pratiquant le handball

1. Résumé

L'objectif de cette étude était de comparer les paramètres de santé osseuse (contenu minéral osseux (CMO), densité minérale osseuse (DMO), indices géométriques du col fémoral (surface de la section transversale (CSA), moment d'inertie de la surface transversale (CSMI), module de section (Z), *buckling ratio* (BR) et indice de résistance (SI)) et indices de résistance du col fémoral (indice de résistance en compression (CSI), indice de résistance en flexion (BSI) et indice de force aux contraintes (ISI)) chez des jeunes femmes pratiquant le handball et des jeunes femmes inactives. 38 jeunes femmes âgées de 20 à 32 ans (dont 20 femmes pratiquant le handball depuis au moins 5 ans et 18 femmes inactives) ont participé à cette étude. La composition corporelle, le CMO, la DMO et les indices de géométrie osseuse du col fémoral ont été mesurés par DXA. La DMO a été mesurée au niveau du corps entier (CE), du rachis lombaire (L1-L4), de la hanche totale (HT) et du col fémoral (CF). Les indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI) ont été calculés selon les formules de Karlamangla et coll. (2004). Des tests de performance valides ont été utilisés afin d'évaluer la force maximale en squat, la force maximale en développé couché, la force maximale en soulevé de terre, la détente horizontale, la détente verticale, la performance au sprint de 20 mètres et la vitesse maximale aérobie. Des questionnaires valides ont été utilisés afin d'évaluer la qualité de sommeil, les apports protéiques journaliers, la consommation calcique journalière et le niveau d'activité physique. La masse maigre, le CMO CE, la DMO CE, la DMO L1-L4, la DMO HT, la DMO CF, le CSMI, le Z , le niveau d'activité physique, la consommation protéique journalière (CPJ), la consommation calcique journalière (CCJ), la force maximale en développé-couché, la force maximale en squat et la force maximale en soulevé de terre étaient significativement supérieures chez les femmes pratiquant le handball par rapport aux femmes inactives. Après ajustement pour la masse maigre en utilisant des analyses de covariance, les valeurs de DMO sont restées supérieures chez les femmes pratiquant le handball par rapport aux femmes inactives. En conclusion, cette étude suggère que la pratique du handball est associée à des valeurs plus

élevées de DMO chez les jeunes femmes adultes. Notre étude a des applications pratiques dans le domaine de la prévention de l'ostéoporose chez les femmes ; les résultats obtenus encouragent la pratique du handball pour prévenir les fractures ostéoporotiques plus tard dans la vie. Des études longitudinales et rétrospectives seront nécessaires afin de confirmer les résultats obtenus par notre étude transversale.

2. Résultats

2.1 Caractéristiques cliniques et variables osseuses de la population étudiée

La masse maigre, le CMO CE, la DMO CE, la DMO L1-L4, la DMO HT, la DMO CF, le CSMI et le Z étaient significativement supérieurs chez les femmes pratiquant le handball par rapport aux femmes inactives. La force maximale des membres supérieurs et inférieurs, la vitesse de sprint, les qualités de détente, la VMA, la consommation calcique journalière et la consommation protéique journalière étaient significativement supérieures chez les femmes pratiquant le handball que les femmes inactives.

2.2 Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux

La masse maigre, les paramètres de force maximale, la vitesse de tir, la puissance maximale des membres inférieurs, la consommation calcique journalière et la consommation protéique journalière étaient positivement corrélés au CMO CE, à la DMO CE, à la DMO L1-L4, à la DMO HT et à la DMO CF.

2.3 Paramètres osseux ajustés pour la masse maigre et la force maximale en soulevé de terre

Après ajustement pour la masse maigre en utilisant des analyses de covariance, les valeurs de DMO sont restées supérieures chez les femmes pratiquant le handball par rapport aux femmes inactives. Après ajustement pour la force maximale en soulevé de terre, les différences entre les deux groupes (femmes pratiquant le handball et femmes inactives) au niveau du CMO CE et de

la DMO L1-L4 ont disparu alors que la DMO CE et la DMO de la hanche sont devenues plus élevées chez les femmes inactives par rapport aux femmes pratiquant le handball.

Bone Health Parameters in Young Adult Female Handball Players

Elie Maliha^{1,2}, Anthony Khawaja^{1,3}, Hechmi Toumi⁴, Rachid Jennane²,
Antonio Pinti⁵(✉), and Rawad El Hage¹

¹ Faculty of Arts and Sciences, Division of Education, Department of Physical Education,
University of Balamand, Kelhat El-Koura, Lebanon

² IDP Laboratory, University of Orleans, UMR 7013, rue de Chartres, 45067 Orleans, France

³ Faculty of Sport Sciences, Antonine University, Mejdlaya-Zgharta, Lebanon

⁴ Translational Medicine Research Platform, PRIMMO, Regional Hospital of Orleans,
45007 Orleans, France

⁵ Laboratoire LARSH DeVisu, Université Polytechnique Hauts-de-France (UPHF),
Valenciennes, France

antonio.pinti@uphf.fr

Abstract. The main aim of this study was to compare bone health parameters (bone mineral content [BMC], bone mineral density [BMD], geometric indices of femoral neck [FN] strength (cross-sectional area [CSA], cross-sectional moment of inertia [CSMI], section modulus [Z], buckling ratio [BR] and strength index [SI]) and composite indices of FN strength (compression strength index [CSI], bending strength index [BSI], and impact strength index [ISI])) in young adult inactive women ($n = 18$) and young adult female handball players ($n = 20$). The participants of the study were 38 young adult women; their ages ranged from 20 to 32 years. Dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) was used to evaluate body composition, BMC, BMD and geometric indices of FN strength. BMD measurements were completed for the whole body (WB), the lumbar spine (L1–L4), the total hip (TH) and the femoral neck (FN). Composite indices of femoral neck (FN) strength (CSI, BSI, and ISI) were calculated. Validated tests were used to evaluate maximal bench-press strength, maximal half-squat strength, maximal deadlift strength, vertical jump, horizontal jump, sprinting performance and maximal aerobic velocity. Validated questionnaires were used to evaluate sleep quality, daily protein and calcium intakes and physical activity level. Lean mass, WB BMC, WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD, CSMI, Z, physical activity level, daily protein intake, daily calcium intake, one-repetition maximum (1-RM) bench press, 1-RM half-squat and 1-RM deadlift were significantly higher in female handball players compared to inactive women. In conclusion, the present study suggests that handball practice is associated with better bone health parameters in young adult women.

Keywords: Peak bone mass · Team sports · Prevention of osteoporosis · Mechanical loading

1 Introduction

A frequent disorder in the bones is commonly known as osteoporosis, and its distinctive characteristics are low bone mineral density (BMD) as well as reduction signs of bone microarchitecture; these eventually result in a higher fracture risk [1]. As a matter of fact, 50% of women who are older than 50 years are affected by osteoporosis [2]. Bones, in general, reach 90% of their peak mass in people aged 20 years [2]. Therefore, a possible solution could be making sure there is maximal acquisition of bone mineral content (BMC) to compensate for the age-related bone loss [2]. There are a lot of effective preventive tools to prevent osteoporosis. One of the most effective strategies against osteoporosis is physical activity (PA) practice [1, 2]. In fact, PA ameliorates the acquisition of bone mass, expands the mass of muscles and eventually provides a balanced and healthy energy to the body [1, 2]. The best diagnosis known for osteoporosis is done by performing dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) scan which measures BMD, and this is considered to be the reference standard for diagnosis. Although the leading indicator in measuring strength of bone is BMD [3, 4], it is only capable of explaining 50–70% of the strength of bone [5]. DXA can also measure geometric indices of bone resistance that can be evaluated in the area of the femoral neck (FN); these indices include cross-sectional area [CSA], cross-sectional moment of inertia [CSMI], section modulus [Z], buckling ratio [BR] and strength index [SI]) [6]. These indices are correlated with biomechanical bone strength and are predictors of osteoporotic fractures in the elderly [7–9]. FN width and bending strength are parameters which are also known to influence hip bone strength [10, 11]. Composite indices of FN strength (compression strength index [CSI], bending strength index [BSI], and impact strength index [ISI]) can be measured through hip scans taken by DXA, from which the risk of a future hip fracture can be predicted; this has been studied and confirmed by Karlamangla et al. [11]. FN size and body size merge with bone density due to these indices [12]. CSI, BSI, and ISI are a reflection of the FN's capacity to withstand axial compressive and bending forces and also its ability to retain the energy received from a collision [12]. Besides, in the elderly population, hip fracture risks as well as assessments of bone strength are improved by these indices [11–13]. Nowadays, the prevention of osteoporosis later in life is directly linked to the increase of peak BMD; therefore, it is essential to implement strategies which would increase peak BMD [14]. Several significant correlations have been demonstrated by several studies between BMD and the results of performances received through tests done physically for the evaluation of fitness components [15–18]. The findings of a study conducted on adult women [19] showed that vertical jump (VJ), maximum power (MP) of the lower limbs and maximal half-squat strength are positively associated with bone health parameters (BMD and geometric indices of hip bone strength). Likewise, another study which included young adults [20] demonstrated a positive association between VJ, MP and bone health parameters (BMD and geometric indices of hip bone strength). In addition, several studies conducted on young adults have found that PA levels are positive determinants of composite indices of the strength of the femoral neck [21–28]. Two previous studies conducted on prepubertal children [29] and adult women [30] are in conformity with these results. They have shown a positive association between the level of PA and CSI, BSI and ISI [29, 30]. Also, the findings of another recent study showed that inactive men aged more than 18 years in

comparison to their active peers have lower composite indices of FN strength [26]. A recent randomized controlled trial conducted on postmenopausal women [31] found a positive impact on bone turnover after a short period of practicing handball within a team and also positively affected the health of bone and postural balance; these positive effects were received even though the women did not have any previous training in handball. All this may help in preventing the risk of falling and having fractures. Another recent study conducted on adolescent females [2] showed that larger values of BMC were found in the women who had received more than one year of handball training compared to the women who had received training in soccer; both groups of women have higher values of BMC compared to women who were not engaged in sports. Similarly, a previous study has demonstrated that handball practice results in three positive effects; the first shows an improvement in physical fitness, the second shows an improvement in the lean mass and the bone mass, and the final one shows an improvement in the axial and appendicular BMD of young girls [15]. A recent study demonstrated that when young men practice handball, this results in a higher level of BMD and composite indices of femoral neck strength [32]. This study's aim is to verify whether such results are present in women. The aim of the present study was to compare bone health parameters (BMC, BMD, geometric indices of FN strength [CSA, CSMI, Z, BR, SI] and composite indices of FN strength [CSI, BSI and ISI]) in young adult inactive women and young female handball players. We hypothesized that young adult women who practice handball have greater bone health parameters compared to inactive females.

2 Material and Methods

2.1 Subjects and Study Design

The subjects who accepted to be in the present study are young adult women. They were 38 volunteers between the ages of 20 and 32. None of the subjects smoked, and none of them suffered from any considerable orthopedic problem or any disorder such as diabetes known to affect bone metabolism. Participants were excluded if they had a medical condition which could negatively affect bone metabolism. One example is a person who has a history of chronic disease involving a vital organ. Another criterion for exclusion is taking medications which could affect bone metabolism. In the current study, the participants were divided in two different groups: one group of 18 inactive women and another group of 20 female handball players. The practice of handball was the determinant for assigning the participants into the proper group. The women assigned to the inactive group were young adult inactive women. The definition of being inactive was "performing less than 150 min of moderate intensity PA or less than 75 min of vigorous-intensity PA or less than an equivalent combination of moderate- and vigorous-intensity activity a week accumulated across work, home, transport or discretionary domains" [33]. Moreover, the subjects in the inactive group had never regularly practiced a sport which was considered an impact sport any time during the years of adolescence or during childhood. The other group included the handball players who regularly participated in competitions nationally or regionally. Their training included at least 6 h every week (it sometimes went up to 9 h); they trained at their clubs between 4 and 6 times weekly; this training had been consistent for the past 5 years. All participants had very clear

knowledge of the study's aim and the advantages as well as the risks entailed in the participation. Therefore, the subjects were required to sign a consent form before participating in the study. The work described fits the requirements of the declaration of Helsinki (relating to experimenting on humans via the medical community which was proposed by the World Medical Association).

2.2 Anthropometrics

The participants were weighed through the use of a standard mechanical scale (which is precise to up to 100 g), and a standard stadiometer (which is precise to the nearest 0.5 cm) was used to measure their height. While they were being measured, the subjects were asked to wear very negligible clothing and to be barefoot. BMI was calculated as body weight divided by height squared (in kilogram per square meter) [34]. DXA (GE-Lunar iDXA, Madison, WI) assessed the composition of the body which included the lean mass (LM; Kg), and it also assessed FM (%; Kg).

2.3 Bone Measurements

Every participant was assessed by DXA (GE-Lunar iDXA, Madison, WI) to evaluate BMC (in grams) and BMD (in grams per square centimeter). DXA was used to complete the measurements of BMD for the whole body (WB), the lumbar spine (L1–L4), the total hip (TH), the FN and total radius BMD of the right side. Moreover, DXA calculated the geometric indices of FN strength (CSA, CSMI, Z, BR and SI). As Karlamangla et al. [11] had described, composite indices of FN strength (CSI, BSI and ISI) were calculated. The importance of the indices is that they are able to predict the possible risk of a hip fracture in an elderly individual [11–13]. CSI ($CSI = [FN\ BMD * FN\ width/weight]$) and BSI ($BSI = [FN\ BMD * FN\ width^2]/[hip\ axis\ length * weight]$) indicate the forces that the FN has to withstand in axial compressive and bending forces; however, ISI ($ISI = [FN\ BMD * FN\ width * hip\ axis\ length]/[height * weight]$) reveals how much energy FN can retain during impact from standing height [8–10]. All of the previously mentioned measurements done by DXA scans were performed by one certified technician (who holds a BS in medical imaging sciences) who used the same technique for all measurements. One DXA machine was used for the subjects of the study. At the laboratory, the variation coefficients were <1% for BMC and BMD. The variation coefficients for CSA and Z assessed through multiple measurements for 10 participants were <3%.

2.4 Procedures of Physical Performance Tests

An explanatory session was given to the participants of the study in order for them to understand and be familiar with the required equipment to be used while performing the physical tests as well as with the procedures of the tests; this was done before the procedures of evaluations began. When the tests began, they took place on 3 non-consecutive days. On the first day, the tests determined the time of the 20 m sprint and maximal aerobic velocity (MAV) using Luc-Léger shuttle-run test. On the second

day, vertical jump (VJ), horizontal jump (HJ), throwing velocity, force-velocity power (FV) on cycle ergometer, squat-jump (SJ) and counter movement jump (CMJ) were appropriately measured. On the third day, the tests determined one-repetition maximum (1-RM) of bench press, leg extension, leg curl, half-squat, and deadlift.

2.5 Sprinting Performance

The measurement of time of the sprint of 20 m took place with the use of 2 pairs of photoelectric cells which were linked to an electronic timer (BROWER Timing Systems). For proper measurement, pair number 1 was placed at the starting line (0 m), and pair number 2 was placed at the 20-m finish line. A specific warm-up was performed by the subjects of the study before beginning the evaluation process. The assessment was made up of a 20 m maximal sprint to be done four times; after every maximal sprint, the subjects passively rested for 3 consecutive minutes, and then they went for another sprint. Every sprint's time was recorded, and out of the four times, the best one was chosen to be evaluated as previously described [35].

2.6 Jumping Performance

The jump and reach Sargent test [35] was used to measure VJ height. A specific warm-up was performed by the participants before beginning the process of evaluation. The subjects of the study carried out a CMJ with free movements of the upper limbs. The number of times that the participants jumped was 3; they rested for 2 consecutive minutes between each jump, and the value of the highest jump was taken. The best recorded value of the VJ was taken for the calculation of the peak power of the lower limb; this was done by using the Lewis Formula [36]. HJ was also calculated. The HJ was performed by all subjects; they began standing up. They started the jump by swinging their upper limbs. For precision, the participants positioned their feet, which were in a shoulder-width position, immediately before the line which had been previously drawn. A metric tape was used to measure the length of the jump; it was done by measuring the distance from the take-off line to the nearest landing point, which is considered as where the heels touch. Three attempts were performed by every participant, and the attempt with the longest distance achieved was the one chosen. CMJ and squat-jump performances were measured using a Myotest device.

2.7 Maximal Strength Measurements

Every one of the subjects performed the half-squat, the bench press, the leg extension, the leg curl and the leg extension following the protocol established by the National Strength and Conditioning Association (NSCA) [37]. Direct evaluations of 1-RM have been done for all the above-mentioned exercises. Prior to the beginning of the test, the subjects warmed-up by following a specific standardized routine. If the participant was not able to perform the exercise in its full range of motion, then the test was stopped. While performing the half-squats, the participants had to squat till they reached a 90-degree knee angle; this had to be done in all the attempts.

2.8 Questionnaires

Sleep Quality

The quality of sleep and the sleep disturbances were evaluated by the Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI); this took place for 30 days. Scores were given for 7 “components” which are related to subjective sleep quality, sleep latency, sleep duration, habitual sleep efficiency, sleep disturbances, use of sleeping medication, and daytime dysfunction. The scores of the 7 components were added, and the sum received [38] was evaluated. If the PSQI score was high, it meant that sleep quality was bad; therefore, the lower the score, the better the sleep quality. Because a significant correlation has been shown between parameters [39–41] of bone health and sleep quality in several preceding studies, sleep quality was evaluated.

Daily Calcium and Protein Intakes

The participants had to fill authenticated questionnaires about their food frequency [42–44]; those were semi-quantitative, and they evaluated the DCI, which is daily calcium intake and DPI, which is daily protein intake. The assessment of the consumption of milk and dairy products such as yoghurt, cheese and chocolate, and other products such as eggs, meat, fish, cereals, bread, vegetables and fruits [42] was done through the DCI questionnaire. As for the DPI questionnaire, it gives the participants the opportunity for quantifying or assessing their food intake through which the large quantity of proteins is provided [44]. The participants did not require any help in filling in the DCI and DPI questionnaires. The participants in the study were not taking any supplements.

Physical Activity

For the evaluation of the PA duration for every week, the global PA questionnaire was used; it checks for the number of hours of PA per week [45]. 16 questions are included in the questionnaire; the answers result in knowing more about the PA being done while working, traveling and doing recreational activities. It provides details of intensity, duration and frequency of physical activities.

Statistical Analysis

Calculations were done to find the means and standard deviations for all clinical, physical performance and bone parameters. The Shapiro-Wilk test was used to evaluate for normality of all variables. The inactive group was compared to the handball group, but this was done after checking for Gaussian distribution. The use of unpaired t-tests was required in case Gaussian distribution was found. If not, Mann-Whitney U-tests were used. Pearson’s Test was used to compute correlations. Statistical analyses were performed using the SigmaStat 3.1 Program (Jandel Corp., San Rafael, CA). A level of significance of $p < 0.05$ was used.

3 Results

3.1 Clinical Characteristics and Bone Data of the Study Population

Age, weight, BMI, FM, CSA, SI, CSI, BSI, ISI and PSQI were not significantly different between the 2 groups. LM, WB BMC, WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD, CSMI, Z, DPI and DCI were significantly higher in handball players compared to inactive women. Height, FM percentage and BR were significantly higher in inactive women compared to handball players (Table 1).

