

UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

THESE / UNIVERSITE RENNES 2

sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE l'université Rennes 2

Mention : Sciences et techniques des activités physiques et sportives

Ecole doctorale (ED 507 SHS)

présentée par

Georges El Khoury

Préparée à l'Unité Mixte de recherche (EA 4636)

Université Rennes 2

Laboratoire Violences Identités Politiques & Sports

Influences des niveaux d'activité
physique et de performance
physique sur la densité minérale
osseuse, la géométrie osseuse de
la hanche et le score de l'os
trabéculaire chez de jeunes
hommes en surpoids et obèses

Thèse soutenue le 05/05/2017

devant le jury composé de :

Christophe Jacob

Professeur universitaire, Université de Balamand, Liban / *président*

Christelle Jaffré

Professeure universitaire, Université de Picardie Jules Vernes / *rapporteuse*

Antonio Pinti

Maître de conférences universitaire-HDR, Université de Valenciennes / *rapporteur*

Geneviève Cabagno

Co-directrice de thèse

Rawad El HAGE

Co-directeur de thèse



UNIVERSITÉ RENNES 2

Laboratoire Violences Identités Politiques & Sports (EA 4636)
Ecole Doctorale : « Sciences humaines et sociales (ED 507 SHS) »

Sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

**Influences des niveaux d'activité physique et de performance physique
sur la densité minérale osseuse, la géométrie osseuse de la hanche et le
score de l'os trabéculaire chez de jeunes hommes en surpoids et obèses**

Thèse de Doctorat

Discipline : Sciences et techniques des activités physiques et sportives

Présentée par Georges EL KHOURY

Directeurs de thèse : Hassane ZOUHAL, Geneviève CABAGNO et Rawad EL HAGE

Soutenue le 5 Mai 2017

Jury :

- Mme. Christelle Jaffré, Université de Picardie Jules Verne (Rapporteuse)
- M. Antonio Pinti, Université de Valenciennes (Rapporteur)
- Mme. Geneviève Cabagno, Université de Rennes 2 (Co-directrice de thèse)
- M. Hassane Zouhal, Université de Rennes 2 (Co-directeur de thèse)
- M. Rawad El Hage, Université de Balamand, Liban (Co-directeur de thèse)
- M. Christophe Jacob, Université de Balamand, Liban (Examineur)

Remerciements

Cette thèse est le résultat d'un travail de 3 ans en cotutelle entre l'Université Bretagne Loire – Rennes 2 et l'Université de Balamand (UOB). Je tiens d'abord à adresser mes remerciements au département d'Education Physique de l'UOB et au laboratoire Violences Identités Politiques et Sports- Rennes 2.

Je remercie chaleureusement le doyen de la faculté des lettres et des sciences humaines de l'université de Balamand monsieur le Professeur Georges Dorlian pour la confiance qu'il m'a accordé et pour tous les encouragements qu'il m'a donné tout au long de mon cheminement.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse le Professeur Hassane Zouhal, pour sa confiance, son aide précieuse, sa disponibilité, son expertise et surtout ses conseils scientifiques lors des moments clés du déroulement de ce travail.

Je remercie ma co-directrice madame la Professeure Geneviève Cabagno pour ses remarques, ses explications et son expertise tout au long de ce travail.

Je souhaite également exprimer ma très sincère et profonde reconnaissance à mon co-directeur de recherche et mon chef de département, le professeur Rawad El Hage, pour son amitié, son professionnalisme, sa compréhension, ses encouragements, ses précieux conseils et son soutien en m'apportant une aide constante dans les moments faciles comme les plus difficiles de la gestion de ce travail.

Un grand merci au Professeur Ghassan Maalouf de l'hôpital BMC – Liban.

Merci au Docteur Eddy Zakhem et Docteur Marie-Louise Ayoub pour leurs conseils et pour m'avoir donné la chance de travailler avec eux dans plusieurs études scientifiques.

J'adresse mes sincères remerciements à tous mes collègues dans le département d'éducation physique à l'université de Balamand et aux sujets qui ont accepté de participer à ces différents protocoles de recherche.

Merci aux membres du jury d'avoir accepté de participer à l'évaluation de ce mémoire de thèse.

Je dédie cette thèse à ma famille à mes parents pour tout leur soutien, leur support dans les moments difficiles et surtout l'amour qu'ils m'ont apporté pour que ce travail puisse aboutir.

Abréviations

1,25 (OH) ₂ D	Calcitriol
2 D	Deux Dimensions
3 D	Trois Dimensions
ACSM	American College of Sport Medicine
AFFSA	Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments
AP	Activité Physique
APIE	Activités Physiques à Impacts Elevés
BMP2	Bone Morphogenetic Protein 2
BMU	Basic Multi cellular Unit
BR	Buckling Ratio
BRU	Bone Remodeling Unit
BSI	Bending Strength Index ou (indice de force en flexion)
BUA	Broadband Ultrasound attenuation
BV/TV	Bone Volume over Total Volume
CCJ	Consommation Calcique Journalière
CPJ	Consommation Protéique Journalière
CE	Corps Entier
CF	Col Fémoral
CMO	Contenu Minéral Osseux