Table 1. Clinical characteristics and bone variables of the study population.

	Handball players (n = 20)	Controls (n = 18)	p-value
	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	
Age (years)	25.9 $\pm$ 3.7	24.2 $\pm$ 1.9	0.101
Weight (kg)	64.8 $\pm$ 9.4	67.6 $\pm$ 8.8	0.352
Height (cm)	164.3 $\pm$ 5.3	168.2 $\pm$ 3.7	0.013
BMI (kg/m ²)	24.0 $\pm$ 3.5	23.9 $\pm$ 3.1	0.902
Lean mass (Kg)	38.990 $\pm$ 3.223	31.046 $\pm$ 2.457	<0.001
Fat mass (Kg)	24.604 $\pm$ 5.629	25.858 $\pm$ 1.939	0.376
Fat mass (%)	34.6 $\pm$ 3.3	38.4 $\pm$ 1.4	<0.001
WB BMC (g)	2358 $\pm$ 234	2183 $\pm$ 235	0.028
WB BMD (g/cm ²)	1.152 $\pm$ 0.084	1.054 $\pm$ 0.107	0.003
L1-L4 BMD (g/cm ²)	1.247 $\pm$ 0.106	1.098 $\pm$ 0.079	<0.001
TH BMD (g/cm ²)	1.064 $\pm$ 0.064	0.961 $\pm$ 0.021	<0.001
FN BMD (g/cm ²)	1.072 $\pm$ 0.101	0.942 $\pm$ 0.024	<0.001
CSA (mm ²)	155 $\pm$ 16	149 $\pm$ 5	0.123
CSMI (mm ⁴)	10.93 $\pm$ 1.07	9.85 $\pm$ 1.37	0.010
Z (mm ³)	649 $\pm$ 71	590 $\pm$ 35	0.003
BR	2.61 $\pm$ 0.33	3.97 $\pm$ 0.94	<0.001
SI	1.84 $\pm$ 0.34	1.68 $\pm$ 0.07	0.068
CSI (g/kg-m)	5.14 $\pm$ 0.82	5.06 $\pm$ 0.55	0.722
BSI (g/kg-m)	1.58 $\pm$ 0.26	1.66 $\pm$ 0.16	0.255
ISI (g/kg-m)	0.312 $\pm$ 0.046	0.328 $\pm$ 0.035	0.237
1-RM bench press (kg)	28.750 $\pm$ 3.837	12.944 $\pm$ 1.474	<0.001
1-RM leg extension (kg)	37.750 $\pm$ 3.864	13.333 $\pm$ 1.534	<0.001
1-RM leg curl (kg)	28.100 $\pm$ 4.303	8.944 $\pm$ 1.830	<0.001

(continued)

Table 1. (continued)

	Handball players (n = 20)	Controls (n = 18)	p-value
	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	
1-RM squat (kg)	59.650 $\pm$ 5.537	22.056 $\pm$ 3.404	<0.001
1-RM deadlift (kg)	58.250 $\pm$ 5.098	33.056 $\pm$ 2.838	<0.001
VJ (cm)	33.000 $\pm$ 4.365	22.000 $\pm$ 1.372	<0.001
HJ (m)	1.567 $\pm$ 0.0863	1.158 $\pm$ 0.0618	<0.001
20 m sprint (s)	3.878 $\pm$ 0.048	4.009 $\pm$ 0.050	<0.001
Throwing velocity (km/h)	32.400 $\pm$ 1.818	27.833 $\pm$ 0.786	<0.001
FV power (watts)	567.150 $\pm$ 27.410	471.167 $\pm$ 16.797	<0.001
MAV (km/h)	10.800 $\pm$ 0.696	8.333 $\pm$ 0.485	<0.001
SJ (cm)	19.515 $\pm$ 1.695	11.782 $\pm$ 0.464	<0.001
CMJ (cm)	27.330 $\pm$ 1.677	17.166 $\pm$ 0.306	<0.001
DPI (g/day)	95.6 $\pm$ 6.7	63.5 $\pm$ 9.0	<0.001
DCI (mg/day)	1064.0 $\pm$ 89.8	870.3 $\pm$ 63.3	<0.001
PSQI	9.0 $\pm$ 2.1	9.1 $\pm$ 0.3	0.751

SD, standard deviation; BMI, body mass index; WB, whole body; BMC, bone mineral content; BMD, bone mineral density; L1–L4, Lumbar spine; TH, total hip; FN, femoral neck; CSA, cross-sectional area; CSMI, cross-sectional moment of inertia; Z, section modulus; BR, buckling ratio; SI, strength index; CSI, compression strength index; BSI, bending strength index; ISI, impact strength index; RM, repetition maximum; VJ, vertical jump; HJ, horizontal jump; FV, force-velocity; CMJ, counter movement jump; DPI, daily protein intake; DCI, daily calcium intake; PSQI, Pittsburgh sleep quality index. In bold, significant differences between the 2 groups.

3.2 Physical Performance Variables of the Study Population

1-RM bench press, 1-RM leg extension, 1-RM leg curl, 1-RM half-squat, 1-RM deadlift, VJ, HJ, throwing velocity, FV power, MAV, SJ and CMJ were significantly higher in handball players compared to inactive women. 20 m sprint duration was significantly higher in inactive women compared to handball players (Table 1).

3.3 Correlations Between Clinical Variables and Bone Variables Characteristics of the Study Population

Age was positively correlated to WB BMC, WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD, CSA, Z and SI. Age was negatively correlated to BR. Weight was negatively correlated to SI, CSI, BSI and ISI. Height was positively correlated to WB BMD, L1–L4 BMD and BR. Height was negatively correlated to WB BMC and TH BMD. BMI was positively correlated to WB BMC and WB BMD. BMI was negatively correlated to SI, CSI, BSI and ISI. LM was positively correlated to WB BMC, WB BMD, L1–L4 BMD,

TH BMD, FN BMD and Z. LM was negatively correlated to BR. FM was positively correlated to WB BMC. FM was negatively correlated to SI, CSI, BSI and ISI. FM percentage was positively correlated to BR. FM percentage was negatively correlated to L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD, SI and CSI. ST was negatively correlated to WB BMC, WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD and Z. ST was positively correlated to BR. PA was positively correlated to WB BMC, WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD and Z. PA was negatively correlated to BR. DPI was positively correlated to WB BMC, WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD and Z. DPI was negatively correlated to BR, BSI and ISI. DCI was positively correlated to WB BMC, WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD and Z. DCI was negatively correlated to BR (Table 2).

3.4 Correlations Between Physical Performance Variables and Bone Characteristics of the Study Population

1-RM bench press was positively correlated to WB BMC, WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD, CSA, Z and CSMI. 1-RM bench press was negatively correlated to BR. 1-RM leg extension was positively correlated to WB BMC, WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD, CSA, Z and SI. 1-RM leg extension was negatively correlated to BR. 1-RM leg curl was positively correlated to WB BMC, WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD, CSA, Z and SI. 1-RM leg curl was negatively correlated to BR. 1-RM half-squat was positively correlated to WB BMC, WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD, Z and SI. 1-RM half-squat was negatively correlated to BR. 1-RM deadlift was positively correlated to WB BMC, WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD, CSA, Z and SI. 1-RM deadlift was negatively correlated to BR. VJ was positively correlated to L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD and SI. VJ was negatively correlated to BR. HJ was positively correlated to WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD and SI. HJ was negatively correlated to BR. 20 m sprint duration was positively correlated to BR. 20 m sprint duration was negatively correlated to WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD and FN BMD. Throwing velocity was positively correlated to WB BMC, WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD, CSA and Z. Throwing velocity was negatively correlated to BR. FV power was positively correlated to WB BMC, WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD, CSA and Z. FV power was negatively correlated to BR. MAV was positively correlated to WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD and Z. MAV was negatively correlated to BR. SJ was positively correlated to WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD and SI. SJ was negatively correlated to BR. CMJ was positively correlated to WB BMD, L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD, Z and SI. CMJ was negatively correlated to BR (Table 2).

Table 2. Correlations between clinical characteristics and bone variables in the whole population.

	WB BMC (g)	WB BMD (g/cm ²)	L1-L4 BMD (g/cm ²)	TH BMD (g/cm ²)	FN BMD (g/cm ²)	CSA (mm ²)	CSMI (mm ⁴)	Z (mm ⁻³)	BR	SI	CSI (g/kg-m)	BSI (g/kg-m)	ISI (g/kg-m)
Age (yr)	0.38 *	0.48 **	0.55 ***	0.59 ***	0.61 ***	0.52 ***	0.12	0.42 **	-0.38 *	0.47 **	0.28	0.20	0.19
Weight (kg)	0.22	0.22	-0.12	-0.04	-0.05	0.17	-0.18	0.19	0.02	-0.37 *	-0.77 ***	-0.57 ***	-0.74 ***
Height (m)	-0.42 **	0.49 **	0.61 ***	-0.47 **	-0.25	0.08	0.05	-0.003	0.33 *	-0.08	0.01	0.29	-0.02
BMI (kg/m ²)	0.41 **	0.42 **	0.14	0.16	0.05	0.13	-0.20	0.19	-0.11 *	-0.34 *	-0.78 ***	-0.70 ***	-0.73 ***
Lean mass (Kg)	0.35 *	0.43 **	0.53 ***	0.61 ***	0.55 ***	0.26	0.08	0.44 **	-0.65 ***	0.21	-0.06	-0.25	-0.30
Fat mass (Kg)	0.40 *	0.18	0.01	0.04	-0.05	0.19	-0.34 *	0.06	0.02	-0.41 **	-0.58 ***	-0.48 **	-0.50 **
Fat mass %	-0.04	-0.22	-0.37 *	-0.42 **	-0.44 **	-0.08	-0.38 *	-0.25	0.38 *	-0.41 *	-0.44 **	-0.24	-0.27
1-RM bench press (kg)	0.40 *	0.55 ***	0.69 ***	0.83 ***	0.81 ***	0.39 *	0.40 *	0.58 ***	-0.73 ***	0.38 *	0.18	-0.03	-0.08
1-RM leg extension (kg)	0.43 **	0.54 ***	0.71 ***	0.82 ***	0.76 ***	0.32 *	0.41 **	0.51 ***	-0.73 ***	0.36 *	0.14	-0.10	-0.10
1-RM leg curl (kg)	0.44 **	0.56 ***	0.73 ***	0.84 ***	0.78 ***	0.37 *	0.39 *	0.53 ***	-0.71 ***	0.37 *	0.15	-0.08	-0.10
1-RM half-squat (kg)	0.40 *	0.50 **	0.69 ***	0.79 ***	0.71 ***	0.26	0.36 *	0.45 **	-0.72 ***	0.33 *	0.06	-0.18 *	-0.17
1-RM deadlift (kg)	0.42 **	0.58 ***	0.73 ***	0.84 ***	0.77 ***	0.34 *	0.36 *	0.51 ***	-0.74 ***	0.37 *	0.08	-0.14	-0.15
VJ (cm)	0.10	0.30	0.53 ***	0.57 ***	0.46 **	-0.03	0.18	0.13	-0.61 ***	0.42 **	0.15	-0.12	-0.05

(continued)

Table 2. (continued)

	WB BMC (g)	WB BMD (g/cm ²)	L1-L4 BMD (g/cm ²)	TH BMD (g/cm ²)	FN BMD (g/cm ²)	CSA (mm ²)	CSMI (mm ⁴)	Z (mm ³)	BR	SI	CSI (g/kg-m)	BSI (g/kg-m)	ISI (g/kg-m)
HJ (m)	0.28	0.39 *	0.59 ***	0.63 ***	0.52 ***	0.05	0.38 *	0.30	-0.63 ***	0.34 *	0.14	-0.15	-0.07
20 m Sprint (s)	-0.31	-0.40 *	-0.65 ***	-0.74 ***	-0.66 ***	-0.23	-0.34 *	-0.30	0.78 ***	-0.26	-0.18	0.09	-0.02
Throwing velocity (Km/h)	0.61 ***	0.68 ***	0.81 ***	0.91 ***	0.82 ***	0.47 **	0.40 *	0.59 ***	-0.75 ***	0.27	0.06	-0.15	-0.14
FV power (watts)	0.54 ***	0.60 ***	0.72 ***	0.84 ***	0.77 ***	0.42 **	0.46 **	0.58 ***	-0.74 ***	0.25	0.03	-0.19	-0.21
MAV (km/h)	0.28	0.44 **	0.60 ***	0.66 ***	0.60 ***	0.11	0.24	0.36 *	-0.67 ***	0.25	0.11	-0.13	-0.12
SJ (cm)	0.24	0.41 *	0.60 ***	0.67 ***	0.58 ***	0.10	0.34 *	0.31	-0.68 ***	0.41 **	0.14	-0.13	-0.09
CMI (cm)	0.27	0.41 **	0.61 ***	0.69 ***	0.61 ***	0.13	0.36 *	0.36 *	-0.69 ***	0.38 *	0.14	-0.13	-0.10
ST (h/day)	-0.39 *	-0.39 *	-0.55 ***	-0.70 ***	-0.64 ***	-0.26	-0.43 **	-0.46 **	0.73 ***	-0.11	0.00	0.20	0.25
PA (h/week)	0.33 *	0.39 *	0.52 ***	0.61 ***	0.54 ***	0.14	0.39 *	0.41 **	-0.67 ***	0.16	-0.05	-0.27	-0.30
DPI (g/day)	0.42 ***	0.56 ***	0.60 ***	0.73 ***	0.64 ***	0.30	0.27	0.50 **	-0.65 ***	0.18	-0.17	-0.38 *	-0.40 *
DCI (g/day)	0.40 *	0.42 **	0.61 ***	0.64 ***	0.60 ***	0.27	0.28	0.40 *	-0.49 **	0.17	0.17	-0.04	-0.00
PSQI	-0.26	-0.10	-0.10	-0.08	-0.10	-0.13	-0.09	-0.16	0.06	0.26	0.03	0.02	-0.00

BMI, body mass index; WB, whole body; BMC, bone mineral content; BMD, bone mineral density; L1-L4, Lumbar spine; TH, total hip; FN, femoral neck; CSA, cross sectional area; CSMI, cross-sectional moment of inertia; Z, section modulus; BR, buckling ratio; SI, strength index; CSI, compression strength index; BSI, bending strength index; ISI, impact strength index; RM, repetition maximum; VJ, vertical jump; HJ, horizontal jump; FV, force-velocity; SJ, squat-jump; CMI, counter movement jump; ST, sitting time; PA, physical activity; DPI, daily protein intake; DCI, daily calcium intake; PSQI, Pittsburgh sleep quality index. *p < 0.05. **p < 0.01. ***p < 0.001.

4 Discussion

In the present study, two groups of young adult women were compared (handball players vs. inactive young adult women). We noticed a clear difference in the results regarding various bone health parameters such as WB BMC, BMD and Z which had a remarkably greater value in female handball players compared to inactive women. Similarly, LM, PA, DPI and DCI had a remarkably greater value in handball players compared to inactive women. In contrast, FM percentage, BR and ST had a remarkably greater value in inactive women compared to handball players. However, age, weight, BMI, FM, CSA, SI, CSI, BSI, ISI and sleep quality did not show any significant differences when comparing the 2 groups.

Our results seem logical and are in compliance with those of many other studies which showed that handball players have significantly greater bone health parameters compared to non-athlete controls [2, 31]. The results of three recent studies conducted on adolescent females [2, 15] and postmenopausal women [31] are in accordance with those received in this study. Pereira et al. [31] performed a trial which was random and controlled and aimed at evaluating the outcome of recreational team handball on bone health, postural balance and body composition in inactive postmenopausal women. Sixty-seven postmenopausal women (68.3 ± 6.2 years) were subjects of the study [31]. They were randomized into handball team ($n = 41$) and control group ($n = 26$) [31]. The intervention stretched through a period of 16 weeks during which the handball team performed two to three 60-min training sessions per week; as for the control group, they did not change their routine of PA [31]. They noticed a positive impact on bone turnover after a short period of practicing handball within a team and also positively affected the health of bone and postural balance; these positive effects were received even though the women did not have any previous training in handball. All this may help in preventing the risk of falling and having fractures [31]. Another current study by Fagundes et al. [2] aimed to compare the bone mass content, bone mass density and LM of young female soccer players (odd-impact loading exercise), handball players (high-impact loading exercises) and non-athletes. One hundred and fifteen female handball players (15.5 ± 1.3 years) and one hundred forty-two soccer players (15.5 ± 1.5 years) were evaluated for body composition using a dual-emission X-ray absorptiometry system, and one hundred thirty-six female non-athletes (data from NHANES) (15.1 ± 1.32 years) were considered as the control group [2]. They showed that the lowest BMC values were for the non-athletes, followed by higher values for the adolescents who practiced soccer; the highest recorded values were for the adolescent females practicing handball for at least one year [2]. These results justify the choice of practicing a specific sport to increase bone mass gain in this population [2]. Vicente-Rodriguez et al. [15] have evaluated the effect of PA on the BMC and BMD of 51 adolescent girls (14.2 ± 0.4 yr). They have demonstrated that handball practice results in three positive effects; the first shows an improvement in physical fitness, the second shows an improvement in the lean mass and the bone mass, and the final one shows an improvement in the axial and appendicular BMD of adolescent girls [15]. They also suggested that they could identify girls who have lower values of bone mass through the use of the combination of anthropometric and fitness-related variables [15].

Our results showed clear differences in several physical performance variables. 1-RM bench press, 1-RM leg extension, 1-RM leg curl, 1-RM squat, 1-RM deadlift, VJ, HJ, throwing velocity, FV power, MAV, SJ and CMJ had a remarkably greater value for the handball players compared to inactive women. These results seem to be logical since practicing handball improves jumping performance, lower limb strength and upper limb strength. On the other hand, 20 m sprint duration (seconds) yielded a higher score in inactive women compared to handball players.

The present study demonstrated that weight was negatively correlated to SI, CSI, BSI and ISI. BMI was positively correlated to WB BMC and WB BMD but negatively correlated to SI, CSI, BSI and ISI. FM was positively correlated to WB BMC but negatively correlated to SI, CSI, BSI and ISI. FM percentage was positively correlated to BR but negatively correlated to L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD, SI and CSI. Our results are in accordance with the results of many preceding studies which were done on young adults that have showed that body weight, BMI and FM were negatively associated to composite indices of FN strength [21–28, 46]. The excess of FM may negatively affect FN strength composite indices. For this reason, the implementation of strategies aiming at reducing FM excess should be done to prevent the incidents of fractures associated to in a later phase of life to osteoporosis.

Furthermore, our findings are a confirmation of the influence of LM on bone health in young adult women. LM was positively correlated to WB BMC, BMD and Z but negatively correlated to BR. ST was negatively correlated to WB BMC, BMD and Z but positively correlated to BR. PA was positively correlated to WB BMC, BMD and Z but negatively correlated to BR. These findings confirm the findings of studies that were done previously on young adults that have shown significant associations between LM, PA and bone health parameters [26, 28, 47–49]. Accordingly, putting into effect a plan which would augment LM is crucial for young adult women because it would help in the lack of occurrence of osteoporotic fractures later in life. Our results are the same as the results founded by several pre-ceding studies that suggested that LM is an important determinant of WB BMC, FN CSA and FN Z [50–57]. A cross-sectional study in which 70 osteoporotic and menopausal women participated, has found a significant association between LM and bone health parameters (BMC and BMD) [58]. The study has shown that FN BMD and femur BMD were correlated to LM [58]. Another study [59] which was done on a group of young adults has demonstrated a positive association between LM and WB BMC and WB BMD in both young men and women. Our results confirm the relation between DPI and DCI with bone health parameters. DPI and DCI were positively correlated to WB BMC, BMD and Z but negatively correlated to BR. The associations between DPI and DCI with bone variables have been demonstrated by two previous studies conducted on young adults [59, 60]. The yielded results affirm the importance of protein and daily calcium intakes for bone health.