CPJ	Consommation Protéique Journalière
CRP	C-Reactive Protein
CSA	Cross-Sectional Area (surface de section transversale)
CSI	Compression Strength Index (indice de force en compression)
CSMI	Cross Section Moment of Inertia (moment d'inertie de la surface transversale)
DH	Détente horizontale
DMO	Densité Minérale Osseuse
DMOA	Densité Minérale Osseuse Apparente
DS	Demi-squat
DV	Détente verticale
DXA à rayons-X)	Dual-energy X-ray Absorptiometry (Absorptiométrie Biphotonique
ESF	Extrémité supérieure du fémur
FP	Test de force de préhension du poignet
GH	Growth Hormone (hormone de croissance)
GIP	Glucose-dependent Insulino tropic
GLP-1	Glucagon-like peptide-1
GLP-2	Glucagon-like peptide-2
GPAQ	Global Physical Activity Questionnaire
GRF	Ground Reaction Force
HT	Hanche totale

IGF-1	Insulin-like Growth Factor
IL-1	Interleukin-1 family
IL-11	Interleukin 11
IL-13	Interleukin 13
IL-17	Interleukin 17
IL-6	Interleukin 6
IMC	Indice de Masse Corporelle
IQSP	Indice de Qualité du Sommeil de Pittsburgh
IRM	Imagerie à Résonance Magnétique
ISI	Impact Strength Index (indice de force aux contraintes)
L2-L4	Rachis lombaire
LRP5	Low-density Lipoprotein Receptor-related Protein 5
M-CSF	Macrophage Colony Stimulating Factor
MES	Minimum Effective Strain
MrOS	Osteoporotic Fractures in Men Study
NCSA	Association Nationale de Conditionnement et de Force musculaire
NCSS	Number Cruncher Statistical System
NHANES	National Health and Nutrition Examination Survey
ODF	Osteoclast Differentiation Factor
OPG	Ostéoprotégérine
PPAR γ	Peroxisome Proliferator-Activated Receptor

pQCT	Peripheral Quantitative Computed Tomography
QCT	Quantitative Computed Tomography
RANKL	Receptor Activator of Nuclear factor- κ Bligand
SHBG	Sex Hormone-Binding Globulin
SMI	Stucture Model Index
SOS	Speed of Sound ou (Vitesse du son)
SUR	Surcharge pondérale
T	Tesla
TB	Triple bond
TBS	Trabecular Bone Score ou (score de l'os trabéculaire)
TGF- β	Transforming Growth Factor Beta
TN	Test de navette
TNF- α	Tumor Necrosis Factor alpha
TS	Test de Sargent
VDR	Vitamin D receptor
VIH	Sida
VO ₂ max	Consommation maximale d'oxygène
WHO	World Health Organisation (organisation mondiale de la santé)
Z	Section Modulus ou (Module de section)
μ m	Micromètre
μ Sv	Microsievert

Table des matières

Remerciements	1
Abréviations	3
Tables des matières	7
Liste des figures	13
Liste des tableaux	17
Introduction	20
Première partie : Revue de la littérature	22
1. Biologie du tissu osseux	22
1.1. Physiologie du tissu osseux	22
1.1.1. Caractéristiques générales	22
1.1.2. Composition du tissu osseux	22
1.1.2.1. Les différents types d'os	22
1.1.2.1.1. Les os longs	23
1.1.2.1.2. Les os plats	25
1.1.2.1.3. Les os courts	25
1.1.2.2. Structure de l'os	25
1.1.2.2.1 L'os cortical ou compact	26
1.1.2.2.2. L'os trabéculaire ou spongieux	26
1.1.2.3. Répartition des deux tissus dans le squelette	27
1.1.2.4. Composition chimique de l'os	28

1.1.2.5. Les cellules osseuses	28
1.1.2.5.1. Les ostéoblastes	28
1.1.2.5.2. Les cellules bordantes	29
1.1.2.5.3. Les ostéocytes	29
1.1.2.5.4. Les ostéoclastes	29
1.1.2.6. Le remodelage osseux	30
1.1.2.6.1. Modélisation mécanique du remodelage osseux	31
1.1.2.6.2. Différents types d'activités physiques et leurs effets sur le métabolisme osseux	32
1.1.2.6.3. Rôles du remodelage osseux	33
1.1.2.6.4. La régulation du remodelage osseux	33
1.1.2.6.4.1. Facteurs stimulant la formation osseuse	33
1.1.2.6.4.2. Facteurs stimulant la résorption osseuse	34
1.2. Physiopathologie de l'ostéoporose	35
1.2.1. Ostéoporose primitive	35
1.2.2. Ostéoporose secondaire	37
1.3. Epidémiologie de l'ostéoporose	38
1.4. Prévention de l'ostéoporose	40
1.4.1. Prévention non médicamenteuse	40
1.4.1.1. Maintien d'un IMC normal	40
1.4.1.2. Lutte contre le tabagisme et l'alcoolisme	40

1.4.1.3. Apports adéquats en calcium et vitamine D	40
1.4.1.4. Activité physique	41
1.4.2. Prévention médicamenteuse	42
2. Les méthodes d'évaluation de la densité minérale osseuse	42
2.1. Absorptiométriebiphotonique à rayons-X (DXA)	43
2.1.1. Caractéristiques générales	43
2.1.2. Les limites	43
2.1.3. Les paramètres osseux mesurés	44
2.1.3.1. Le CMO et la DMO	44
2.1.3.2. Le TBS	47
2.1.3.3. Les indices géométriques de résistance osseuse de la hanche	48
2.2. L'imagerie à résonnance magnétique (IRM)	49
2.3. Ultrasonométrie	49
2.4. La radiographie	50
2.5. La tomographie	50
3. Le pic de masse osseuse	53
3.1. Importance du pic de masse osseuse	53
3.2. Les déterminants du pic de masse osseuse	54
3.2.1. Les facteurs génétiques	55
3.2.2. Les facteurs hormonaux	56
3.2.3. Les facteurs mécaniques	58

3.2.3.1. Niveau de contraintes mécaniques par activité sportive	59
3.2.3.2. Facteurs mécaniques et DMO	62
3.2.3.2.1. Les études transversales	62
3.2.3.2.2. Les études longitudinales	79
3.2.3.3. Facteurs mécaniques et géométrie osseuse	79
3.2.3.4. Facteurs mécaniques et trabecular bone score (TBS)	82
3.2.3.4.1. Facteurs corrélables au TBS	82
3.2.3.5. Conséquences de la réduction des contraintes mécaniques	83
3.2.4. Facteurs nutritionnels	84
3.2.4.1. Apports caloriques	84
3.2.4.2. Le calcium	85
3.2.4.3. Les protéines	85
3.2.4.4. La vitamine D	86
4. Obésité et paramètres osseux	87
4.1. Aspects mécanistiques	87
4.1.1. Mécanismes mécaniques	87
4.1.2. Mécanismes hormonaux	90
4.1.3. Le sommeil	93
4.1.4. Les polluants organiques	95
4.2. Etudes in-vivo	96
4.2.1. Le CMO et la DMO	96

4.2.2. La densité minérale osseuse apparente (DMOA)	96
4.2.3. Les indices géométriques de résistance osseuse de la hanche calculés par la technique <i>HS4</i>	96
4.2.4. Les indices de résistance osseuse du col fémoral calculés par la méthode de Karlamangla et coll. (2004)	96
4.2.5. Le TBS	97
5. La réponse osseuse aux contraintes mécaniques chez les sujets obèses	97
5.1. Les principes d'action de l'activité physique sur la densité minérale osseuse	97
5.2. Les lois mathématiques qui régissent les adaptations osseuses aux contraintes mécaniques	98
5.3. La spécificité de la réponse osseuse à l'exercice physique en fonction du type d'activité physique chez les obèses	99
5.3.1. L'entraînement de la force avec charges	99
5.3.2. L'entraînement en endurance	99
5.3.3. L'entraînement pliométrique	100
6. Synthèse et objectifs	107
Deuxième partie : Contribution personnelle	108
Méthodologie générale	108
Etudes antérieures sur les relations entre les niveaux de performance physique et les paramètres osseux chez de jeunes adultes	111
1a. Les déterminants de santé corrélables à la densité minérale osseuse appréciée par ultrasonométrie	111
1b. Performance physique et densité minérale osseuse chez de jeunes adultes	123

libanais

1c. Étude observationnelle sur l'impact du type d'activité physique sur la densité 141
minérale osseuse, la géométrie osseuse de la hanche et le TBS chez des hommes
adultes

Etudes antérieures sur l'influence du statut pondéral sur les paramètres 156
osseux chez de jeunes adultes Libanais

2a. Le Trabecular Bone Score chez des jeunes femmes en surcharge pondérale et 156
normo-pondérées

2b. Le Trabecular Bone Score chez des jeunes hommes obèses, en surpoids et 168
normo-pondérés

Troisième série d'études : Activité physique, performance physique et 181
paramètres osseux chez des jeunes hommes en surpoids et obèses

3a. Influence du niveau d'activité physique sur les paramètres osseux chez des 181
jeunes hommes en surcharge pondérale

3b. Paramètres osseux chez des jeunes hommes sportifs en surpoids ou obèses et 196
des jeunes hommes sédentaires en surpoids ou obèses

3c. Etude de corrélation entre la consommation maximale d'oxygène et les 216
indices de résistance osseuse du col fémoral chez des jeunes hommes en surpoids
et obèses