Our findings showed that 1-RM squat was positively correlated to WB BMC, BMD, Z but negatively correlated to BR. Several authors have demonstrated that 1-RM half-squat was significantly associated with bone variables in adult women who were overweight and obese [19], in overweight men [61], in men who are middle-aged [28], in elderly men [62] and in elderly women [63]. 1-RM bench press was positively correlated to WB BMC, BMD, CSA and Z but negatively correlated to BR. These findings are similar

to other findings from a current study which was done on middle-aged men [28]. The current study is the pioneer in finding several significant associations. 1-RM leg extension and leg curl were positively correlated to WB BMC, BMD, CSA, and Z but negatively correlated to BR. The current study demonstrated that VJ was positively correlated to L1–L4 BMD, TH BMD, FN BMD and SI but negatively correlated to BR. HJ, and SJ were positively correlated to BMD and SI but negatively correlated to BR. CMJ was positively correlated to BMD, Z and SI but negatively correlated to BR. The goal of these physical tests is to call attention to the relative power. These findings are in conformity with the findings of previously done studies by our research team on young adults that have found positive associations between VJ and bone health parameters [19, 20, 64]. Similarly, a previous study conducted by our research team suggested that HJ and counter movement jump were positively correlated to several bone health parameters in middle-aged men [28]. Thus, the results that we found call attention to the necessity of increasing jumping performance of the lower limbs to prevent osteoporosis later in life. 20 m sprint duration was negatively correlated to BMD. Similarly, a previous recent study conducted on middle-aged men has demonstrated a negative correlation between sprinting performance and several bone health parameters [28]. They showed that the performance of sprinting best determined the composite indices in this population [28]. Longitudinal studies to be done in the future ought to confirm the impact of sprint training on bone health parameters. The current study was the first to show significant associations between throwing velocity, FV power, MAV and bone health parameters in young adults. We noticed that throwing velocity was positively correlated to WB BMC, BMD, CSA and Z but negatively correlated to BR. FV power was positively correlated to WB BMC, BMD, CSA and Z but negatively correlated to BR. MAV was positively correlated to BMD and Z but negatively correlated to BR. The latter highlights the importance of improving cardiovascular endurance to prevent osteoporosis later in life. These results have clinical implications since high BR values have a close association with a higher fracture risk in the elderly.

Despite our study being an original one, it presents various limitations. The first limitation is that the study's nature is cross-sectional, and therefore, a causal relationship between handball practice and bone health parameters cannot be confirmed. The second limitation is that the number of subjects is low in both groups; however, there were enough power values which made running the analyses and testing the differences between the 2 groups regarding bone health parameters possible and credible. The third limitation is that we did not assess many bone health correlates (such as hormones and vitamin D levels). The fourth limitation of our study is that visceral FM was not evaluated. It is well known that visceral fat has a deleterious effect on bone health parameters [65, 66]. The last limitation was the lack of use of a specific PA questionnaire to measure the effect of mechanical strain on BMD [67, 68]. Nevertheless, based on our knowledge, comparing bone health parameters (BMC, BMD, geometric indices of FN strength [CSA, CSMI, Z, BR, SI] and composite indices of FN strength [CSI, BSI, and ISI]) in inactive young adult women and young female handball players has been done for the first time in the current study.

5 Conclusion

To conclude, our study suggests that handball training is affiliated with greater bone health parameters in young adult women. As a result, practicing handball during young adulthood years could protect from the risk of contracting osteoporotic fractures later in life. Finally, selecting proper training programs in the duration of young adult years ought to be adapted accordingly.

Disclosure of Interest. None of the authors reported a conflict of interest related to the study.

References

1. Castrogiovanni, P., Trovato, F.M., Szychlińska, M.A., Nsir, H., Imbesi, R., Musumeci, G.: The importance of physical activity in osteoporosis. From the molecular pathways to the clinical evidence. *Histol. Histopathol.* **31**, 1183–1194 (2016)
2. Fagundes, U., Vancini, R.L., Seffrin, A., et al.: Adolescent female handball players present greater bone mass content than soccer players: a cross-sectional study. *Bone* **154**, 116217 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.bone.2021.116217>
3. World Health Organization: Assessment of fracture risk and its application to screening for postmenopausal osteoporosis. Report of a WHO Study Group. *World Health Organ. Tech. Rep. Ser.* **843**, 1–129 (1994)
4. Kanis, J.A., McCloskey, E.V., Johansson, H., Oden, A., Melton 3rd., J., Khaltayev, N.: A reference standard for the description of osteoporosis. *Bone* **42**, 467–475 (2008)
5. Stone, K.L., Seeley, D.G., Lui, L.Y., et al.: BMD at multiple sites and risk of fracture of multiple types: long-term results from the study of osteoporotic fractures. *J. Bone Miner. Res.* **18**, 1947–1954 (2003)
6. Beck, T.J., Ruff, C.B., Warden, K.E., Scott Jr., W.W., Rao, G.U.: Predicting femoral neck strength from bone mineral data. A structural approach. *Invest. Radiol.* **25**(1), 6–18 (1990)
7. Beck, T.J.: Extending DXA beyond bone mineral density: understanding hip structure analysis. *Curr. Osteoporos. Rep.* **5**(2), 49–55 (2007)
8. Kaptoge, S., Da Silva, J.A., Brixen, K., et al.: Geographical variation in DXA bone mineral density in young European men and women. Results from the Network in Europe on Male Osteoporosis (NEMO) study. *Bone* **43**(2), 332–339 (2008)
9. LaCroix, A.Z., Beck, T.J., Cauley, J.A., et al.: Hip structural geometry and incidence of hip fracture in postmenopausal women: what does it add to conventional bone mineral density? *Osteoporos. Int.* **21**(6), 919–929 (2010)
10. Black, D.M., Bouxsein, M.L., Marshall, L.M., et al.: Proximal femoral structure and the prediction of hip fracture in men: a large prospective study using QCT. *J. Bone Miner. Res.* **23**, 1326–1333 (2008)
11. Karlamangla, A.S., Barrett-Connor, E., Young, J., Grenndale, G.A.: Hip fracture risk assessment using composite indices of femoral neck strength: the Rancho Bernardo study. *Osteoporos. Int.* **15**, 62–70 (2004)
12. Yu, N., Liu, Y.J., Pei, Y., et al.: Evaluation of compressive strength index of the femoral neck in Caucasians and Chinese. *Calcif. Tissue Int.* **87**, 324–332 (2010)
13. Ayoub, M.L., Maalouf, G., Bachour, F., et al.: DXA-based variables and osteoporotic fractures in Lebanese postmenopausal women. *Orthop. Traumatol. Surg. Res.* **100**(8), 855–858 (2014)
14. Nilsen, O.A., Ahmed, L.A., Winther, A., et al.: Changes and tracking of bone mineral density in late adolescence: the Tromsø study. *Fit futures. Arch. Osteoporos.* **12**(1), 37 (2017)

15. Vicente-Rodriguez, G., Dorado, C., Perez-Gomez, J., Gonzalez-Henriquez, J.J., Calbet, J.A.: Enhanced bone mass and physical fitness in young female handball players. *Bone* **35**, 1208–1215 (2004)
16. Dixon, W.G., Lunt, M., Pye, S.R., et al.: Low grip strength is associated with bone mineral density and vertebral fracture in women. *Rheumatology (Oxford)* **44**(5), 642–646 (2005)
17. Sirola, J., Rikkinen, T., Tuppurainen, M., Jurvelin, J.S., Alhava, E., Kröger, H.: Grip strength may facilitate fracture prediction in perimenopausal women with normal BMD: a 15-year population based study. *Calcif. Tissue Int.* **83**, 93–100 (2008)
18. Sherk, V.D., Palmer, I.J., Bembien, M.G., Bembien, D.A.: Relationships between body composition, muscular strength, and bone mineral density in estrogen-deficient postmenopausal women. *J. Clin. Densitom.* **12**, 292–298 (2009)
19. Berro, A.J., Al Rassy, N., Ahmaidi, S., et al.: Physical performance variables and bone parameters in a group of young overweight and obese women. *J. Clin. Densitom.* **22**(2), 293–299 (2019)
20. Khawaja, A., Sabbagh, P., Prioux, J., et al.: Does muscular power predict bone mineral density in young adults? *J. Clin. Densitom.* **22**(3), 311–320 (2019)
21. El Hage, R.: Composite indices of femoral neck strength in adult female soccer players. *J. Clin. Densitom.* **17**, 212–213 (2014)
22. El Hage, R., Zakhem, E., Zunquin, G., Theunynck, D., Moussa, E., Maalouf, G.: Does soccer practice influence compressive strength, bending strength, and impact strength indices of the femoral neck in young men? *J. Clin. Densitom.* **17**(1), 213–214 (2014)
23. Berro, A.-J., et al.: Maximal oxygen consumption and composite indices of femoral neck strength in a group of young women. In: Rojas, I., Ortuño, F. (eds.) *IWBBIO 2017. LNCS*, vol. 10208, pp. 369–375. Springer, Cham (2017). https://doi.org/10.1007/978-3-319-56148-6_32
24. El Khoury, C., Toumi, H., Lespessailles, E., et al.: Decreased composite indices of femoral neck strength in young obese men. *J. Clin. Densitom.* **20**(2), 268–270 (2017)
25. El Khoury, G., Zouhal, H., Cabagno, G., et al.: Maximal oxygen consumption and composite indices of femoral neck strength in a group of young overweight and obese men. *J. Clin. Densitom.* **21**(2), 310–311 (2018)
26. Zakhem, E., Sabbagh, P., Ghanem-Zakhem, A., et al.: Influence of physical activity level on composite indices of femoral neck strength in a group of young overweight. *J. Clin. Densitom.* **23**(4), 596–603 (2020)
27. Zakhem, E., Sabbagh, P., El Khoury, C., Zunquin, G., Baquet, G., El Hage, R.: Positive correlations between physical activity level and composite indices of femoral neck strength in a group of young overweight and obese men. *Sci. Sports* (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2020.06.010>
28. Finianos, B., Zunquin, G., El Hage, R.: Composite indices of femoral neck strength in middle-aged inactive subjects vs former football players. *J. Clin. Densitom.* **24**(2), 214–224 (2021)
29. Sardinha, L.B., Baptista, F., Ekelund, U.: Objectively measured physical activity and bone strength in 9-year-old boys and girls. *Pediatrics* **122**(3), e728–e736 (2008)
30. Mori, T., et al.: Physical activity as determinant of femoral neck strength relative to load in adult women: findings from the hip strength across the menopause transition study. *Osteoporos. Int.* **25**(1), 265–272 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00198-013-2429-z>
31. Pereira, R., Krustup, P., Castagna, C., et al.: Effects of recreational team handball on bone health, postural balance and body composition in inactive postmenopausal women - a randomised controlled trial. *Bone* **145**, 115847 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.bone.2021.115847>
32. Maliha, E., Pinti, A., Bassim, P., Toumi, H., El Hage, R.: Composite indices of femoral neck strength in young adult male handball players. *J. Clin. Densitom.* (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2021.11.012>

33. World Health Organization. Global Recommendations on Physical Activity for Health. World Health Organization (2010)
34. Sabbagh, P., et al.: Relationships between muscular power and bone health parameters in a group of young Lebanese adults. In: Rojas, I., Valenzuela, O., Rojas, F., Herrera, L.J., Ortuño, F. (eds.) *Bioinformatics and Biomedical Engineering: 8th International Work-Conference, IWBBIO 2020, Granada, Spain, May 6–8, 2020, Proceedings*, pp. 119–129. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-45385-5_11
35. Finianos, B., Sabbagh, P., Zunquin, G., El Hage, R.: Muscular power and maximum oxygen consumption predict bone density in a group of middle-aged men. *J. Musculoskelet. Neuronal. Interact.* **20**(1), 53–61 (2020)
36. Harman, E., Rosenstein, M., Frykman, P., Rosenstein, R., Kraemer, W.: Estimation of human power output from vertical jump. *J. Strength Cond. Res.* **5**(3), 116 (1991)
37. Haff, G.G., Triplett, N.T. (eds.): *Essentials of Strength Training and Conditioning*, 4th edn. Human kinetics (2015)
38. Buysse, D.J., Reynolds, C.F., 3rd., Monk, T.H., Berman, S.R., Kupfer, D.J.: The Pittsburgh sleep quality index: a new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Res.* **28**(2), 193–213 (1989)
39. Zakhem, E., El Hage, R., Zunquin, G., Jacob, C., Moussa, E., Theunynck, D.: Sleep quality is a determinant of hip bone mineral density in a group of young Lebanese men. *J. Med. Liban.* **62**(4), 213–216 (2014)
40. Bonjour, J.P., Chevalley, T., Ferrari, S., Rizzoli, R.: The importance and relevance of peak bone mass in the prevalence of osteoporosis. *Salud. Publ. Mex.* **51**(Suppl 1), S5-17 (2009)
41. Lucassen, E.A., de Mutsert, R., le Cessie, S., et al.: Poor sleep quality and later sleep timing are risk factors for osteopenia and sarcopenia in middle-aged men and women: the NEO study. *PLoS ONE* **12**(5), e0176685 (2017)
42. Fardellone, P., Sebert, J.L., Bouraya, M., et al.: Evaluation of the calcium content of diet by frequential self-questionnaire. *Rev. Rhum. Mal. Osteoartic.* **58**(2), 99–103 (1991)
43. El Hage, R., Jacob, C., Moussa, E., Jaffré, C., Benhamou, C.L.: Daily calcium intake and body mass index in a group of Lebanese adolescents. *J. Med. Liban.* **57**(4), 253–257 (2009)
44. Morin, P., Herrmann, F., Ammann, P., Uebelhart, B., Rizzoli, R.: A rapid self-administered food frequency questionnaire for the evaluation of dietary protein intake. *Clin. Nutr.* **24**(5), 768–774 (2005)
45. Armstrong, T., Bull, F.: Development of the global physical activity questionnaire (GPAQ). *J. Publ. Health* **14**, 66–70 (2006)
46. Kim, H., Lee, S.H., Kim, B.J., Koh, J.M.: Association between obesity and femoral neck strength according to age, sex, and fat distribution. *Osteoporos. Int.* **28**(7), 2137–2146 (2017)
47. El Hage, R., Zakhem, E., Zunquin, G., Theunynck, D., Moussa, E., Maalouf, G.: Does soccer practice influence compressive strength, bending strength, and impact strength indices of the femoral neck in young men? *J. Clin. Densitom.* **17**(1), 213–214 (2014)
48. El Hage, R., Bachour, F., Sebaaly, A., Issa, M., Zakhem, E., Maalouf, G.: The influence of weight status on radial bone mineral density in Lebanese women. *Calcif. Tissue Int.* **94**(4), 465–467 (2014)
49. El Hage, R., Khairallah, W., Bachour, F., et al.: Influence of age, morphological characteristics, and lumbar spine bone mineral density on lumbar spine trabecular bone score in Lebanese women. *J. Clin. Densitom.* **17**(3), 434–435 (2014)
50. El Khoury, C., Pinti, A., Lespessailles, E., et al.: Physical performance variables and bone mineral density in a group of young overweight and obese men. *J. Clin. Densitom.* **21**(1), 41–47 (2018)
51. Petit, M.A., Beck, T.J., Hughes, J.M., Lin, H.M., Bentley, C., Lloyd, T.: Proximal femur mechanical adaptation to weight gain in late adolescence: a six-year longitudinal study. *J. Bone Miner. Res.* **23**, 180–188 (2008)

52. Shea, K.L., Gozansky, W.S., Sherk, V.D., et al.: Loss of bone strength in response to exercise-induced weight loss in obese postmenopausal women: results from a pilot study. *J. Musculoskelet. Neuronal Interact.* **14**(2), 229–238 (2014)
53. MacKelvie, K.J., McKay, H.A., Petit, M.A., Moran, O., Khan, K.M.: Bone mineral response to a 7-month randomized controlled, school-based jumping intervention in 121 prepubertal boys: associations with ethnicity and body mass index. *J. Bone Miner. Res.* **17**(5), 834–844 (2002)
54. Nikander, R., Sievänen, H., Heinonen, A., Kannus, P.: Femoral neck structure in adult female athletes subjected to different loading modalities. *J. Bone Miner. Res.* **20**(3), 520–528 (2005)
55. Lorentzon, M., Mellström, D., Ohlsson, C.: Association of amount of physical activity with cortical bone size and trabecular volumetric BMD in young adult men: the GOOD study. *J. Bone Miner. Res.* **20**(11), 1936–1943 (2005)
56. Bonjour, J.P., Chevalley, T., Rizzoli, R., Ferrari, S.: Gene environment interactions in the skeletal response to nutrition and exercise during growth. *Med. Sport Sci.* **51**, 64–80 (2007)
57. El Hage, R., Jacob, C., Moussa, E., Youssef, H., Jaffré, C.: Effects of 12 weeks of endurance training on bone mineral content and bone mineral density in obese, overweight and normal weight adolescent girls. *Sci. Sports* **24**(3–4), 210–213 (2009)
58. Genaro, P.S., Pereira, G.A., Pinheiro, M.M., Szejnfeld, V.L., Martini, L.A.: Influence of body composition on bone mass in postmenopausal osteoporotic women. *Arch. Gerontol. Geriatr.* **51**(3), 295–298 (2010)
59. Zakhem, E., El Khoury, G., Feghaly, L., et al.: Performance physique et densité minérale osseuse chez de jeunes adultes libanais. *J. Med. Liban.* **64**(4), 193–199 (2016)
60. El Khoury, G., Zouhal, H., Cabagno, G., et al.: Bone variables in active overweight/obese men and sedentary overweight/obese men. *J. Clin. Densitom.* **20**(2), 239–246 (2017)
61. Khawaja, A., Sabbagh, P., Prioux, J., Pinti, A., El Khoury, G., El Hage, R.: Relation between maximal half squat strength and bone variables in a group of young overweight men. In: *International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, pp. 374–384. Springer, Cham (2019). https://doi.org/10.1007/978-3-030-17935-9_34
62. Nasr, R., Al Rassy, N., Watelain, E., Ishac, S., Abdul Al, O., El Hage, R.: Muscular maximal strength indices and bone variables in a group of elderly men. *Sci. Sports* **34**(1), 56–58 (2019)
63. Nasr, R., Al Rassy, N., Watelain, E., et al.: Muscular maximal strength indices and bone variables in a group of elderly women. *J. Clin. Densitom.* **23**(3), 465–471 (2018)
64. Khawaja, A., Kamlé, P., Maliha, E., et al.: Relationships between vertical jump and composite indices of femoral neck strength in a group of young women. In: *International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, pp. 27–38. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-88163-4_3
65. El Hage, R., Jacob, C., Moussa, E., Baddoura, R.: Relative importance of lean mass and fat mass on bone mineral density in a group of Lebanese postmenopausal women. *J. Clin. Densitom.* **14**(3), 326–331 (2011)
66. El Hage, R., El Hage, Z., Moussa, E., Jacob, C., Zunquin, G., Theunynck, D.: Geometric indices of hip bone strength in obese, overweight, and normal-weight adolescent girls. *J. Clin. Densitom.* **16**(3), 313–319 (2013)
67. Dolan, S.H., Williams, D.P., Ainsworth, B.E., Shaw, J.M.: Development and reproducibility of the bone loading history questionnaire. *Med. Sci. Sports Exerc.* **38**(6), 1121–1131 (2006)
68. Kemper, H.C.G., Bakker, I., Twisk, J.W.R., van Mechelen, W.: Validation of a physical activity questionnaire to measure the effect of mechanical strain on bone mass. *Bone* **30**(5), 799–804 (2002)

Synthèse sur les deux études principales

1. Taille d'effet

1.1 Taille d'effet des paramètres osseux chez les hommes pratiquant le handball

Classiquement, un d équivalent à 0,2 est décrit comme un effet « faible », un d équivalent à 0,5 est décrit comme un effet « moyen » et un d équivalent à 0,8 est décrit comme un effet « fort ». Les résultats obtenus montrent que les valeurs de d de Cohen sont supérieures à 0,8 pour la plupart des paramètres osseux montrant ainsi un fort effet de la pratique du handball sur ces paramètres. Les valeurs de BR sont inférieures chez les hommes pratiquant le handball par rapport aux sujets témoins.