Discussion générale 229

Conclusion et perspectives 235

Bibliographie 237

Annexes 277

Résumé 280

Liste des figures

Figure 1	Les différents types d'os (Marieb et Hoehn, 2010)	23
Figure 2	Schéma d'un os long en coupe sagittale (Marieb et Hoehn, 2010)	24
Figure 3	Structure de l'os cortical (Marieb et Hoehn, 2010)	26
Figure 4	Proportion relative d'os cortical et d'os trabéculaire en différents sites osseux du squelette humain (Mundy, 1999)	27
Figure 5	Cycle du remodelage osseux (Marie et De Vernejoul, 1993)	31
Figure 6	Contrôle du remodelage osseux par le système OPG/RANKL (Marie et Halbout, 2008)	35
Figure 7	Représentation schématique de l'évolution des surfaces endocorticales et périostées en fonction de l'âge (Duan et coll. 2003)	37
Figure 8	Incidence de l'ostéoporose et de l'ostéopénie au Liban (The Middle East and Africa audit, 2011)	39
Figure 9	Figure 9 : Incidence fracturaire de la hanche au Liban (Maalouf et coll. 2013)	39
Figure 10	Certains facteurs de risque d'ostéoporose sont liés aux habitudes de vie (Blanchet, 2008)	42
Figure 11	Relation entre la DMO et la résistance biomécanique de l'os (Amman et Rizzoli, 2003)	45
Figure 12	Le risque de fracture de la hanche par quartile de CSI, BSI et ISI (Karlmanangla et coll. 2004)	47
Figure 13	Pic de DMO à l'âge de 25 ans et apparition de l'ostéoporose plus tard dans la vie (Rizzoli et coll. 2010)	53

Figure 14	Les déterminants physiologiques du pic de masse osseuse et leurs interconnexions (Bonjour et coll. 2009).	55
Figure 15	Evolution des différents paramètres osseux en fonction de l'âge et du sexe (Seeman, 2001)	57
Figure 16	Vitesse d'acquisition de la masse maigre, du CMO du corps entier et de la taille pour les deux sexes entre 9 et 19 ans (Rauch et coll. 2004)	58
Figure 17	Résumé de plusieurs études menées sur la DMO de femmes réglées pratiquant plusieurs types d'activités physiques. Les résultats sont exprimés en pourcentage au-dessus des valeurs retrouvées chez les femmes témoins (Egan et coll. 2006)	68
Figure 18	Relation entre la surface musculaire transversale et la résistance osseuse (Schonau et Fricke, 2006)	69
Figure 19	Influence de la surface osseuse sur la résistance mécanique de l'os (Briot, 2009)	79
Figure 20	CSA et Z chez des femmes pratiquant différents types d'activités physiques. Les valeurs sont exprimées en pourcentage par rapport à un groupe féminin témoin (Nikander et coll. 2005)	81
Figure 21	Valeurs de TBS en fonction du type de pratique sportive (Heino et coll. 2015)	82
Figure 22	Corrélations simples entre le TBS et les paramètres de performance physique dans les groupes pratiquant plusieurs types d'activités physiques (Heino et coll. 2015)	83
Figure 23	Apports adéquats en protéines, calcium et vitamine D et réduction du risque fracturaire chez les personnes âgées (Bonjour, 2011)	86
Figure 24	Mécanismes augmentant le risque fracturaire du fait de la déficience	87

en calcium et en vitamine D (Rizzoli, 2008)

Figure 25	Localisation de la fracture et obésité (Cortet et Roux, 2016)	88
Figure 26	Résumé des principaux mécanismes par lesquels l’hyperinsulinémie associée à l’obésité contribue à l’augmentation de la masse osseuse (Reid, 2010)	90
Figure 27	Masse grasse viscérale et perturbations hormonales (Bjorntorp, 1997)	91
Figure 28	Les relations entre le tissu adipeux et le muscle. Un mécanisme expliquant l’installation de l’obésité sarcopénique (Zamboni et coll. 2008)	92
Figure 29	Les conséquences possibles de l’obésité sarcopénique chez les personnes âgées (Zamboni et coll. 2008)	93
Figure 30	Représentation schématique des mécanismes permettant d’expliquer l’influence du manque de sommeil sur la résistance osseuse et le risque fracturaire (Swanson et coll. 2015)	94
Figure 31	Effets positifs et négatifs de l’obésité sur la DMO (Rosen et Bouxsein, 2005)	95
Figure 32	Trabecular Bone Score dans les trois groupes (Moyennes $\pm$ déviations standards)	151
Figure 33	Densité minérale osseuse de la hanche entière dans les trois groupes (Moyennes $\pm$ déviations standards)	152
Figure 34	Module de section du col fémoral dans les trois groupes (Moyennes $\pm$ déviations standards)	153
Figure 35	Contenu minéral osseux du corps entier dans les trois groupes (Moyennes $\pm$ déviations standards)	154
Figure 36	Relation entre l’indice de masse corporelle et le TBS ($p > 0,05$)	163
Figure 37	Relation entre l’indice de masse corporelle et la DMO du rachis	164

	lombaire	
Figure 38	Relation entre le poids corporel et le TBS ($p > 0,05$)	164
Figure 39	Relation entre le poids corporel et la DMO L1-L4	165
Figure 40	Relation entre l'indice de masse corporelle et le trabecular bone score	176
Figure 41	Relation entre l'indice de masse corporelle et la DMO du rachis lombaire (L1-L4)	176
Figure 42	L'appareil de mesure de la VO_2 (Cosmed Fimate pro)	198
Figure 43	Géométrie osseuse du col fémoral. AC représente la longueur de l'axe de la hanche alors que DE représente la largeur du col fémoral (Karlman et coll. 2004)	218
Figure 44	Relation entre la consommation maximale d'oxygène et le CSI du col fémoral	222
Figure 45	Relation entre consommation maximale d'oxygène et l'ISI du col fémoral	223
Figure 46	Relation entre consommation maximale d'oxygène et le BSI du col fémoral	223

Liste des tableaux

Tableau 1	Apports en calcium et en vitamine D conseillés pour la population Française (AFFSA, 2001)	41
Tableau 2	Risque relatif de fracture ostéoporotique pour chaque augmentation d'une déviation standard de la DMO après ajustement pour l'âge et l'IMC (Karlman et coll. 2004)	46
Tableau 3	Valeurs de TBS en fonction de la spécialité sportive (Heiniö et coll. 2015)	48
Tableau 4	Intérêts et limites des outils d'investigations des paramètres osseux in vivo (Ducher et Blimkie, 2006)	52
Tableau 5	Niveaux de contraintes mécaniques par activité sportive (Kemper et coll. 2002)	59
Tableau 6	Niveaux de contraintes mécaniques de plusieurs activités sportives sur la hanche et le rachis lombaire (Groothausen et coll. 1996)	59
Tableau 7	Niveaux de contraintes mécaniques de plusieurs activités journalières et sportives sur la hanche et le rachis lombaire (Dolan et coll. 2006).	60
Tableau 8	Résumé de plusieurs études menées sur l'influence du type de pratique sportive sur les paramètres osseux	63
Tableau 9	Résumé de plusieurs études menées sur les relations entre les paramètres de force musculaire et les variables osseuses	71
Tableau 10	Résumé de plusieurs études menées sur la relation entre la consommation maximale d'oxygène et les paramètres osseux	75
Tableau 11	Résumé de plusieurs études longitudinales menées sur l'influence de l'entraînement physique sur les paramètres osseux chez les sujets obèses	101

Tableau 12	Design des études	109
Tableau 13	Caractéristiques cliniques et BUA de la population étudiée	120
Tableau 14	Corrélations entre les caractéristiques cliniques et la BUA chez les femmes	121
Tableau 15	Tableau 15: Corrélations entre les caractéristiques cliniques et la BUA chez les hommes	122
Tableau 16	Caractéristiques cliniques et paramètres osseux de la population étudiée	133
Tableau 17	Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux chez les femmes	135
Tableau 18	Tableau 18: Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux chez les hommes	136
Tableau 19	Régressions linéaires multiples chez les femmes	137
Tableau 20	Régressions linéaires multiples chez les hommes	139
Tableau 21	Caractéristiques cliniques de la population étudiée	148
Tableau 22	Paramètres osseux de la population étudiée	149
Tableau 23	Caractéristiques de la population étudiée	159
Tableau 24	Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux	161
Tableau 25	Caractéristiques cliniques et paramètres osseux chez les hommes obèses, en surpoids et normo-pondérés	172
Tableau 26	Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux	174
Tableau 27	Caractéristiques de la population étudiée	187
	Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux	189
Tableau 29	Paramètres osseux ajustés pour le volume hebdomadaire d'activité	192

	physique	
Tableau 30	Caractéristiques cliniques et paramètres osseux de la population étudiée	200
Tableau 31	Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux	203
Tableau 32	Régressions linéaires multiples	205
Tableau 33	Paramètres osseux ajustés pour l'IMC dans les deux groupes	209
Tableau 34	Paramètres osseux ajustés pour le poids dans les deux groupes	210
Tableau 35	Paramètres osseux ajustés pour la masse maigre dans les deux groupes	211
Tableau 36	Paramètres osseux ajustés pour la force maximale en demi-squat dans les deux groupes	212
Tableau 37	Calcul des indices de résistance du col fémoral	218
Tableau 38	Caractéristiques cliniques et paramètres osseux de la population étudiée	220
Tableau 39	Corrélations entre la VO ₂ max et les différents paramètres de la population étudiée	221
Tableau 40	Régressions linéaires multiples	224
Tableau 41	Corrélations entre le volume hebdomadaire d'activité physique et les différents paramètres de la population étudiée	225
Tableau 42	Corrélations entre les caractéristiques anthropométriques et les paramètres osseux	226