Tableau 15 : Taille d'effet des paramètres osseux chez les hommes pratiquant le handball

Hommes	d Cohen	CLES
CMO CE (g)	1.575	0.867
DMO CE (g/cm ²)	1.735	0.89
DMO L1-L4 (g/cm ²)	2.16	0.937
DMO HT (g/cm ²)	3.042	0.984
DMO CF (g/cm ²)	2.831	0.977
CSA (mm ²)	1.705	0.886
CSMI (mm ⁴)	0.909	0.74
Z (mm ³)	1.226	0.807
BR	-1.347	0.83
SI	0.509	0.641
CSI(g/km-m)	1.342	0.829
BSI(g/km-m)	1.133	0.789
ISI(g/kg-m)	1.575	0.867

CLES : Common language effect size ; CE : corps entier ; CMO : contenu minéral osseux ; DMO : densité minérale osseuse ; L1-L4 : rachis lombaire ; HT : hanche totale, CF : col fémoral ; CSA : surface de la section transversale, CSMI : moment d'inertie de la surface transversale ; Z : module de section ; BR : buckling ratio ; SI : indice de résistance ; CSI : indice de résistance en compression ; BSI : indice de résistance en flexion ; ISI : indices de forces aux contraintes.

1.2 Taille d'effet des paramètres osseux chez les femmes pratiquant le handball

Classiquement, un d équivalent à 0,2 est décrit comme un effet « faible », un d équivalent à 0,5 est décrit comme un effet « moyen » et un d équivalent à 0,8 est décrit comme un effet « fort ». Les résultats obtenus montrent que les valeurs de d de Cohen sont supérieures à 0,8 pour la plupart des valeurs de DMO montrant ainsi un large effet de la pratique du handball sur la DMO. La pratique de handball ne semble pas avoir un effet positif sur les indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI). Les valeurs de BR sont inférieures chez les femmes pratiquant le handball par rapport aux sujets témoins. Enfin, l'effet sur les paramètres de géométrie osseuse (CSA, CSMI, Z et SI) semble être moyen ou fort.

Tableau 16 : Taille d'effet des paramètres osseux chez les femmes pratiquant le handball

Femmes	d Cohen	CLES
CMO CE (g)	0.746	0.701
DMO CE (g/cm ²)	1.026	0.766
DMO L1-L4 (g/cm ²)	1.581	0.868
DMO HT (g/cm ²)	2.116	0.933
DMO CF (g/cm ²)	1.729	0.889
CSA (mm ²)	0.495	0.637
CSMI (mm ⁴)	0.879	0.733
Z (mm ³)	1.037	0.768
BR	-1.974	0.919

SI	0.636	0.673
CSI(g/km-m)	0.113	0.532
BSI(g/km-m)	-0.366	0.602
ISI(g/kg-m)	-0.389	0.608

CLES : Common language effect size ; CE : corps entier ; CMO : contenu minéral osseux ; DMO : densité minérale osseuse ; L1-L4 : rachis lombaire ; HT : hanche totale, CF : col fémoral ; CSA : surface de la section transversale, CSMI : moment d'inertie de la surface transversale ; Z : module de section ; BR : buckling ratio ; SI : indice de résistance ; CSI : indice de résistance en compression ; BSI : indice de résistance en flexion ; ISI : indices de forces aux contraintes.

2. T-scores

2.1 T-scores de la DMO chez les hommes

Les valeurs de T-score sont significativement plus élevées chez les hommes pratiquant le handball par rapport aux hommes inactifs.

Tableau 17 : Valeurs de T-scores chez les hommes

Hommes	Joueurs de handball (n = 24)	Témoins (n = 20)	p
T-score L1-L4	2,70 ± 0,83	0,76 ± 0,84	<0,001
T-score col fémoral	1,97 ± 0,57	0,05 ± 0,53	<0,001

2.1 T-scores de la DMO chez les femmes

Les valeurs de T-score sont significativement plus élevées chez les femmes pratiquant le handball par rapport aux femmes inactives.

Tableau 18 : Valeurs de T-scores chez les femmes

Femmes	Joueurs de handball (n = 20)	Témoins (n = 18)	p
T-score L1-L4	0,98 ± 0,73	0,07 ± 0,46	<0,001
T-score col fémoral	1,00 ± 0,08	0,08 ± 0,24	<0,001

3. Z-scores

3.1 Z-scores de la DMO chez les hommes

Les valeurs de Z-score sont significativement plus élevées chez les hommes pratiquant le handball par rapport aux hommes inactifs ($2,52 \pm 0,79$ vs. $0,57 \pm 0,81$; $p < 0,001$ pour le rachis lombaire et $1,70 \pm 0,62$ vs. $-0,07 \pm 0,43$ pour le col fémoral).

3.2 Z-scores de la DMO chez les femmes

Les valeurs de Z-score sont significativement plus élevées chez les femmes pratiquant le handball par rapport aux femmes inactives ($0,89 \pm 0,72$ vs. $-0,02 \pm 0,40$; $p < 0,001$ pour le rachis lombaire et $0,88 \pm 0,49$ vs. $0,02 \pm 0,25$; $p < 0,001$ pour le col fémoral).

4. Niveaux d'activité physique

4.1 Niveaux d'activité physique chez les hommes

Le current BPAQ était significativement plus élevé chez les joueurs de handball par rapport aux hommes inactifs ($12,9 \pm 0,8$ vs. $1,8 \pm 0,5$; $p < 0,001$). Le niveau d'activité physique (h/sem) était nettement supérieur chez les joueurs de handball par rapport aux hommes inactifs ($p < 0,001$). Chez le groupe entier (n = 44), le current BPAQ était positivement corrélé à la DMO CE ($r = 0,65$; $p < 0,001$), à la DMO L1-L4 ($r = 0,72$; $p < 0,001$), à la DMO HT ($r = 0,82$; $p < 0,001$) et

à la DMO CF ($r = 0,81$; $p < 0,001$). Le volume hebdomadaire d'AP (h/sem) était positivement corrélé à la DMO CE ($r = 0,67$; $p < 0,001$), à la DMO L1-L4 ($r = 0,74$; $p < 0,001$), à la DMO HT ($r = 0,83$; $p < 0,001$) et à la DMO CF ($r = 0,81$; $p < 0,001$).

4.2 Niveaux d'activité physique chez les femmes

Le current BPAQ était significativement plus élevé chez les joueuses de handball par rapport aux femmes inactives ($9,9 \pm 0,6$ vs. $1,4 \pm 0,3$; $p < 0,001$). Le niveau d'activité physique (h/sem) était nettement supérieur chez les joueuses de handball par rapport aux femmes inactives ($p < 0,001$). Chez le groupe entier ($n = 38$), le current BPAQ était positivement corrélé à la DMO CE ($r = 0,45$; $p < 0,01$), à la DMO L1-L4 ($r = 0,62$; $p < 0,001$), à la DMO HT ($r = 0,72$; $p < 0,001$) et à la DMO CF ($r = 0,64$; $p < 0,001$). Le volume hebdomadaire d'AP (h/sem) était positivement corrélé à la DMO CE ($r = 0,39$; $p < 0,05$), à la DMO L1-L4 ($r = 0,52$; $p < 0,001$), à la DMO HT ($r = 0,61$; $p < 0,001$) et à la DMO CF ($r = 0,54$; $p < 0,001$).

4.3 Différences inter-sexes

Le current BPAQ était significativement supérieur chez les hommes pratiquant le handball que les femmes pratiquant le handball ($12,9 \pm 0,8$ vs. $9,9 \pm 0,6$; $p < 0,001$). Le volume hebdomadaire d'activité physique (h/sem) était nettement supérieur chez les femmes pratiquant le handball que les hommes pratiquant le handball ($22,8 \pm 3,6$ vs. $20,7 \pm 2,0$; $p < 0,05$). Les corrélations entre la masse maigre et les paramètres osseux étaient plus fortes chez le groupe d'hommes que celles chez le groupe de femmes. De même, les corrélations entre les niveaux d'activité physique (h/semaine et current BPAQ) et les paramètres osseux étaient plus fortes chez le groupe d'hommes que celles chez le groupe de femmes.

5. Synthèse

Globalement, les valeurs de DMO chez les joueurs de handball sont supérieures à la normale dans les deux sexes. De plus, les valeurs de d de Cohen indiquent qu'il y a un effet important de cette pratique sportive sur les valeurs de DMO dans les deux sexes. Enfin, les gains osseux chez

les hommes pratiquant le handball semblent être plus importants et plus généralisés que chez les femmes pratiquant cette activité. Les causes sous-jacentes restent à éclaircir et seront discutées dans la partie « discussion générale ».

Discussion générale

Cette thèse menée chez un groupe de jeunes adultes pratiquant le handball et de jeunes adultes inactifs montre principalement que la pratique du handball est associée à des valeurs plus élevées de DMO. Les différences entre les deux groupes au niveau de la DMO ont persisté après ajustement pour la masse maigre. Ces résultats suggèrent un lien de causalité entre la pratique du handball et l'augmentation de la DMO. Ces résultats sont cliniquement importants dans la mesure où ils renforcent le rôle de la pratique du handball dans la prévention primaire de l'ostéoporose. Ainsi, cette pratique devrait être recommandée et conseillée chez les enfants et les adolescents afin d'optimiser l'acquisition osseuse.

Cette thèse est basée sur deux études originales ; une première étude menée chez les jeunes hommes et une deuxième étude menée chez les jeunes femmes. Les deux études ont la même conception. Plusieurs paramètres osseux mesurés et/ou calculés à partir des scans densitométriques (CMO, DMO, indices géométriques du col fémoral et indices de résistance osseuse du col fémoral) ont été comparés entre joueurs de handball et sujets inactifs. Les deux études ont aussi inclus des mesures de plusieurs tests de performance physique et des apports nutritionnels en relation avec les paramètres osseux.

Chez les femmes, nous avons noté que les valeurs de CMO CE, DMO CE, DMO L1-L4, DMO HT, DMO CF, CSMI et Z étaient significativement supérieures chez celles pratiquant le handball par rapport à celles inactives. Nos résultats confirment ceux de plusieurs études transversales et longitudinales montrant l'impact de la pratique du handball sur les paramètres de santé osseuse (Fangudes et coll. 2022 ; Pereira et coll. 2021).

Les paramètres de performance physique, la CCJ et la CPJ étaient significativement supérieures chez les femmes pratiquant le handball par rapport aux femmes inactives. De même, la force maximale, la puissance maximale, la performance au sprint, la vitesse de tir et la vitesse maximale aérobie étaient significativement supérieures chez les joueuses de handball par rapport aux femmes inactives.

Les valeurs de BR, le temps assis et le pourcentage de masse grasse étaient significativement supérieures chez les femmes inactives par rapport aux femmes pratiquant le handball. Des

valeurs élevées de BR sont associées à une instabilité corticale et sont prédictives d'un risque élevé de fracture chez les personnes âgées (Zakhem et coll. 2020 ; Finianos et coll. 2021a ; El Hage et coll. 2014). L'âge, le poids, l'IMC, la masse grasse, la CSA, le SI, le CSI, le BSI et l'ISI n'étaient pas différents entre les deux groupes. La pratique du handball semble influencer plus la DMO que les indices de résistance osseuse du col fémoral ; l'analyse de la taille d'effet confirme ce constat.

Le poids était négativement corrélé aux valeurs de SI, CSI, BSI et ISI. L'IMC était négativement corrélé aux valeurs de SI, CSI, BSI et ISI mais positivement corrélé au CMO CE et à la DMO CE. La masse grasse était négativement corrélée aux valeurs de SI, CSI, BSI et ISI mais positivement corrélé au CMO CE. Le pourcentage de masse grasse était positivement corrélé au BR mais négativement corrélé au CSI et au SI. Nos résultats renforcent ceux de plusieurs études menées chez les jeunes adultes ayant démontré que les indices de surcharge pondérale sont négativement corrélés aux indices de résistance osseuse du col fémoral (El Hage et coll. 2014 ; Finianos et col. 2021b ; Kim et coll. 2017). L'excès de masse grasse peut négativement influencer les indices de résistance osseuse du col fémoral. Pour cette raison, la mise en œuvre de stratégies ayant pour objectif de réduire l'excès de masse grasse doit être envisagée pour prévenir les fractures ostéoporotiques plus tard dans la vie.

La masse maigre était positivement corrélée aux valeurs de CMO, de DMO et de Z mais négativement corrélée aux valeurs de BR. Ces résultats sont en accord avec ceux de plusieurs études ayant étudié les associations entre masse maigre et paramètres de santé osseuse chez les jeunes femmes (Khawaja et coll. 2019 ; Khawaja et coll. 2021). Le développement de la masse maigre semble ainsi être une stratégie importante dans la prévention de l'ostéoporose plus tard dans la vie. La pratique régulière de la musculation en est la solution idéale. La consommation calcique journalière et la consommation protéique journalière étaient positivement corrélées aux valeurs de CMO, de DMO mais négativement corrélées aux valeurs de BR. Ces résultats confirment l'importance des apports protéiques et calciques sur les paramètres de santé osseuse.

Nos résultats ont démontré que la force maximale en squat était positivement corrélée au CMO CE, à la DMO et au Z mais négativement corrélée au BR. Nos résultats confirment ceux d'études antécédentes ayant démontré de fortes corrélations entre la force maximale des membres inférieurs et la DMO chez les jeunes adultes et les personnes âgées (Nasr et coll. 2020 ; Finianos

et coll. 2021b). La force maximale en développé-couché était aussi positivement corrélée au CMO CE, aux valeurs de DMO, à la CSA et au Z mais négativement corrélée au BR. Ces résultats sont en accord avec ceux d'une étude menée chez des hommes cinquantenaires (Finianos et coll. 2021a). La force maximale des extenseurs du genou et la force maximale des fléchisseurs du genou étaient positivement corrélées aux valeurs de DMO et négativement corrélées au BR. Notre étude est parmi les rares études à retrouver de telles corrélations. Les détente horizontale et verticale étaient positivement corrélées à la DMO et au SI mais négativement au BR. Les tests de détente mettent en évidence les qualités de puissance musculaire relative au poids du corps. Ces résultats sont en accord avec ceux de plusieurs études menées chez les jeunes adultes (Berro et coll. 2019 ; Khawaja et coll. 2019 ; Khawaja et coll. 2021). Une étude menée chez des hommes cinquantenaires a également démontré des corrélations positives entre les qualités de détente et les paramètres de santé osseuse (Finianos et coll. 2021a). Ces résultats suggèrent qu'il faille augmenter la performance en détente afin de prévenir l'ostéoporose plus tard dans la vie. La durée du sprint était négativement corrélée aux valeurs de DMO. Une étude menée chez des hommes cinquantenaires a démontré des corrélations entre la performance au sprint et les paramètres de santé osseuse (Finianos et coll. 2021b). Cette étude a démontré que la performance au sprint était le meilleur déterminant des indices de résistance osseuse du col fémoral (Finianos et coll. 2021b). Des études longitudinales seront nécessaires afin de confirmer l'impact de l'entraînement en sprint sur les paramètres osseux. Notre étude a démontré des corrélations positives entre la puissance calculée par le test charge-vitesse et les paramètres osseux. De plus, la vitesse de tir était fortement corrélée à la plupart des paramètres osseux ; notre étude est la première à retrouver de telles corrélations. La vitesse de tir implique un travail explosif des chaînes musculaires et met en évidence la puissance musculaire de ces muscles. La vitesse maximale aérobie était positivement corrélée aux valeurs de DMO mais négativement corrélée au BR. Ces résultats mettent en évidence l'importance de la vitesse maximale aérobie pour la santé osseuse. Ainsi, le développement de la vitesse maximale aérobie semble être pertinent pour la prévention de l'ostéoporose plus tard dans la vie.

Enfin, notons qu'après ajustement pour la force maximale en soulevé de terre, les différences entre les deux groupes (femmes pratiquant le handball et femmes inactives) au niveau du CMO CE et de la DMO L1-L4 ont disparu alors que la DMO CE et la DMO de la hanche sont

devenues plus élevées chez les femmes inactives par rapport aux femmes pratiquant le handball. Ces résultats confirment le lien étroit entre la force maximale en soulevé de terre et la DMO chez les femmes.

Chez les hommes, le CMO CE, la DMO CE, la DMO L1-L4, la DMO HT, la DMO CF, la CSA, le CSMI, le Z, le CSI, le BSI et l'ISI étaient significativement supérieurs chez les joueurs de Handball par rapport aux sujets inactifs. Nous avons calculé la taille d'effet (*Cohens' d*) des indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI). La taille d'effet était supérieure à 1 pour ces trois indices osseux montrant un large effet de la pratique du handball sur ces paramètres osseux. A notre connaissance, notre étude est la première à comparer les indices de résistance osseuse du col fémoral des joueurs de handball par rapport aux sujets inactifs. Les différences en termes de pourcentage entre les deux groupes étaient de 21,3 % pour le CSI, 24,4 % pour le BSI et 19 % pour l'ISI (en faveur du groupe pratiquant le handball). Les valeurs de BR étaient significativement plus élevées chez les hommes inactifs par rapport aux joueurs de handball. Ces résultats suggèrent que la pratique du handball est associée à une meilleure stabilité corticale au niveau de la hanche.

Les qualités de force-vitesse, de sprint, de force maximale et d'endurance étaient plus élevées chez les joueurs de handball par rapport aux sujets inactifs. Ces résultats étaient attendus étant donné l'analyse physiologique de l'activité et les caractéristiques des joueurs de handball (Pereira et coll. 2021).

Les valeurs de force maximale des membres inférieurs et supérieurs étaient fortement corrélées à la plupart des paramètres osseux. Ces résultats renforcent les résultats d'études antécédentes montrant un lien étroit entre le niveau de force maximale et la DMO chez les jeunes adultes (El Hage et coll. 2014 ; Berro et coll. 2019). L'optimisation de la force maximale des membres inférieurs et supérieurs semble être pertinente pour la prévention de l'ostéoporose plus tard dans la vie.