Introduction

Les prévalences de l'obésité et du surpoids chez les jeunes hommes augmentent au Liban et au Moyen-Orient (Sibai et coll. 2003; Nasreddine et coll. 2012). Une étude menée au Liban a montré que la prévalence du surpoids chez les hommes adultes est de 57,7% (Sibai et coll. 2003). Chez les hommes, le fait d'être en surcharge pondérale est associé à une augmentation de la DMO au niveau des sites osseux porteurs (Kang et coll. 2014 ; Rexhepi et coll. 2015). Cependant, plusieurs études ont montré que la DMO et la géométrie osseuse ne sont pas adaptées à l'excès de poids chez les sujets obèses (Rocher et coll. 2013 ; Chung et coll. 2016). C'est pour cela que la mise en place de stratégies visant à augmenter la DMO chez les hommes obèses et en surpoids peut être bénéfique pour prévenir les maladies osseuses dans cette population (El Khoury et coll. 2016a ; El Khoury et coll. 2016b). Plusieurs études longitudinales ont étudié les effets de différents types d'entraînements physiques sur la DMO chez les sujets obèses (Courteix et coll. 2015; El Hage et coll. 2009b). Mackelvie et coll. (2002) ont exploré les effets de 7 mois d'entraînement de sauts (3 séances par semaine; 10 minutes par séance) sur l'acquisition de la masse osseuse chez des enfants prépubères. L'intervention a permis d'augmenter les valeurs du CMO au niveau de plusieurs sites osseux chez les enfants ayant un IMC moyen ou faible alors que les effets de l'intervention sur l'acquisition du CMO n'étaient pas significatifs chez les enfants ayant un IMC élevé (Mackelvie et coll. 2002). Les auteurs de cet article ont énoncé deux hypothèses afin d'expliquer le manque de réponse ostéogénique aux exercices de sauts chez les enfants ayant un IMC élevé (Mackelvie et coll. 2002). En premier lieu, le squelette des enfants ayant un IMC élevé peut ne pas répondre aux stimuli mécaniques induits par l'entraînement physique car il est déjà sous le stress de la surcharge pondérale. En deuxième lieu, le fait d'avoir un IMC élevé peut affecter négativement la motivation lors de la réalisation de sauts; les enfants ayant un IMC élevé ont probablement éprouvé des difficultés à réaliser les exercices de sauts (Mackelvie et coll. 2002). A l'inverse, une autre étude a démontré que l'entraînement multidisciplinaire en endurance augmente significativement le CMO et la DMO chez des filles sédentaires obèses (El Hage et coll. 2009b). La réponse ostéogénique à l'exercice physique chez les sujets obèses reste peu connue, et les études transversales ayant comparé les paramètres osseux chez des sujets sédentaires obèses ou en surpoids par rapport aux sujets actifs obèses ou

en surpoids manquent. Notre thèse basée essentiellement sur trois études avait trois objectifs principaux. Le premier objectif était de comparer les paramètres osseux (CMO, DMO, indices géométriques du col fémoral et trabecular bone score) chez des hommes adultes sportifs en surpoids ou obèses et des hommes adultes sédentaires en surpoids ou obèses. Le deuxième objectif était de définir des paramètres de performance physique corrélables à la DMO. Le troisième objectif était d'explorer la relation entre la VO_2 max (ml/min/kg) et les indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI).

Première Partie : Revue de la littérature

1. Biologie du tissu osseux

1.1. Physiologie du tissu osseux

1.1.1. Caractéristiques générales

Le squelette fournit une charpente au corps. En effet, le squelette est le site d'insertion des muscles qui permettent le mouvement. Au contraire des tissus cartilagineux, le tissu osseux est vascularisé et innervé.

Le tissu osseux participe à deux grandes fonctions: la fonction mécanique et la fonction métabolique.

Concernant la fonction mécanique, le tissu osseux assure le soutien de l'organisme et participe par l'insertion des tendons et des muscles à la fonction de locomotion. Les os assurent la protection des organes vitaux; la cage thoracique protège les poumons et le cœur alors que la boîte crânienne protège l'encéphale (Mosbah et Andreelli, 2012).

En ce qui concerne la fonction métabolique, le tissu osseux joue un rôle primordial dans le métabolisme phosphocalcique. Il représente le principal réservoir d'ions minéraux de l'organisme renfermant près de 99% du calcium, 88% du phosphore, 80% des carbonates et 50% du magnésium (Karsenty et Ferron, 2012). En fonction des besoins, le tissu osseux stockera ces ions dans la fraction minérale de sa matrice extracellulaire ou les libèrera. Le squelette doit être puissant mais souple.

1.1.2. Composition du tissu osseux

1.1.2.1. Les différents types d'os

Dans le squelette osseux on retrouve trois catégories: os longs, os plats, os courts et irréguliers (Lacombe, 2000).