Les détente horizontale et verticale ainsi que les qualités de vitesse et de tir étaient fortement corrélées à la plupart des paramètres osseux. Ces résultats suggèrent de fortes relations entre les qualités de force relative et les paramètres osseux. La puissance maximale évaluée par le test de charge-vitesse était positivement corrélée à la plupart des paramètres osseux. Ces résultats

confirment les résultats d'études antécédentes. L'optimisation des qualités de détente et de puissance semble être pertinente pour la prévention de l'ostéoporose plus tard dans la vie.

Après ajustement pour la masse maigre ou la force maximale en soulevé de terre, les valeurs de DMO sont restées significativement plus élevées chez les joueurs de handball par rapport aux sujets inactifs. Ces résultats suggèrent un lien de causalité entre la pratique du handball et les valeurs élevées de DMO.

Les différences au niveau des paramètres osseux entre joueurs de handball et sujets inactifs étaient plus importantes chez les hommes par rapport aux femmes. Les tailles d'effets mesurées (les valeurs de d de Cohen) dans les deux sexes étaient significativement plus élevées chez les hommes que chez les femmes montrant un effet plus important chez les hommes. Les indices de résistance osseuse du col fémoral étaient plus élevés chez les hommes pratiquant le handball par rapport aux hommes inactifs alors qu'il n'y avait pas de différences entre femmes pratiquant le handball et femmes inactives concernant ces indices. Nos résultats semblent cohérents dans la mesure où plusieurs études antécédentes ont signalé que la réponse ostéogénique à l'entraînement physique est plus importante chez les sujets masculins par rapport aux sujets féminins. Plusieurs hypothèses et mécanismes pouvant expliquer ces différences inter-sexes ont déjà été avancés et discutés (Weeks et coll. 2010). D'un point de vue purement biomécanique, les charges appliquées sur les sites osseux durant un entraînement en force sont beaucoup plus importantes chez les hommes par rapport aux femmes du fait d'une masse maigre et d'une force maximale beaucoup plus importantes alors que la DMO volumétrique n'est pas très différente entre les deux genres (Baker et coll. 2020). De même, les forces en compression, en flexion, en traction et torsion sont beaucoup plus importantes chez les hommes que chez les femmes lors des exercices de sprints, sauts et des changements de direction (Lang, 2011). Dans notre étude, les valeurs de c-BPAQ étaient plus élevées chez les hommes pratiquant le handball par rapport aux femmes pratiquant le handball justifiant ainsi les résultats obtenus.

Cette thèse présente plusieurs limites. En premier lieu, la nature transversale des études réalisées est une des limites méthodologiques car elle ne permet pas de confirmer un lien de causalité entre la pratique sportive et les valeurs de DMO ; cependant, des analyses de covariance ont été réalisées pour essayer de compléter l'analyse. En deuxième lieu, le nombre de sujets est relativement faible mais des tests de puissance statistiques ont été réalisés à priori afin de

déterminer le nombre de sujets nécessaire à inclure dans les études. En troisième lieu, le profil hormonal et le bilan lipidique sanguin des participants n'ont pas été contrôlés. En quatrième lieu, la DXA est la méthode de mesure de référence pour le diagnostic de l'ostéoporose mais elle est basée sur des mesures bidimensionnelles alors que la vraie nature de l'os est tridimensionnelle. Cette technique ne permet pas de faire la différence entre masse grasse viscérale et masse grasse sous-cutanée alors que ses deux masses ont des effets différents sur la masse osseuse. En cinquième lieu, le manque d'inclusion d'un groupe actif dans l'étude est une limite méthodologique. En sixième lieu, la DMO de l'avant-bras n'a pas été évaluée sachant que le handball peut avoir des effets sur la DMO de l'avant-bras. En dernier lieu, les questionnaires utilisés pour l'évaluation des apports protéiques et calciques sont semi-fréquentiels et peuvent seulement nous donner une idée globale sur ces apports à un instant donné. Malgré ces limites, cette thèse était la première à comparer les indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI) entre joueurs de handball et sujets inactifs ; le calcul de la taille d'effet a aussi été réalisé afin de caractériser la magnitude de la pratique du handball sur les paramètres osseux. Ce travail de recherche a aussi inclus plusieurs tests de performance physique évaluant les différentes qualités physiques. Ce travail de recherche de nature transversale est indispensable avant de mener des études longitudinales sur l'impact de l'entraînement en handball sur les paramètres osseux. **Ainsi, la pratique régulière du handball chez les enfants et les adolescents aide à optimiser l'acquisition de la masse osseuse.** Le volume et l'intensité des séances doivent être équivalents dans les deux sexes.

Conclusions et perspectives

Cette étude menée chez des jeunes adultes pratiquant le handball et des jeunes adultes inactifs montre principalement que :

- Le CMO CE, la DMO CE, la DMO lombaire, la DMO de la hanche totale, la DMO du col fémoral, la CSA, le CSMI, le Z, le CSI, le BSI et l'ISI sont significativement supérieurs chez les hommes pratiquant le handball par rapport aux hommes inactifs.
- Le CMO CE, la DMO CE, la DMO lombaire, la DMO de la hanche totale, la DMO du col fémoral, le CSMI et le Z sont significativement supérieurs chez les femmes pratiquant le handball par rapport aux femmes inactives.
- Les valeurs de BR sont significativement plus élevées chez les sujets inactifs que les sujets pratiquant le handball et ceci dans les deux sexes.
- Les mesures de force maximale sont positivement corrélées au CMO CE, à la DMO CE, à la DMO lombaire, à la DMO HT et la DMO du col fémoral dans les deux sexes.
- La puissance maximale des membres inférieurs et la vitesse de tir sont positivement corrélés au CMO CE, à la DMO CE, à la DMO lombaire, à la DMO HT et la DMO du col fémoral dans les deux sexes.
- La vitesse maximale aérobie est positivement corrélée à la DMO CE, à la DMO lombaire, à la DMO HT et la DMO du col fémoral dans les deux sexes.
- Les mesures de force maximale, la VMA, la performance au sprint, les performances en détente horizontale et verticale et la puissance maximale calculée par le test charge-vitesse sont positivement corrélées aux indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI) chez les hommes.
- La plupart des différences significatives concernant les valeurs de DMO entre joueurs de handball et sujets inactifs de sexe masculin a persisté après ajustement pour la masse maigre ou le niveau de force maximale. Chez les femmes, les différences entre les deux groupes concernant les valeurs de DMO ont disparu après ajustement pour la force maximale en soulevé de terre.

Ces résultats suggèrent que la pratique du handball ait une influence positive sur la masse osseuse, la densité minérale osseuse et la géométrie osseuse du col fémoral chez les jeunes

adultes. Cet effet était plus marqué chez les hommes par rapport aux femmes. La persistance des différences au niveau de la DMO entre joueurs de handball et sujets inactifs de sexe masculin après ajustement pour la masse maigre ou la force maximale suggère un lien de causalité entre la pratique de handball et les paramètres osseux. Ainsi, il apparaît que la pratique du handball durant l'adolescence joue un rôle préventif important contre l'ostéoporose et les fractures ostéoporotiques plus tard dans la vie.

Aux vues de nos résultats et des limites présentes dans cette thèse, il serait intéressant de proposer plusieurs perspectives de recherche. Dans un premier temps, il serait important d'explorer les effets d'un an d'entraînement en handball sur les paramètres de santé osseuse chez de jeunes adultes. Dans un deuxième temps, il serait raisonnable d'explorer les effets d'une intervention comparable chez des personnes âgées dont la DMO est relativement basse. Dans un troisième temps, il serait cohérent de comparer les paramètres de santé osseuse chez des sujets âgés de 50 ans ayant pratiqué le handball durant l'enfance et l'adolescence par rapport à des sujets de même âge mais inactifs ; le but de cette étude serait de vérifier si les bénéfices osseux chez les anciens joueurs de handball persistent après l'arrêt de la pratique sportive. Dans un quatrième temps, il serait cliniquement important de comparer les pentes des relations DMO/masse maigre dans plusieurs populations sportives et non sportives. Dans un dernier temps, il serait cliniquement important de rédiger des méta-analyses concernant l'impact de l'entraînement en handball sur les paramètres osseux chez les jeunes adultes et l'incidence de fractures ostéoporotiques chez les personnes âgées ayant pratiqué le handball durant leur enfance et adolescence.

Bibliographie

- Abdul Al, O., Zakhem, E., Zunquin, G., & El Hage, R. (2021). Relationships Between Relative Skeletal Muscle Mass Index and Composite Indices of Femoral Neck in a Group of Lebanese Postmenopausal Women. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 24(4), 663–665. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2021.07.009>
- Agostinete, R. R., Duarte, J. P., Valente-Dos-Santos, J., Coelho-E-Silva, M. J., Tavares, O. M., Conde, J. M., Fontes-Ribeiro, C. A., Condello, G., Capranica, L., Caires, S. U., & Fernandes, R. A. (2017). Bone tissue, blood lipids and inflammatory profiles in adolescent male athletes from sports contrasting in mechanical load. *PloS one*, 12(6), e0180357. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180357>
- Agostinete, R. R., Lynch, K. R., Gobbo, L. A., Lima, M. C., Ito, I. H., Luiz-de-Marco, R., Rodrigues-Junior, M. A., & Fernandes, R. A. (2016). Basketball Affects Bone Mineral Density Accrual in Boys More Than Swimming and Other Impact Sports: 9-mo Follow-Up. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 19(3), 375–381. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2016.04.006>
- Ahn, S. H., Kim, H., Kim, B. J., Lee, S. H., & Koh, J. M. (2016)b. Insulin resistance and composite indices of femoral neck strength in Asians: the fourth Korea National Health and Nutrition Examination Survey (KNHANES IV). *Clinical endocrinology*, 84(2), 185–193. <https://doi.org/10.1111/cen.12958>
- Ahn, S. H., Lee, S., Kim, H., Lee, S. H., Kim, B. J., & Koh, J. M. (2016)a. Higher serum ferritin level and lower femur neck strength in women at the stage of bone loss (≥ 45 years of age): The Fourth Korea National Health and Nutrition Examination Survey (KNHANES IV). *Endocrine research*, 41(4), 334–342. <https://doi.org/10.3109/07435800.2016.1155600>
- Alwan, A., El Khoury, C., Zouhal, H., Maalouf, G., Rizkallah, M., El Khoury, G., Zakhem, E., & El Hage, R. (2016). Vitamin D Level and Composite Indices of Femoral Neck Strength in a

Group of Young Lebanese Men. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 19(4), 492–493. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2016.07.005>

Amin S. (2010). Mechanical factors and bone health: effects of weightlessness and neurologic injury. *Current rheumatology reports*, 12(3), 170–176. <https://doi.org/10.1007/s11926-010-0096-z>

Armas, L. A., & Recker, R. R. (2012). Pathophysiology of osteoporosis: new mechanistic insights. *Endocrinology and metabolism clinics of North America*, 41(3), 475–486. <https://doi.org/10.1016/j.ecl.2012.04.006>

Aroori, S., & Spence, R. A. (2008). Carpal tunnel syndrome. *The Ulster medical journal*, 77(1), 6–17.

Aspray, T. J., & Hill, T. R. (2019). Osteoporosis and the Ageing Skeleton. *Sub-cellular biochemistry*, 91, 453–476. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3681-2_16

Augat, P., Simon, U., Liedert, A., & Claes, L. (2005). Mechanics and mechano-biology of fracture healing in normal and osteoporotic bone. *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, 16 Suppl 2, S36–S43. <https://doi.org/10.1007/s00198-004-1728-9>

Ayoub, M. L., Maalouf, G., Bachour, F., Barakat, A., Cortet, B., Legroux-Gérot, I., Zunquin, G., Theunynck, D., Nehme, A., & El Hage, R. (2014). DXA-based variables and osteoporotic fractures in Lebanese postmenopausal women. *Orthopaedics & traumatology, surgery & research : OTSR*, 100(8), 855–858. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2014.06.023>

Baccaro, L. F., Conde, D. M., Costa-Paiva, L., & Pinto-Neto, A. M. (2015). The epidemiology and management of postmenopausal osteoporosis: a viewpoint from Brazil. *Clinical interventions in aging*, 10, 583–591. <https://doi.org/10.2147/CIA.S54614>

Bagur-Calafat, C., Farrerons-Minguella, J., Girabent-Farrés, M., & Serra-Grima, J. R. (2015). The impact of high level basketball competition, calcium intake, menses, and hormone levels in

adolescent bone density: a three-year follow-up. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 55(1-2), 58–67.

Bailey, C. A., & Brooke-Wavell, K. (2008). Exercise for optimising peak bone mass in women. *The Proceedings of the Nutrition Society*, 67(1), 9–18. <https://doi.org/10.1017/S0029665108005971>

Baker, B. S., Chen, Z., Larson, R. D., Bemben, M. G., & Bemben, D. A. (2020). Sex differences in bone density, geometry, and bone strength of competitive soccer players. *Journal of musculoskeletal & neuronal interactions*, 20(1), 62–76.

Baker, B. S., Li, J., & Leary, E. V. (2021). DXA²: An Automated Program for Extraction of Dual-Energy X-Ray Absorptiometry Data. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 24(4), 658–662. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2021.02.002>

Bareither, M. L., Troy, K. L., & Grabiner, M. D. (2006). Bone mineral density of the proximal femur is not related to dynamic joint loading during locomotion in young women. *Bone*, 38(1), 125–129. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2005.07.003>

Barr, R. J., Stewart, A., Torgerson, D. J., & Reid, D. M. (2010). Population screening for osteoporosis risk: a randomised control trial of medication use and fracture risk. *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, 21(4), 561–568. <https://doi.org/10.1007/s00198-009-1007-x>

Bazzocchi, A., Ponti, F., Albisinni, U., Battista, G., & Guglielmi, G. (2016). DXA: Technical aspects and application. *European journal of radiology*, 85(8), 1481–1492. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2016.04.004>

Becker, D. M., Tafoya, C. A., Becker, S. L., Kruger, G. H., Tafoya, M. J., & Becker, T. K. (2016). The use of portable ultrasound devices in low- and middle-income countries: a systematic review of the literature. *Tropical medicine & international health : TM & IH*, 21(3), 294–311. <https://doi.org/10.1111/tmi.12657>

- Berro, A. J., Alwan, A., Zouhal, H., Maalouf, G., Rizkallah, M., & El Hage, R. (2018). Vitamin D Level and Composite Indices of Femoral Neck Strength in a Group of Young Lebanese Women. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 21(2), 308–309. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2016.09.003>
- Bhatia, V. A., Edwards, W. B., & Troy, K. L. (2014). Predicting surface strains at the human distal radius during an in vivo loading task--finite element model validation and application. *Journal of biomechanics*, 47(11), 2759–2765. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.04.050>
- Blake, G. M., & Fogelman, I. (2007). The role of DXA bone density scans in the diagnosis and treatment of osteoporosis. *Postgraduate medical journal*, 83(982), 509–517. <https://doi.org/10.1136/pgmj.2007.057505>
- Bolam, K. A., van Uffelen, J. G., & Taaffe, D. R. (2013). The effect of physical exercise on bone density in middle-aged and older men: a systematic review. *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, 24(11), 2749–2762. <https://doi.org/10.1007/s00198-013-2346-1>
- Bonjour J. P. (2011). Protein intake and bone health. *International journal for vitamin and nutrition research. Internationale Zeitschrift für Vitamin- und Ernährungsforschung. Journal international de vitaminologie et de nutrition*, 81(2-3), 134–142. <https://doi.org/10.1024/0300-9831/a000063>
- Bonjour, J. P., Theintz, G., Law, F., Slosman, D., & Rizzoli, R. (1994). Peak bone mass. *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, 4 Suppl 1, 7–13. <https://doi.org/10.1007/BF01623429>
- Boshnjaku, A., Dimauro, I., Krasniqi, E., Grazioli, E., Tschan, H., Migliaccio, S., DI Luigi, L., & Caporossi, D. (2016). Effect of sport training on forearm bone sites in female handball and soccer players. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 56(12), 1503–1510.

Bousson, V., Bergot, C., Sutter, B., Thomas, T., Bendavid, S., Benhamou, C. L., Blain, H., Brazier, M., Breuil, V., Briot, K., Chapurlat, R., Chapuis, L., Cohen Solal, M., Fardellone, P., Feron, J. M., Gauvain, J. B., Laroche, M., Legrand, E., Lespessailles, E., Linglart, A., ... Groupe de Recherche et d'Information sur les Ostéoporoses (GRIO) (2015). Trabecular Bone Score: Where are we now?. *Joint bone spine*, 82(5), 320–325. <https://doi.org/10.1016/j.jbspin.2015.02.005>

Bragazzi, N. L., Rouissi, M., Hermassi, S., & Chamari, K. (2020). Resistance Training and Handball Players' Isokinetic, Isometric and Maximal Strength, Muscle Power and Throwing Ball Velocity: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International journal of environmental research and public health*, 17(8), 2663. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082663>

Budhia, S., Mikiyas, Y., Tang, M., & Badamgarav, E. (2012). Osteoporotic fractures: a systematic review of U.S. healthcare costs and resource utilization. *PharmacoEconomics*, 30(2), 147–170. <https://doi.org/10.2165/11596880-000000000-00000>

Calbet, J. A., Dorado, C., Díaz-Herrera, P., & Rodríguez-Rodríguez, L. P. (2001). High femoral bone mineral content and density in male football (soccer) players. *Medicine and science in sports and exercise*, 33(10), 1682–1687. <https://doi.org/10.1097/00005768-200110000-00011>

Cannarella, R., Barbagallo, F., Condorelli, R. A., Aversa, A., La Vignera, S., & Calogero, A. E. (2019). Osteoporosis from an Endocrine Perspective: The Role of Hormonal Changes in the Elderly. *Journal of clinical medicine*, 8(10), 1564. <https://doi.org/10.3390/jcm8101564>

Carbuhn, A. F., Fernandez, T. E., Bragg, A. F., Green, J. S., & Crouse, S. F. (2010). Sport and training influence bone and body composition in women collegiate athletes. *Journal of strength and conditioning research*, 24(7), 1710–1717. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181d09eb3>

Cauley J. A. (2015). Estrogen and bone health in men and women. *Steroids*, 99(Pt A), 11–15. <https://doi.org/10.1016/j.steroids.2014.12.010>

Chow, T. H., Lee, B. Y., Ang, A., Cheung, V., Ho, M., & Takemura, S. (2017). The effect of Chinese martial arts Tai Chi Chuan on prevention of osteoporosis: A systematic review. *Journal of orthopaedic translation*, 12, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2017.06.001>