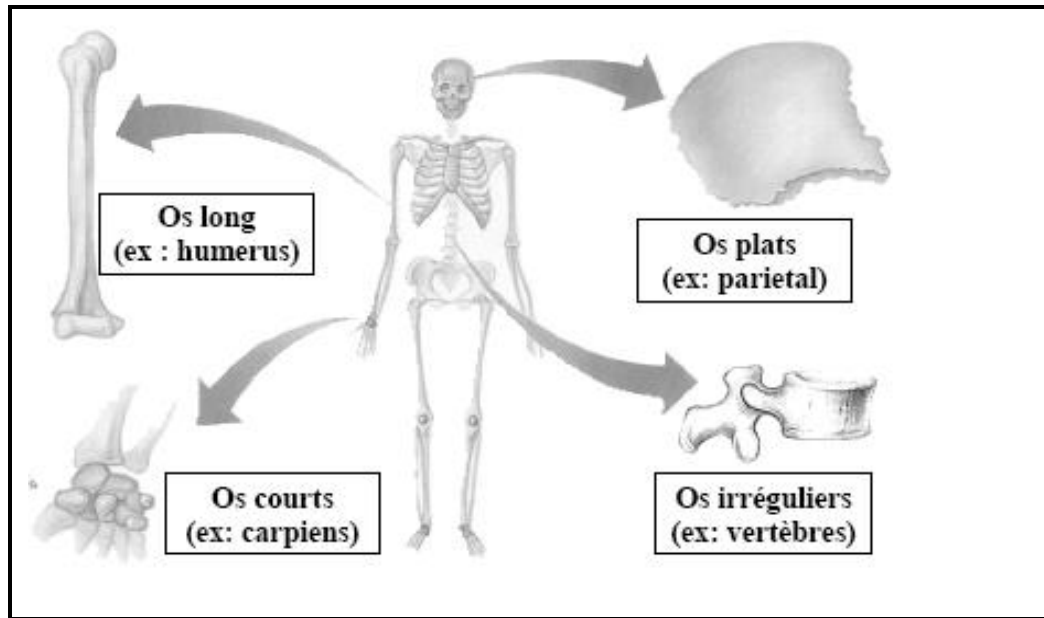


Figure 1: Les différents types d'os (Marieb et Hoehn, 2010)

1.1.2.1.1. Les os longs

Comme leur nom l'indique, les os longs sont beaucoup plus longs que larges (Marieb et Hoehn, 2010).

Les os longs sont composés de trois parties distinctes:

- Des deux extrémités, les épiphyses
- La diaphyse est la partie centrale
- La métaphyse est la jonction entre les deux parties

La diaphyse est tapissée d'une membrane fibreuse et adhérente: le périoste qui recouvre les os, à l'exception des articulations (Baqué, 2008).

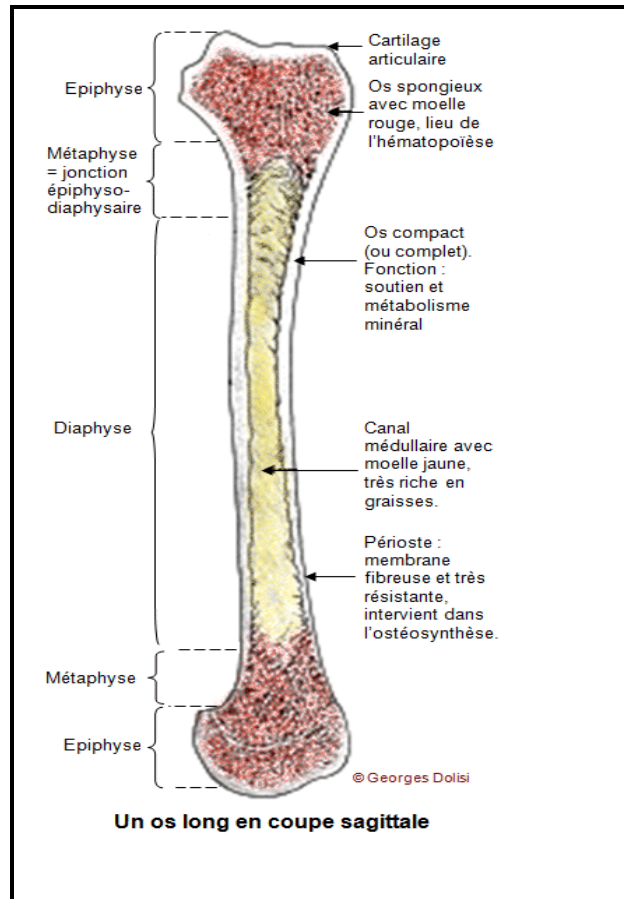


Figure 2: Schéma d'un os long en coupe sagittale (Marieb et Hoehn, 2010)

La diaphyse est la partie médiane des os longs. Elle est de forme cylindrique située entre la métaphyse et l'épiphyse. Dans cette partie, circule le canal médullaire central contenant les vaisseaux et la moëlle osseuse. Elle est entourée d'une membrane (le périoste) qui est riche en vaisseaux nourriciers qui participent à l'ossification en épaisseur.

Les métaphyses sont composées d'os spongieux et comportent une fine couche de tissu osseux compact. La métaphyse est la zone de transition entre la diaphyse et l'épiphyse; le cartilage épiphysaire se trouve à cet endroit.

Les épiphyses sont les extrémités des os longs. Elles sont formées de tissus spongieux, recouvertes de cartilage articulaire et très riches en moëlle hématopoïétique (Baqué, 2008).

1.1.2.1.2. Les os plats

Un os plat est un os de forme mince et large, sa longueur et sa largeur sont à peu près égales. Il est constitué de deux tables d'os compact séparées par une mince couche de tissu osseux spongieux. Les os de la voûte crânienne comme le frontal, le temporal, l'occipital et l'os pariétal, sont reliés aux os voisins par des sutures élastiques chez l'enfant et des soudures fixes chez l'adulte. Il existe aussi d'autres os plats comme le sternum, le maxillaire inférieur, et les omoplates (Baqué, 2008).

1.1.2.1.3. Les os courts

Les os courts n'ont pas de dimensions prépondérantes sur les autres; longueur, largeur et épaisseur sont à peu près égales. Ils présentent ainsi plusieurs faces séparées par des bords et des angles. Un os court est constitué de tissu spongieux entouré par une fine couche de tissu compact. La forme des os courts peut être arrondie, pyramidale, ovoïde, cubique ou irrégulière. Les carpes et les tarses sont des os courts. Les os sésamoïdes sont un type particulier d'os court enchâssé dans un tendon comme la rotule et certains os du pouce et du gros orteil (Marieb et Hoehn, 2010).