- Clemente, F. M., Ramirez-Campillo, R., Sarmiento, H., Castillo, D., Raya-González, J., Rosemann, T., & Knechtle, B. (2021). Effects of Recreational Small-Sided Soccer Games on Bone Mineral Density in Untrained Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Healthcare (Basel, Switzerland)*, 9(4), 457. <https://doi.org/10.3390/healthcare9040457>
- Cole, J. H., & van der Meulen, M. C. (2011). Whole bone mechanics and bone quality. *Clinical orthopaedics and related research*, 469(8), 2139–2149. <https://doi.org/10.1007/s11999-011-1784-3>
- Cooper, C., & Aihie, A. (1995). Osteoporosis. *Bailliere's clinical rheumatology*, 9(3), 555–564. [https://doi.org/10.1016/s0950-3579\(05\)80258-4](https://doi.org/10.1016/s0950-3579(05)80258-4)
- Cosman, F., Nieves, J. W., & Dempster, D. W. (2017). Treatment Sequence Matters: Anabolic and Antiresorptive Therapy for Osteoporosis. *Journal of bone and mineral research : the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research*, 32(2), 198–202. <https://doi.org/10.1002/jbmr.3051>
- Coughlan, T., & Dockery, F. (2014). Osteoporosis and fracture risk in older people. *Clinical medicine (London, England)*, 14(2), 187–191. <https://doi.org/10.7861/clinmedicine.14-2-187>
- Cumming R. G. (1998). Epidemiology of medication-related falls and fractures in the elderly. *Drugs & aging*, 12(1), 43–53. <https://doi.org/10.2165/00002512-199812010-00005>
- Daly R. M. (2017). Exercise and nutritional approaches to prevent frail bones, falls and fractures: an update. *Climacteric : the journal of the International Menopause Society*, 20(2), 119–124. <https://doi.org/10.1080/13697137.2017.1286890>
- de Jong, M. R., Van der Elst, M., & Hartholt, K. A. (2013). Drug-related falls in older patients: implicated drugs, consequences, and possible prevention strategies. *Therapeutic advances in drug safety*, 4(4), 147–154. <https://doi.org/10.1177/2042098613486829>
- Denova-Gutiérrez, E., Rivera-Paredes, B., Velázquez-Cruz, R., Muñoz-Aguirre, P., Ramírez-Palacios, P., Clark, P., Ferretti, J. L., Salmerón, J., & Cointry, G. R. (2021). Relationship between physical activity, lean body mass, and bone mass in the Mexican adult population. *Archives of osteoporosis*, 16(1), 94. <https://doi.org/10.1007/s11657-021-00936-3>

- Dobbs, M. B., Buckwalter, J., & Saltzman, C. (1999). Osteoporosis: the increasing role of the orthopaedist. *The Iowa orthopaedic journal*, 19, 43–52.
- Dontas, I. A., & Yiannakopoulos, C. K. (2007). Risk factors and prevention of osteoporosis-related fractures. *Journal of musculoskeletal & neuronal interactions*, 7(3), 268–272.
- Dvornik, J., Jaguljnjak Lazarevic, A., Lazarevic, D., & Uros, M. (2020). Exact arithmetic as a tool for convergence assessment of the IRM-CG method. *Heliyon*, 6(1), e03225. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03225>
- Egan, E., Reilly, T., Giacomoni, M., Redmond, L., & Turner, C. (2006). Bone mineral density among female sports participants. *Bone*, 38(2), 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2005.08.024>
- El Hage R. (2014). Composite indices of femoral neck strength in adult female soccer players. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 17(1), 212–213. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2013.03.006>
- El Khoury, C., Pinti, A., Lespessailles, E., Maalouf, G., Watelain, E., El Khoury, G., Berro, A. J., Ayoub, M. L., Toumi, H., & El Hage, R. (2018). Physical Performance Variables and Bone Mineral Density in a Group of Young Overweight and Obese Men. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 21(1), 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2016.07.004>
- El Khoury, C., Toumi, H., Lespessailles, E., Pinti, A., El Khoury, G., Maalouf, G., Zakhem, E., Ayoub, M. L., Watelain, E., & El Hage, R. (2017). Decreased Composite Indices of Femoral Neck Strength in Young Obese Men. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 20(2), 268–270. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2016.03.013>
- Elloumi, M., Ben Ounis, O., Courteix, D., Makni, E., Sellami, S., Tabka, Z., & Lac, G. (2009). Long-term rugby practice enhances bone mass and metabolism in relation with physical fitness and playing position. *Journal of bone and mineral metabolism*, 27(6), 713–720. <https://doi.org/10.1007/s00774-009-0086-2>

- Elloumi, M., Courteix, D., Sellami, S., Tabka, Z., & Lac, G. (2006). Bone mineral content and density of Tunisian male rugby players: differences between forwards and backs. *International journal of sports medicine*, 27(5), 351–358. <https://doi.org/10.1055/s-2005-865742>
- Fagundes, U., Vancini, R. L., Seffrin, A., de Almeida, A. A., Nikolaidis, P. T., Rosemann, T., Knechtle, B., Andrade, M. S., & de Lira, C. (2022). Adolescent female handball players present greater bone mass content than soccer players: A cross-sectional study. *Bone*, 154, 116217. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2021.116217>
- Finianos, B., Sabbagh, P., Zunquin, G., & El Hage, R. (2021)b. Relationships between sprinting performance and composite indices of femoral neck strength in a group of young adults. *Science & Sports*, 36(4), 325-326.
- Finianos, B., Zunquin, G., & El Hage, R. (2021)a. Composite Indices of Femoral Neck Strength in Middle-Aged Inactive Subjects Vs Former Football Players. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 24(2), 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2020.06.002>
- Földhazy, Z., Arndt, A., Milgrom, C., Finestone, A., & Ekenman, I. (2005). Exercise-induced strain and strain rate in the distal radius. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 87(2), 261–266. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.87b2.14857>
- Forwood M. R. (2001). Mechanical effects on the skeleton: are there clinical implications?. *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, 12(1), 77–83. <https://doi.org/10.1007/s001980170161>
- Forwood, M. R., & Turner, C. H. (1995). Skeletal adaptations to mechanical usage: results from tibial loading studies in rats. *Bone*, 17(4 Suppl), 197S–205S. [https://doi.org/10.1016/8756-3282\(95\)00292-1](https://doi.org/10.1016/8756-3282(95)00292-1)
- Fristrup, B., Krstrup, P., Andersen, J. L., Hornstrup, T., Løwenstein, F. T., Larsen, M. A., Helge, J. W., Póvoas, S., & Aagaard, P. (2020). Effects of small-sided recreational team handball training on mechanical muscle function, body composition and bone mineralization in untrained

young adults-A randomized controlled trial. *PloS one*, 15(11), e0241359. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241359>

Frost H. M. (2003). Bone's mechanostat: a 2003 update. *The anatomical record. Part A, Discoveries in molecular, cellular, and evolutionary biology*, 275(2), 1081–1101. <https://doi.org/10.1002/ar.a.10119>

Georgeson, E. C., Weeks, B. K., McLellan, C., & Beck, B. R. (2012). Seasonal change in bone, muscle and fat in professional rugby league players and its relationship to injury: a cohort study. *BMJ open*, 2(6), e001400. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2012-001400>

Gharbi, Z., Dardouri, W., Haj-Sassi, R., Chamari, K., & Souissi, N. (2015). Aerobic and anaerobic determinants of repeated sprint ability in team sports athletes. *Biology of sport*, 32(3), 207–212. <https://doi.org/10.5604/20831862.1150302>

Gijon-Nogueron, G., Diaz-Miguel, S., Lopezosa-Reca, E., & Cervera-Marin, J. A. (2017). Structural Changes in the Lower Extremities in Boys Aged 7 to 12 Years Who Engage in Moderate Physical Activity An Observational Longitudinal Study. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 107(3), 215–222. <https://doi.org/10.7547/15-193>

Gomes Coqueiro, F., Rocha, R., Menezes, C. A., Brasil Lopes, M., Rosa Oliveira, V., Fortes, F., & Santana, G. O. (2018). What nutritional factors influence bone mineral density in Crohn's disease patients?. *Intestinal research*, 16(3), 436–444. <https://doi.org/10.5217/ir.2018.16.3.436>

Gómez-Bruton, A., González-Agüero, A., Gómez-Cabello, A., Casajús, J. A., & Vicente-Rodríguez, G. (2013). Is bone tissue really affected by swimming? A systematic review. *PloS one*, 8(8), e70119. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070119>

Gómez-Cabello, A., Ara, I., González-Agüero, A., Casajús, J. A., & Vicente-Rodríguez, G. (2012). Effects of training on bone mass in older adults: a systematic review. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 42(4), 301–325. <https://doi.org/10.2165/11597670-000000000-00000>

Gomez-Campos, R., Santi-Maria, T., Arruda, M., Maldonado, T., Albernaz, A., Schiavo, M., & Cossio-Bolaños, M. (2019). Fat-Free Mass and Bone Mineral Density of Young Soccer Players:

Proposal of Equations Based on Anthropometric Variables. *Frontiers in psychology*, 10, 522. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00522>

Gong, H., & Sang, Z. C. (2013). *Zhongguo gu shang* = *China journal of orthopaedics and traumatology*, 26(2), 171–174.

Granados, C., Izquierdo, M., Ibañez, J., Bonnabau, H., & Gorostiaga, E. M. (2007). Differences in physical fitness and throwing velocity among elite and amateur female handball players. *International journal of sports medicine*, 28(10), 860–867. <https://doi.org/10.1055/s-2007-964989>

Guss, C. E., McAllister, A., & Gordon, C. M. (2021). DXA in Children and Adolescents. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 24(1), 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2020.01.006>

Hagman, M., Helge, E. W., Frstrup, B., Jørgensen, N. R., Helge, J. W., & Krstrup, P. (2021). High bone mineral density in lifelong trained female team handball players and young elite football players. *European journal of applied physiology*, 121(10), 2825–2836. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04755-9>

Hagman, M., Helge, E. W., Hornstrup, T., Frstrup, B., Nielsen, J. J., Jørgensen, N. R., Andersen, J. L., Helge, J. W., & Krstrup, P. (2018). Bone mineral density in lifelong trained male football players compared with young and elderly untrained men. *Journal of sport and health science*, 7(2), 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2017.09.009>

Hammami, A., Chamari, K., Slimani, M., Shephard, R. J., Yousfi, N., Tabka, Z., & Bouhlel, E. (2016). Effects of recreational soccer on physical fitness and health indices in sedentary healthy and unhealthy subjects. *Biology of sport*, 33(2), 127–137. <https://doi.org/10.5604/20831862.1198209>

Hart, N. H., Nimphius, S., Rantalainen, T., Ireland, A., Siafarikas, A., & Newton, R. U. (2017). Mechanical basis of bone strength: influence of bone material, bone structure and muscle action. *Journal of musculoskeletal & neuronal interactions*, 17(3), 114–139.

- Helmstädter, M., Höhne, M., & Huber, T. B. (2014). A brief overview on IRM function across evolution. *Journal of neurogenetics*, 28(3-4), 264–269. <https://doi.org/10.3109/01677063.2014.918976>
- Henriques-Neto, D., Magalhães, J. P., Hetherington-Rauth, M., Santos, D. A., Baptista, F., & Sardinha, L. B. (2020). Physical Fitness and Bone Health in Young Athletes and Nonathletes. *Sports health*, 12(5), 441–448. <https://doi.org/10.1177/1941738120931755>
- Hertz, K., & Santy-Tomlinson, J. (2018). Fragility Fracture nursing: holistic care and management of the orthogeriatric patient.
- Hind, K., Gannon, L., Brightmore, A., & Beck, B. (2015). Insights into relationships between body mass, composition and bone: findings in elite rugby players. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 18(2), 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2014.11.002>
- Hingorjo, M. R., Zehra, S., Saleem, S., & Qureshi, M. A. (2018). Serum Interleukin-15 and its relationship with adiposity Indices before and after short-term endurance exercise. *Pakistan journal of medical sciences*, 34(5), 1125–1131. <https://doi.org/10.12669/pjms.345.15516>
- Hong, A. R., & Kim, S. W. (2018). Effects of Resistance Exercise on Bone Health. *Endocrinology and metabolism (Seoul, Korea)*, 33(4), 435–444. <https://doi.org/10.3803/EnM.2018.33.4.435>
- Hopewell, S., Adedire, O., Copsey, B. J., Boniface, G. J., Sherrington, C., Clemson, L., Close, J. C., & Lamb, S. E. (2018). Multifactorial and multiple component interventions for preventing falls in older people living in the community. *The Cochrane database of systematic reviews*, 7(7), CD012221. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD012221.pub2>
- Hornstrup, T., Løwenstein, F. T., Larsen, M. A., Helge, E. W., Póvoas, S., Helge, J. W., Nielsen, J. J., Frstrup, B., Andersen, J. L., Gliemann, L., Nybo, L., & Krstrup, P. (2019). Correction to: Cardiovascular, muscular, and skeletal adaptations to recreational team handball training: a randomized controlled trial with young adult untrained men. *European journal of applied physiology*, 119(2), 575–576. <https://doi.org/10.1007/s00421-018-4050-5>

Hornstrup, T., Wikman, J. M., Fristrup, B., Póvoas, S., Helge, E. W., Nielsen, S. H., Helge, J. W., Andersen, J. L., Nybo, L., & Krstrup, P. (2018). Fitness and health benefits of team handball training for young untrained women-A cross-disciplinary RCT on physiological adaptations and motivational aspects. *Journal of sport and health science*, 7(2), 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2017.09.007>

Howe, T. E., Shea, B., Dawson, L. J., Downie, F., Murray, A., Ross, C., Harbour, R. T., Caldwell, L. M., & Creed, G. (2011). Exercise for preventing and treating osteoporosis in postmenopausal women. *The Cochrane database of systematic reviews*, (7), CD000333. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD000333.pub2>

Huidrom, S., Beg, M. A., & Masood, T. (2021). Post-menopausal Osteoporosis and Probiotics. *Current drug targets*, 22(7), 816–822. <https://doi.org/10.2174/1389450121666201027124947>

Ireland, A., Mittag, U., Degens, H., Felsenberg, D., Ferretti, J. L., Heinonen, A., Koltai, E., Korhonen, M. T., McPhee, J. S., Mekjavic, I., Piasecki, J., Pisot, R., Radak, Z., Simunic, B., Suominen, H., Wilks, D. C., Winwood, K., & Rittweger, J. (2020). Greater maintenance of bone mineral content in male than female athletes and in sprinting and jumping than endurance athletes: a longitudinal study of bone strength in elite masters athletes. *Archives of osteoporosis*, 15(1), 87. <https://doi.org/10.1007/s11657-020-00757-w>

Ishii, S., Cauley, J. A., Crandall, C. J., Srikanthan, P., Greendale, G. A., Huang, M. H., Danielson, M. E., & Karlamangla, A. S. (2012). Diabetes and femoral neck strength: findings from the Hip Strength Across the Menopausal Transition Study. *The Journal of clinical endocrinology and metabolism*, 97(1), 190–197. <https://doi.org/10.1210/jc.2011-1883>

Ishii, S., Cauley, J. A., Greendale, G. A., Crandall, C. J., Danielson, M. E., Ouchi, Y., & Karlamangla, A. S. (2013). C-reactive protein, bone strength, and nine-year fracture risk: data from the Study of Women's Health Across the Nation (SWAN). *Journal of bone and mineral research : the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research*, 28(7), 1688–1698. <https://doi.org/10.1002/jbmr.1915>

- Jeon, M. Y., Jeong, H., Petrofsky, J., Lee, H., & Yim, J. (2014). Effects of a randomized controlled recurrent fall prevention program on risk factors for falls in frail elderly living at home in rural communities. *Medical science monitor : international medical journal of experimental and clinical research*, 20, 2283–2291. <https://doi.org/10.12659/MSM.890611>
- Johnston, C. B., & Dagar, M. (2020). Osteoporosis in Older Adults. *The Medical clinics of North America*, 104(5), 873–884. <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2020.06.004>
- Jones, B., Till, K., Roe, G., O'Hara, J., Lees, M., Barlow, M. J., & Hind, K. (2018). Six-year body composition change in male elite senior rugby league players. *Journal of sports sciences*, 36(3), 266–271. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1300313>
- Jung, M., Ahn, S. H., Seo, S., Cho, Y., Seo, D. H., Kim, S. H., & Hong, S. (2022). Relationships Between Pulmonary Function and Composite Indices of Femoral Neck Strength in Korean Men (KNHANES IV). *Journal of Korean medical science*, 37(8), e66. <https://doi.org/10.3346/jkms.2022.37.e66>
- Karlamangla, A. S., Barrett-Connor, E., Young, J., & Greendale, G. A. (2004). Hip fracture risk assessment using composite indices of femoral neck strength: the Rancho Bernardo study. *Osteoporosis international*, 15(1), 62-70.
- Karlamangla, A. S., Mori, T., Merkin, S. S., Seeman, T. E., Greendale, G. A., Binkley, N., & Crandall, C. J. (2013). Childhood socioeconomic status and adult femoral neck bone strength: findings from the Midlife in the United States Study. *Bone*, 56(2), 320–326. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2013.06.021>
- Karpouzou, A., Diamantis, E., Farmaki, P., Savvanis, S., & Troupis, T. (2017). Nutritional Aspects of Bone Health and Fracture Healing. *Journal of osteoporosis*, 2017, 4218472. <https://doi.org/10.1155/2017/4218472>
- Katsurada, T., Nishida, M., & Sakamoto, N. (2017). Imaging (X-ray - CT - MRI - ultrasound). *Nihon rinsho. Japanese journal of clinical medicine*, 75(3), 387–391.
- Katzman, W. B., Vittinghoff, E., Lin, F., Schafer, A., Long, R. K., Wong, S., Gladin, A., Fan, B., Allaire, B., Kado, D. M., & Lane, N. E. (2017). Targeted spine strengthening exercise and

posture training program to reduce hyperkyphosis in older adults: results from the study of hyperkyphosis, exercise, and function (SHEAF) randomized controlled trial. *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, 28(10), 2831–2841. <https://doi.org/10.1007/s00198-017-4109-x>

Kawalilak, C. E., Johnston, J. D., Olszynski, W. P., & Kontulainen, S. A. (2014). Characterizing microarchitectural changes at the distal radius and tibia in postmenopausal women using HR-pQCT. *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, 25(8), 2057–2066. <https://doi.org/10.1007/s00198-014-2719-0>

Kelley, G. A., Kelley, K. S., & Kohrt, W. M. (2012). Effects of ground and joint reaction force exercise on lumbar spine and femoral neck bone mineral density in postmenopausal women: a meta-analysis of randomized controlled trials. *BMC musculoskeletal disorders*, 13, 177. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-13-177>

Kelsey J. L. (1989). Risk factors for osteoporosis and associated fractures. *Public health reports (Washington, D.C. : 1974)*, 104 Suppl(Suppl), 14–20.

Kemerink, M., Dierichs, T. J., Dierichs, J., Huynen, H., Wildberger, J. E., van Engelshoven, J. M., & Kemerink, G. J. (2012). The application of x-rays in radiology: from difficult and dangerous to simple and safe. *AJR. American journal of roentgenology*, 198(4), 754–759. <https://doi.org/10.2214/AJR.11.7844>

Kemmler, W., von Stengel, S., Engelke, K., Häberle, L., & Kalender, W. A. (2010). Exercise effects on bone mineral density, falls, coronary risk factors, and health care costs in older women: the randomized controlled senior fitness and prevention (SEFIP) study. *Archives of internal medicine*, 170(2), 179–185. <https://doi.org/10.1001/archinternmed.2009.499>

Khawaja, A., Kamlé, P., Maliha, E., Maalouf, G., Toumi, H., Pinti, A., & El Hage, R. (2021, July). Relationships Between Vertical Jump and Composite Indices of Femoral Neck Strength in a Group of Young Women. In *International Conference on Bioengineering and Biomedical Signal and Image Processing* (pp. 27-38). Springer, Cham.

Kim D. (2017). The Role of Vitamin D in Thyroid Diseases. *International journal of molecular sciences*, 18(9), 1949. <https://doi.org/10.3390/ijms18091949>

Kim, B. J., Ahn, S. H., Kim, H. M., Lee, S. H., & Koh, J. M. (2015)a. Low skeletal muscle mass associates with low femoral neck strength, especially in older Korean women: the Fourth Korea National Health and Nutrition Examination Survey (KNHANES IV). *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, 26(2), 737–747. <https://doi.org/10.1007/s00198-014-2959-z>

Kim, H., Lee, S. H., Kim, B. J., & Koh, J. M. (2017). Association between obesity and femoral neck strength according to age, sex, and fat distribution. *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, 28(7), 2137–2146. <https://doi.org/10.1007/s00198-017-4015-2>

Kim, H., Lee, S. H., Kim, J., Lim, K. H., Ahn, S. H., Kim, B. J., & Koh, J. M. (2015)b. The Association of Vitamin D With Femoral Neck Strength: An Additional Evidence of Vitamin D on Bone Health. *The Journal of clinical endocrinology and metabolism*, 100(8), 3118–3125. <https://doi.org/10.1210/jc.2014-4320>

Kontulainen, S., Sievänen, H., Kannus, P., Pasanen, M., & Vuori, I. (2003). Effect of long-term impact-loading on mass, size, and estimated strength of humerus and radius of female racquet-sports players: a peripheral quantitative computed tomography study between young and old starters and controls. *Journal of bone and mineral research : the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research*, 18(2), 352–359. <https://doi.org/10.1359/jbmr.2003.18.2.352>

Krahenbühl, T., Barros-Filho, A. A., Barbeta, C., Guerra-Júnior, G., & Gonçalves, E. M. (2020). Geometric indices of femur bone strength in female handball players. *Women & health*, 60(10), 1118–1128. <https://doi.org/10.1080/03630242.2020.1802637>

Kroker, A., Zhu, Y., Manske, S. L., Barber, R., Mohtadi, N., & Boyd, S. K. (2017). Quantitative in vivo assessment of bone microarchitecture in the human knee using HR-pQCT. *Bone*, 97, 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2016.12.015>

Kulak, J., Jr, Fischer, C., Komm, B., & Taylor, H. S. (2011). Treatment with bazedoxifene, a selective estrogen receptor modulator, causes regression of endometriosis in a mouse model. *Endocrinology*, 152(8), 3226–3232. <https://doi.org/10.1210/en.2010-1010>

Lane N. E. (2006). Epidemiology, etiology, and diagnosis of osteoporosis. *American journal of obstetrics and gynecology*, 194(2 Suppl), S3–S11. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2005.08.047>

Lane N. E. (2006). Epidemiology, etiology, and diagnosis of osteoporosis. *American journal of obstetrics and gynecology*, 194(2 Suppl), S3–S11. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2005.08.047>

Lane, N. E., & Kelman, A. (2003). A review of anabolic therapies for osteoporosis. *Arthritis research & therapy*, 5(5), 214–222. <https://doi.org/10.1186/ar797>

Lang T. F. (2011). The bone-muscle relationship in men and women. *Journal of osteoporosis*, 2011, 702735. <https://doi.org/10.4061/2011/702735>

Lecart, M. P., Bruyere, O., & Reginster, J. Y. (2004). Combination/sequential therapy in osteoporosis. *Current osteoporosis reports*, 2(4), 123–130. <https://doi.org/10.1007/s11914-996-0011-8>

Lee, D. C., Hoffmann, P. F., Kopperdahl, D. L., & Keaveny, T. M. (2017). Phantomless calibration of CT scans for measurement of BMD and bone strength-Inter-operator reanalysis precision. *Bone*, 103, 325–333. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2017.07.029>

Lee, D. C., Varela, A., Kostenuik, P. J., Ominsky, M. S., & Keaveny, T. M. (2016). Finite Element Analysis of Denosumab Treatment Effects on Vertebral Strength in Ovariectomized Cynomolgus Monkeys. *Journal of bone and mineral research : the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research*, 31(8), 1586–1595. <https://doi.org/10.1002/jbmr.2830>

Lees, M. J., Oldroyd, B., Jones, B., Brightmore, A., O'Hara, J. P., Barlow, M. J., Till, K., & Hind, K. (2017). Three-Compartment Body Composition Changes in Professional Rugby Union

Players Over One Competitive Season: A Team and Individualized Approach. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 20(1), 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2016.04.010>

Lewiecki E. M. (2010). Bisphosphonates for the treatment of osteoporosis: insights for clinicians. *Therapeutic advances in chronic disease*, 1(3), 115–128. <https://doi.org/10.1177/2040622310374783>

Li, G. W., Chang, S. X., Xu, Z., Chen, Y., Bao, H., & Shi, X. (2013). Prediction of hip osteoporotic fractures from composite indices of femoral neck strength. *Skeletal radiology*, 42(2), 195–201. <https://doi.org/10.1007/s00256-012-1473-7>

Lozano-Berges, G., Matute-Llorente, Á., Gómez-Bruton, A., González-Agüero, A., Vicente-Rodríguez, G., & Casajús, J. A. (2019). Is Playing Soccer More Osteogenic for Females Before the Pubertal Spurt?. *Journal of human kinetics*, 67, 153–161. <https://doi.org/10.2478/hukin-2018-0074>

Lozano-Berges, G., Matute-Llorente, Á., González-Agüero, A., Gómez-Bruton, A., Gómez-Cabello, A., Vicente-Rodríguez, G., & Casajús, J. A. (2018). Soccer helps build strong bones during growth: a systematic review and meta-analysis. *European journal of pediatrics*, 177(3), 295–310. <https://doi.org/10.1007/s00431-017-3060-3>

Lucaci, C., & Acalovschi, M. (2012). Hormonal and cytokine implications in the pathophysiology of osteoporosis occurring in chronic liver diseases. *Maedica*, 7(4), 358–363.

Ma, D., Wu, L., & He, Z. (2013). Effects of walking on the preservation of bone mineral density in perimenopausal and postmenopausal women: a systematic review and meta-analysis. *Menopause (New York, N.Y.)*, 20(11), 1216–1226. <https://doi.org/10.1097/GME.0000000000000100>

Maataoui, A. E., Benghabrite, A., Maghraoui, A. E., Chabraoui, L., & Ouzzif, Z. (2015). Relationship between sex hormone levels, bone mineral density and bone turnover markers in healthy moroccan men: a cross-sectional study. *The Pan African medical journal*, 22, 206. <https://doi.org/10.11604/pamj.2015.22.206.6066>

Macdonald, H. M., Nishiyama, K. K., Kang, J., Hanley, D. A., & Boyd, S. K. (2011). Age-related patterns of trabecular and cortical bone loss differ between sexes and skeletal sites: a population-based HR-pQCT study. *Journal of bone and mineral research : the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research*, 26(1), 50–62. <https://doi.org/10.1002/jbmr.171>

Manchado, C., Tortosa-Martínez, J., Vila, H., Ferragut, C., & Platen, P. (2013). Performance factors in women's team handball: physical and physiological aspects--a review. *Journal of strength and conditioning research*, 27(6), 1708–1719. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182891535>

Mancuso, M. E., Johnson, J. E., Ahmed, S. S., Butler, T. A., & Troy, K. L. (2018). Distal radius microstructure and finite element bone strain are related to site-specific mechanical loading and areal bone mineral density in premenopausal women. *Bone reports*, 8, 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.bonr.2018.04.001>

Manske, S. L., Zhu, Y., Sandino, C., & Boyd, S. K. (2015). Human trabecular bone microarchitecture can be assessed independently of density with second generation HR-pQCT. *Bone*, 79, 213–221. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2015.06.006>

Marinho, B. C., Guerra, L. P., Drummond, J. B., Silva, B. C., & Soares, M. M. (2014). The burden of osteoporosis in Brazil. *Arquivos brasileiros de endocrinologia e metabologia*, 58(5), 434–443. <https://doi.org/10.1590/0004-2730000003203>

Marks R. (2010). Hip fracture epidemiological trends, outcomes, and risk factors, 1970-2009. *International journal of general medicine*, 3, 1–17.

Martínez-Rodríguez, A., Martínez-Olcina, M., Hernández-García, M., Rubio-Arias, J. Á., Sánchez-Sánchez, J., & Sánchez-Sáez, J. A. (2020). Body composition characteristics of handball players: Systematic review.

Martínez-Rodríguez, A., Sánchez-Sánchez, J., Vicente-Martínez, M., Martínez-Olcina, M., Miralles-Amorós, L., & Sánchez-Sáez, J. A. (2021). Anthropometric Dimensions and Bone Quality in International Male Beach Handball Players: Junior vs. Senior Comparison. *Nutrients*, 13(6), 1817. <https://doi.org/10.3390/nu13061817>

- Martyn-St James, M., & Carroll, S. (2010). Effects of different impact exercise modalities on bone mineral density in premenopausal women: a meta-analysis. *Journal of bone and mineral metabolism*, 28(3), 251–267. <https://doi.org/10.1007/s00774-009-0139-6>
- Maw, A. M., Galvin, B., Henri, R., Yao, M., Exame, B., Fleshner, M., Fort, M. P., & Morris, M. A. (2019). Stakeholder Perceptions of Point-of-Care Ultrasound Implementation in Resource-Limited Settings. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, 9(4), 153. <https://doi.org/10.3390/diagnostics9040153>
- Michalsik, L. B., & Aagaard, P. (2015). Physical demands in elite team handball: comparisons between male and female players. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 55(9), 878–891.
- Milgrom, C., Finestone, A., Simkin, A., Ekenman, I., Mendelson, S., Millgram, M., Nyska, M., Larsson, E., & Burr, D. (2000). In-vivo strain measurements to evaluate the strengthening potential of exercises on the tibial bone. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 82(4), 591–594. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.82b4.9677>
- Miller P. D. (2016). Management of severe osteoporosis. *Expert opinion on pharmacotherapy*, 17(4), 473–488. <https://doi.org/10.1517/14656566.2016.1124856>
- Miller P. D. (2016). Management of severe osteoporosis. *Expert opinion on pharmacotherapy*, 17(4), 473–488. <https://doi.org/10.1517/14656566.2016.1124856>
- Mohr, M., Helge, E. W., Petersen, L. F., Lindenskov, A., Weihe, P., Mortensen, J., Jørgensen, N. R., & Krstrup, P. (2015). Effects of soccer vs swim training on bone formation in sedentary middle-aged women. *European journal of applied physiology*, 115(12), 2671–2679. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3231-8>
- Morel, J., Combe, B., Francisco, J., & Bernard, J. (2001). Bone mineral density of 704 amateur sportsmen involved in different physical activities. *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, 12(2), 152–157. <https://doi.org/10.1007/s001980170148>

Mori, T., Ishii, S., Greendale, G. A., Cauley, J. A., Sternfeld, B., Crandall, C. J., Han, W., & Karlamangla, A. S. (2014). Physical activity as determinant of femoral neck strength relative to load in adult women: findings from the hip strength across the menopause transition study. *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, 25(1), 265–272. <https://doi.org/10.1007/s00198-013-2429-z>

Möricke, R., Rettig, K., & Bethke, T. D. (2011). Use of recombinant human parathyroid hormone(1-84) in patients with postmenopausal osteoporosis: a prospective, open-label, single-arm, multicentre, observational cohort study of the effects of treatment on quality of life and pain--the PROPOSE study. *Clinical drug investigation*, 31(2), 87–99. <https://doi.org/10.2165/11538880-000000000-00000>

Morin, R. L., Gerber, T. C., & McCollough, C. H. (2003). Radiation dose in computed tomography of the heart. *Circulation*, 107(6), 917–922. <https://doi.org/10.1161/01.cir.0000048965.56529.c2>

Morseth, B., Emaus, N., & Jørgensen, L. (2011). Physical activity and bone: The importance of the various mechanical stimuli for bone mineral density. A review. *Norsk epidemiologi*, 20(2).

Mrabet Bahri, D., Selmi, A., Abdelkéfi, M., Mbarek, M., Sahli, H., & Sellami, S. (2013). Etude de la densité minérale osseuse chez les adolescentes handballeuses: a propos d'une étude de 20 cas [Study of bone mineral density in adolescent handball players: a study of 20 cases]. *La Tunisie medicale*, 91(11), 633–637.

Muñoz-Garach, A., García-Fontana, B., & Muñoz-Torres, M. (2020). Nutrients and Dietary Patterns Related to Osteoporosis. *Nutrients*, 12(7), 1986. <https://doi.org/10.3390/nu12071986>

Nebigh, A., Rebai, H., Elloumi, M., Bahlous, A., Zouch, M., Zaouali, M., Alexandre, C., Sellami, S., & Tabka, Z. (2009). Bone mineral density of young boy soccer players at different pubertal stages: relationships with hormonal concentration. *Joint bone spine*, 76(1), 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.jbspin.2008.03.002>

Nelson, M. E., Rejeski, W. J., Blair, S. N., Duncan, P. W., Judge, J. O., King, A. C., Macera, C. A., Castaneda-Sceppa, C., American College of Sports Medicine, & American Heart Association

(2007). Physical activity and public health in older adults: recommendation from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. *Circulation*, 116(9), 1094–1105. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.107.185650>

Nevill, A. M., Holder, R. L., & Stewart, A. D. (2003). Modeling elite male athletes' peripheral bone mass, assessed using regional dual x-ray absorptiometry. *Bone*, 32(1), 62–68. [https://doi.org/10.1016/s8756-3282\(02\)00927-4](https://doi.org/10.1016/s8756-3282(02)00927-4)

Nevill, A., Holder, R., & Stewart, A. (2004). Do sporting activities convey benefits to bone mass throughout the skeleton?. *Journal of sports sciences*, 22(7), 645–650. <https://doi.org/10.1080/02640410310001655769>

Nichols, D. L., Sanborn, C. F., & Essery, E. V. (2007). Bone density and young athletic women. An update. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 37(11), 1001–1014. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737110-00006>

Nikander, R., Sievänen, H., Heinonen, A., Daly, R. M., Uusi-Rasi, K., & Kannus, P. (2010). Targeted exercise against osteoporosis: A systematic review and meta-analysis for optimising bone strength throughout life. *BMC medicine*, 8, 47. <https://doi.org/10.1186/1741-7015-8-47>

Noo, F., & Karellas, A. (2015). Introduction: Advances and trends in image formation in X-ray computed tomography. *Medical physics*, 42(5), 2656. <https://doi.org/10.1118/1.4918974>

Office of the Surgeon General (US). (2004). *Bone Health and Osteoporosis: A Report of the Surgeon General*. Office of the Surgeon General (US).

Ohlerth, S., & Scharf, G. (2007). Computed tomography in small animals--basic principles and state of the art applications. *Veterinary journal (London, England : 1997)*, 173(2), 254–271. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2005.12.014>

Osterhoff, G., Morgan, E. F., Shefelbine, S. J., Karim, L., McNamara, L. M., & Augat, P. (2016). Bone mechanical properties and changes with osteoporosis. *Injury*, 47 Suppl 2(Suppl 2), S11–S20. [https://doi.org/10.1016/S0020-1383\(16\)47003-8](https://doi.org/10.1016/S0020-1383(16)47003-8)

Palermo, A., Naciu, A. M., Tabacco, G., Falcone, S., Santonati, A., Maggi, D., D'Onofrio, L., Briganti, S. I., Castellitto, D., Casini, A., Pedone, C., Lelli, D., Fabbri, A., Bilezikian, J. P.,

- Napoli, N., Pozzilli, P., Manfrini, S., & Cesareo, R. (2020). Clinical, Biochemical, and Radiological Profile of Normocalcemic Primary Hyperparathyroidism. *The Journal of clinical endocrinology and metabolism*, 105(7), dgaa174. <https://doi.org/10.1210/clinem/dgaa174>
- Panula, J., Pihlajamäki, H., Mattila, V. M., Jaatinen, P., Vahlberg, T., Aarnio, P., & Kivelä, S. L. (2011). Mortality and cause of death in hip fracture patients aged 65 or older: a population-based study. *BMC musculoskeletal disorders*, 12, 105. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-12-105>
- Pereira, R., Krstrup, P., Castagna, C., Coelho, E., Santos, R., Helge, E. W., Jørgensen, N. R., Magalhães, J., & Póvoas, S. (2021). Effects of recreational team handball on bone health, postural balance and body composition in inactive postmenopausal women - A randomised controlled trial. *Bone*, 145, 115847. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2021.115847>
- Pfortmueller, C. A., Lindner, G., & Exadaktylos, A. K. (2014). Reducing fall risk in the elderly: risk factors and fall prevention, a systematic review. *Minerva medica*, 105(4), 275–281.
- Phelan, E. A., & Ritchey, K. (2018). Fall Prevention in Community-Dwelling Older Adults. *Annals of internal medicine*, 169(11), ITC81–ITC96. <https://doi.org/10.7326/AITC201812040>
- Porter, J. L., & Varacallo, M. Continuing Education Activity.
- Price, C. T., Langford, J. R., & Liporace, F. A. (2012). Essential Nutrients for Bone Health and a Review of their Availability in the Average North American Diet. *The open orthopaedics journal*, 6, 143–149. <https://doi.org/10.2174/1874325001206010143>
- Puchalski S. M. (2012). Advances in equine computed tomography and use of contrast media. *The Veterinary clinics of North America. Equine practice*, 28(3), 563–581. <https://doi.org/10.1016/j.cveq.2012.08.002>
- Qadir, A., Liang, S., Wu, Z., Chen, Z., Hu, L., & Qian, A. (2020). Senile Osteoporosis: The Involvement of Differentiation and Senescence of Bone Marrow Stromal Cells. *International journal of molecular sciences*, 21(1), 349. <https://doi.org/10.3390/ijms21010349>
- Ralston S. H. (1997). What determines peak bone mass and bone loss?. *Bailliere's clinical rheumatology*, 11(3), 479–494. [https://doi.org/10.1016/s0950-3579\(97\)80016-7](https://doi.org/10.1016/s0950-3579(97)80016-7)

- Ramírez-Pérez, E., Clark, P., Deleze, M., Cons-Molina, F., Morales-Torres, J., & Diez-García, P. (2014). Impact of osteoporosis-associated vertebral fractures on health-related quality of life in the Mexican population. *Revista de investigacion clinica; organo del Hospital de Enfermedades de la Nutricion*, 66(3), 225–233.
- Ray, N. F., Chan, J. K., Thamer, M., & Melton, L. J., 3rd (1997). Medical expenditures for the treatment of osteoporotic fractures in the United States in 1995: report from the National Osteoporosis Foundation. *Journal of bone and mineral research : the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research*, 12(1), 24–35. <https://doi.org/10.1359/jbmr.1997.12.1.24>
- Rebai, H., Zarrouk, N., Ghroubi, S., Sellami, M., Ayedi, F., Baklouti, S., ... & Elleuch, M. (2012). Long-term basketball playing enhances bone mass and isokinetic muscle strength. *Isokinetics and Exercise Science*, 20(3), 221-227.
- Reynolds, T. A., Amato, S., Kulola, I., Chen, C. J., Mfinanga, J., & Sawe, H. R. (2018). Impact of point-of-care ultrasound on clinical decision-making at an urban emergency department in Tanzania. *PloS one*, 13(4), e0194774. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194774>
- Rivero Marcotegui, A., Palacios Sarrasqueta, M., Grijalba Uche, A., Martinez Rodriguez, J. L., Sorbet Zubiria, M. J., & Garcia Merlo, S. (1997). Deoxipiridinolina y otros marcadores bioquímicos de reabsorcion osea en distintas patologias. *Revista clinica espanola*, 197(6), 389-392.
- Rizzoli R. (2014). Nutritional aspects of bone health. *Best practice & research. Clinical endocrinology & metabolism*, 28(6), 795–808. <https://doi.org/10.1016/j.beem.2014.08.003>
- Ruscello, B., Castagna, C., Carbonaro, R., Gabrielli, P. R., & D'Ottavio, S. (2021). Fitness profiles of elite male Italian teams handball players. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 61(5), 656–665. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.21.11850-X>
- Sahni, S., Mangano, K. M., McLean, R. R., Hannan, M. T., & Kiel, D. P. (2015). Dietary Approaches for Bone Health: Lessons from the Framingham Osteoporosis Study. *Current osteoporosis reports*, 13(4), 245–255. <https://doi.org/10.1007/s11914-015-0272-1>

Sanguineti, F., Garot, J., Hovasse, T., Untersee, T., Champagne, S., & Garot, P. (2020, December). IRM et myocardite infectieuse. In *Annales de Cardiologie et D'angiologie* (Vol. 69, No. 6, pp. 418-423). Elsevier Masson.

Sardinha, L. B., Baptista, F., & Ekelund, U. (2008). Objectively measured physical activity and bone strength in 9-year-old boys and girls. *Pediatrics*, 122(3), e728–e736. <https://doi.org/10.1542/peds.2007-2573>

Sarra, A., Karantza, M., Papaefthymiou, M., Soultanakis, H., Papaefstathiou, A., Nikolaidou, P., Bakoula, C., & Chrousos, G. (2013). Influence of developmental and hormonal factors on bone health in adolescent females: a cross-sectional study and review of the literature. *Journal of pediatric endocrinology & metabolism : JPEM*, 26(3-4), 239–246. <https://doi.org/10.1515/jpem-2012-0355>

Sattar, S., Haase, K. R., Milisen, K., Campbell, D., Kim, S. J., Chalchal, H., & Kenis, C. (2021). Évaluation systématique des chutes et du risque de chutes : Sondage sur l'attitude et les perceptions des infirmières cliniques en oncologie. *Canadian oncology nursing journal = Revue canadienne de nursing oncologique*, 31(4), 376–385. <https://doi.org/10.5737/23688076314376385>

Scerpella, J. J., Buehring, B., Hetzel, S. J., & Heiderscheit, B. C. (2018). Increased Leg Bone Mineral Density and Content During the Initial Years of College Sport. *Journal of strength and conditioning research*, 32(4), 1123–1130. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001929>

Schönau E. (2004). The peak bone mass concept: is it still relevant?. *Pediatric nephrology (Berlin, Germany)*, 19(8), 825–831. <https://doi.org/10.1007/s00467-004-1465-5>

Seabra, A., Fernandes, R. J., Marques, E., Moura, M., Ubago-Guisado, E., Hernando, E., & Gallardo, L. (2017). Impact of Futsal and Swimming Participation on Bone Health in Young Athletes. *Journal of human kinetics*, 60, 85–91. <https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0092>

Shepherd, J. A., Ng, B. K., Sommer, M. J., & Heymsfield, S. B. (2017). Body composition by DXA. *Bone*, 104, 101–105. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2017.06.010>

Shevroja, E., Lamy, O., Kohlmeier, L., Koromani, F., Rivadeneira, F., & Hans, D. (2017). Use of Trabecular Bone Score (TBS) as a Complementary Approach to Dual-energy X-ray Absorptiometry (DXA) for Fracture Risk Assessment in Clinical Practice. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 20(3), 334–345. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2017.06.019>

Sözen, T., Özışık, L., & Başaran, N. Ç. (2017). An overview and management of osteoporosis. *European journal of rheumatology*, 4(1), 46–56. <https://doi.org/10.5152/eurjrheum.2016.048>

Sözen, T., Özışık, L., & Başaran, N. Ç. (2017). An overview and management of osteoporosis. *European journal of rheumatology*, 4(1), 46–56. <https://doi.org/10.5152/eurjrheum.2016.048>

Specker, B., & Minett, M. (2013). Can physical activity improve peak bone mass?. *Current osteoporosis reports*, 11(3), 229–236. <https://doi.org/10.1007/s11914-013-0152-5>

Srikanthan, P., Crandall, C. J., Miller-Martinez, D., Seeman, T. E., Greendale, G. A., Binkley, N., & Karlamangla, A. S. (2014). Insulin resistance and bone strength: findings from the study of midlife in the United States. *Journal of bone and mineral research : the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research*, 29(4), 796–803. <https://doi.org/10.1002/jbmr.2083>

Srivastava, M., & Deal, C. (2002). Osteoporosis in elderly: prevention and treatment. *Clinics in geriatric medicine*, 18(3), 529–555. [https://doi.org/10.1016/s0749-0690\(02\)00022-8](https://doi.org/10.1016/s0749-0690(02)00022-8)

Stavropoulos, A., Bertl, K., Pietschmann, P., Pandis, N., Schiødt, M., & Klinge, B. (2018). The effect of antiresorptive drugs on implant therapy: Systematic review and meta-analysis. *Clinical oral implants research*, 29 Suppl 18, 54–92. <https://doi.org/10.1111/clr.13282>

Stein, E., & Shane, E. (2003). Secondary osteoporosis. *Endocrinology and metabolism clinics of North America*, 32(1), 115–vii. [https://doi.org/10.1016/s0889-8529\(02\)00062-2](https://doi.org/10.1016/s0889-8529(02)00062-2)

Stewart, T. L., & Ralston, S. H. (2000). Role of genetic factors in the pathogenesis of osteoporosis. *The Journal of endocrinology*, 166(2), 235–245. <https://doi.org/10.1677/joe.0.1660235>

Stojanović, E., Radovanović, D., Dalbo, V. J., Jakovljević, V., Ponorac, N., Agostinete, R. R., Svoboda, Z., & Scanlan, A. T. (2020). Basketball players possess a higher bone mineral density than matched non-athletes, swimming, soccer, and volleyball athletes: a systematic review and meta-analysis. *Archives of osteoporosis*, 15(1), 123. <https://doi.org/10.1007/s11657-020-00803-7>

Stratrova, S. S., Mishevskaja, S. J., Efremovska, L., Bitoska, I., & Spasovski, D. (2021). New DXA Diagnostic Indexes of Abdominal Obesity. *Prilozi (Makedonska akademija na naukite i umetnostite. Oddelenie za medicinski nauki)*, 42(2), 37–50. <https://doi.org/10.2478/prilozi-2021-0020>

Su, C. W., Lin, C. L., & Fang, J. J. (2021). Reconstruction of three-dimensional lumbar vertebrae from biplanar x-rays. *Biomedical physics & engineering express*, 8(1), 10.1088/2057-1976/ac338c. <https://doi.org/10.1088/2057-1976/ac338c>

Taniegra E. D. (2004). Hyperparathyroidism. *American family physician*, 69(2), 333–339.

Tarantino, U., Iolascon, G., Cianferotti, L., Masi, L., Marcucci, G., Giusti, F., Marini, F., Parri, S., Feola, M., Rao, C., Piccirilli, E., Zanetti, E. B., Cittadini, N., Alvaro, R., Moretti, A., Calafiore, D., Toro, G., Gimigliano, F., Resmini, G., & Brandi, M. L. (2017). Clinical guidelines for the prevention and treatment of osteoporosis: summary statements and recommendations from the Italian Society for Orthopaedics and Traumatology. *Journal of orthopaedics and traumatology : official journal of the Italian Society of Orthopaedics and Traumatology*, 18(Suppl 1), 3–36. <https://doi.org/10.1007/s10195-017-0474-7>

Tavares, Ó. M., Duarte, J. P., Werneck, A. O., Costa, D. C., Sousa-E-Silva, P., Martinho, D., Luz, L., Morouço, P., Valente-Dos-Santos, J., Soles-Gonçalves, R., Conde, J., Casanova, J. M., & Coelho-E-Silva, M. J. (2019). Body composition, strength static and isokinetic, and bone health: comparative study between active adults and amateur soccer players. *Einstein (Sao Paulo, Brazil)*, 17(3), eAO4419. https://doi.org/10.31744/einstein_journal/2019AO4419

Tiefenbach, M., Scheel, M., Maier, A., Gehlen, M., Schwarz-Eywill, M., Werner, M., Siebers-Renelt, U., & Hammer, M. (2018). Osteomalazie – Klinik, Diagnostik und Therapie [Osteomalacia-Clinical aspects, diagnostics and treatment]. *Zeitschrift für Rheumatologie*, 77(8), 703–718. <https://doi.org/10.1007/s00393-018-0510-x>

Tran, C., Bonafé, L., Nuoffer, J. M., Rieger, J., & Berger, M. M. (2018). Adult classical homocystinuria requiring parenteral nutrition: Pitfalls and management. *Clinical nutrition (Edinburgh, Scotland)*, 37(4), 1114–1120. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2017.07.013>

Troy, K. L., Mancuso, M. E., Butler, T. A., & Johnson, J. E. (2018). Exercise Early and Often: Effects of Physical Activity and Exercise on Women's Bone Health. *International journal of environmental research and public health*, 15(5), 878. <https://doi.org/10.3390/ijerph15050878>

Ubago-Guisado, E., Vlachopoulos, D., Fatouros, I. G., Deli, C. K., Leontsini, D., Moreno, L. A., Courteix, D., & Gracia-Marco, L. (2018). Longitudinal determinants of 12-month changes on bone health in adolescent male athletes. *Archives of osteoporosis*, 13(1), 106. <https://doi.org/10.1007/s11657-018-0519-4>

Ulzheimer, S., Endt, H., & Flohr, T. (2011). Computed tomography—patient dose and dose reduction technologies. *Health physics*, 100(3), 325–328. <https://doi.org/10.1097/hp.0b013e318209635e>

van Eerd, M., Patijn, J., Loeffen, D., van Kleef, M., & Wildberger, J. (2021). The Diagnostic Value of an X-ray-based Scoring System for Degeneration of the Cervical Spine: A Reproducibility and Validation Study. *Pain practice : the official journal of World Institute of Pain*, 21(7), 766–777. <https://doi.org/10.1111/papr.13013>

Vicente-Rodriguez, G., Ara, I., Perez-Gomez, J., Serrano-Sanchez, J. A., Dorado, C., & Calbet, J. A. (2004). High femoral bone mineral density accretion in prepubertal soccer players. *Medicine and science in sports and exercise*, 36(10), 1789–1795. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000142311.75866.d7>

Vicente-Rodriguez, G., Dorado, C., Perez-Gomez, J., Gonzalez-Henriquez, J. J., & Calbet, J. A. (2004). Enhanced bone mass and physical fitness in young female handball players. *Bone*, 35(5), 1208–1215. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2004.06.012>

Vicente-Rodriguez, G., Jimenez-Ramirez, J., Ara, I., Serrano-Sanchez, J. A., Dorado, C., & Calbet, J. A. (2003). Enhanced bone mass and physical fitness in prepubescent footballers. *Bone*, 33(5), 853–859. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2003.08.003>

Wagner, H., Fuchs, P. X., & von Duvillard, S. P. (2018). Specific physiological and biomechanical performance in elite, sub-elite and in non-elite male team handball players. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 58(1-2), 73–81. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.16.06758-X>

Wagner, H., Gierlinger, M., Adzamija, N., Ajayi, S., Bacharach, D. W., & von Duvillard, S. P. (2017). Specific Physical Training in Elite Male Team Handball. *Journal of strength and conditioning research*, 31(11), 3083–3093. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002094>

Weeks, B. K., & Beck, B. R. (2008). The BPAQ: a bone-specific physical activity assessment instrument. *Osteoporosis international : a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, 19(11), 1567–1577. <https://doi.org/10.1007/s00198-008-0606-2>

Wielpütz, M. O., Kauczor, H. U., & Weckbach, S. (2017). Incidental findings in chest X-rays. *Der Radiologe*, 57(4), 263-269.

Yang, P. F., Kriechbaumer, A., Albracht, K., Sanno, M., Ganse, B., Koy, T., Shang, P., Brüggemann, G. P., Müller, L. P., & Rittweger, J. (2015). On the relationship between tibia torsional deformation and regional muscle contractions in habitual human exercises in vivo. *Journal of biomechanics*, 48(3), 456–464. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.12.031>

Zakhem, E., Sabbagh, P., Ghanem-Zakhem, A., El Khoury, C., El Khoury, G., Zunquin, G., Baquet, G., & El Hage, R. (2020). Influence of Physical Activity Level on Composite Indices of Femoral Neck Strength in a Group of Young Overweight Men. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 23(4), 596–603. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2020.01.004>

Zehnacker, C. H., & Bemis-Dougherty, A. (2007). Effect of weighted exercises on bone mineral density in post menopausal women. A systematic review. *Journal of geriatric physical therapy* (2001), 30(2), 79–88. <https://doi.org/10.1519/00139143-200708000-00007>

- Zhu, X., & Zheng, H. (2021). Factors influencing peak bone mass gain. *Frontiers of medicine*, 15(1), 53–69. <https://doi.org/10.1007/s11684-020-0748-y>
- Zmuda, J. M., Cauley, J. A., & Ferrell, R. E. (1999). Recent progress in understanding the genetic susceptibility to osteoporosis. *Genetic epidemiology*, 16(4), 356–367. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2272\(1999\)16:4<356::AID-GEPI3>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2272(1999)16:4<356::AID-GEPI3>3.0.CO;2-I)
- Zmuda, J. M., Sheu, Y. T., & Moffett, S. P. (2006). The search for human osteoporosis genes. *Journal of musculoskeletal & neuronal interactions*, 6(1), 3–15.
- Zouch, M., Zribi, A., Alexandre, C., Chaari, H., Frere, D., Tabka, Z., & Vico, L. (2015). Soccer increases bone mass in prepubescent boys during growth: a 3-yr longitudinal study. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 18(2), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2014.10.004>
- Zribi, A., Zouch, M., Chaari, H., Bouajina, E., Zaouali, M., Nebigh, A., & Tabka, Z. (2014). Enhanced bone mass and physical fitness in prepubescent basketball players. *Journal of clinical densitometry : the official journal of the International Society for Clinical Densitometry*, 17(1), 156–162. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2013.04.001>

Annexes

Articles publiés dans des revues indexées :

Maliha, E., Khawaja, A., Toumi, H., Jennane, R., Pinti, A., & El Hage, R. (2022). Bone health parameters in young adult female handball players. In International Conference on Bioengineering and Biomedical Signal and Image Processing. Springer, Cham. Accepted paper.

Maliha, E., Pinti, A., Bassim, P., Toumi, H., & El Hage, R. (2021). Composite Indices of Femoral Neck Strength in Young Adult Male Handball Players. Journal of clinical densitometry: the official journal of the International Society for Clinical Densitometry, S1094-6950(21)00096-2. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2021.11.012>

Khawaja, A., Kamlé, P., **Maliha, E.**, Maalouf, G., Toumi, H., Pinti, A., & El Hage, R. (2021, July). Relationships Between Vertical Jump and Composite Indices of Femoral Neck Strength in a Group of Young Women. In International Conference on Bioengineering and Biomedical Signal and Image Processing (pp. 27-38). Springer, Cham.

Résumés publiés dans des actes de congrès :

Maliha, E. & El Hage, R. (2019). Effets de deux méthodes d'entraînement de force (force maximale vs. force explosive) sur la force maximale, la vitesse de tir, la vitesse d'accélération et les qualités de détente horizontale et verticale chez des joueurs de handball. Actes du 18^{ème} congrès de l'ACAPS 2019, pages 60-61.

Elie MALIHA
Paramètres de santé osseuse chez des jeunes adultes pratiquant le handball

Résumé : L'objectif de cette thèse était de comparer les paramètres de santé osseuse (contenu minéral osseux (CMO), densité minérale osseuse (DMO), indices géométriques du col fémoral (surface de la section transversale (CSA), moment d'inertie de la surface transversale (CSMI), module de section (Z), buckling ratio (BR) et indice de résistance (SI)) et indices de résistance du col fémoral (indice de résistance en compression (CSI), indice de résistance en flexion (BSI) et indice de force aux contraintes (ISI)) chez des jeunes adultes pratiquant le handball et des jeunes adultes inactifs. La première étude a comparé les paramètres osseux chez des jeunes hommes pratiquant le handball (n=24) et des jeunes hommes inactifs (n=20). Cette étude a démontré que le CMO, la DMO, la CSA, le CSMI, le Z, le SI, le CSI, le BSI et l'ISI étaient significativement supérieurs chez les hommes pratiquant le handball par rapport aux hommes inactifs. Les valeurs de DMO des hommes pratiquant le handball sont restées significativement supérieures à celles des hommes inactifs après ajustement pour la masse maigre ou la force maximale en soulevé de terre. La deuxième étude a comparé les paramètres osseux chez des jeunes femmes pratiquant le handball (n=20) et des jeunes femmes inactives (n=18). Cette étude a démontré que le CMO, la DMO, le CSMI et le Z étaient significativement supérieurs chez les femmes pratiquant le handball par rapport aux femmes inactives. Après ajustement pour la masse maigre en utilisant des analyses de covariance, les valeurs de DMO sont restées supérieures chez les femmes pratiquant le handball par rapport aux femmes inactives. En conclusion, cette étude suggère que la pratique du handball est associée à des valeurs plus élevées de DMO dans les deux sexes. La pratique du handball semble être importante pour la prévention des fractures ostéoporotiques plus tard dans la vie.

Mots clés : Pic de masse osseuse ; Sports collectifs ; Prévention de l'ostéoporose ; Fémur ; Géométrie osseuse.

Bone health parameters in young adults practicing handball

Summary: The purpose of this study was to compare bone health parameters (bone mineral content [BMC], bone mineral density [BMD], geometric indices of femoral neck [FN] strength (cross-sectional area [CSA], cross-sectional moment of inertia [CSMI], section modulus [Z], buckling ratio [BR] and strength index [SI]) and composite indices of FN strength (compression strength index [CSI], bending strength index [BSI], and impact strength index [ISI])) in young adults practicing handball and young inactive adults. The first study compared bone health parameters in young men practicing handball (n=24) and young inactive men (n = 20). This study demonstrated that BMC, BMD, CSA, CSMI, Z, CSI, BSI and ISI were significantly higher in young men practicing handball compared to inactive men. BMD values remained significantly higher in young men practicing handball compared to inactive men after adjusting for lean mass or 1-RM deadlift. The second study compared bone health parameters in young adult female handball players (n = 20) and young adult inactive women (n = 18). This study demonstrated that BMC, BMD, CSMI and Z were significantly higher in female handball players compared to inactive women. After adjusting for lean mass using a one-way- analysis of covariance, BMD values remained significantly higher in young women practicing handball compared to inactive women. In conclusion, the present study suggests that handball practice is associated with greater BMD values in both sexes. Handball practice seems to be important for the prevention of osteoporotic fractures later in life. **Keywords:** Peak Bone mass; Team sports; Prevention of osteoporosis; Femur; Bone geometry.