1.1.2.2. Structure de l'os

Anatomiquement, on distingue deux types de tissus osseux: l'os cortical (compact) et l'os trabéculaire (spongieux).

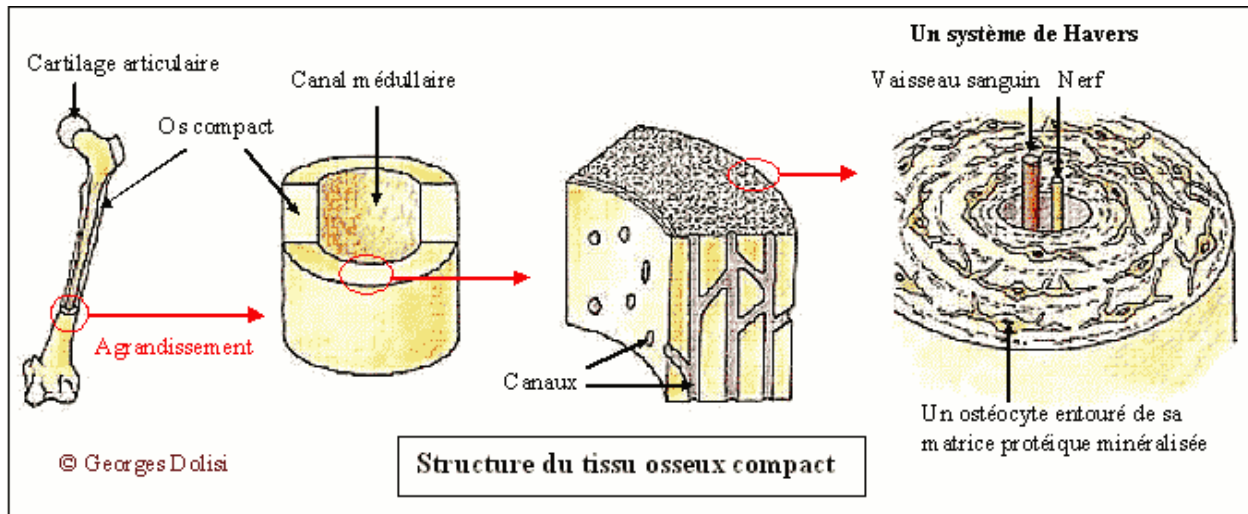


Figure 3: Structure de l'os cortical (Marieb et Hoehn, 2010)

1.1.2.2.1 L'os cortical ou compact

Chez l'être humain, l'os compact ou os cortical constitue 80% de la masse totale des os. Il est très dense, uniforme, lisse et solide. Il présente une très faible porosité et occupe la périphérie de la diaphyse ou corps des os longs. Il est composé d'unités élémentaires cylindriques appelées systèmes de Havers ou ostéons, constitués de lamelles de fibres de collagène concentriques rondes ou ovales juxtaposées comme dans un rouleau de papier (Baqué, 2008). À l'intérieur de chaque canal de Havers, on trouve des nerfs et des vaisseaux sanguins. Chaque canal communique avec les canaux de Volkmann qui sont disposés de manière transverse entre les canaux de Havers (Rieger, 2011).

1.1.2.2.2. L'os trabéculaire ou spongieux

L'os trabéculaire représente 20% de la masse osseuse. Il est composé d'un réseau tridimensionnel de trabécules de tissu osseux. Il est présent dans les extrémités des os longs (les épiphyses), les corps vertébraux et dans la zone de transition entre l'épiphyse et la diaphyse (la métaphyse). Grâce à la moelle emprisonnée dans les alvéoles, il joue un rôle d'amortisseur. Cet os est composé d'une phase organique (les fibres de collagène) qui représente 35% du poids de l'os, une phase minérale constituée de cristaux de calcium (45% du poids osseux) et le reste

constitué essentiellement d'eau. Les os spongieux se situent aux endroits où les os ne subissent pas beaucoup de contraintes comme par exemple au niveau des os coxaux, les côtes, le sternum, la colonne vertébrale et les extrémités des os longs (Outila, 2001; Audran et coll. 2003; Farpour-Lambert et Rizzoli, 2003; Ducher et Blimkie, 2006).

1.1.2.3. Répartition des deux tissus dans le squelette

L'os trabéculaire est fortement présent dans le rachis lombaire. Les vertèbres lombaires et les vertèbres dorsales sont constituées d'os trabéculaire : les premières à plus de 66% et les deuxièmes à plus de 75%. Le col du fémur est constitué de 75% d'os cortical et de 25% d'os trabéculaire tandis que l'avant-bras est constitué de plus de 95% d'os cortical (Mundy, 1999).

L'os cortical ayant une surface d'échange de $3,5\text{m}^2$ représente 80% du tissu osseux, et l'os trabéculaire ayant une surface d'échange de 7m^2 représente 20% du tissu osseux. L'os trabéculaire se renouvelle environ cinq fois plus rapidement que l'os cortical (Mundy, 1999). Pour cette raison, on suggère que la maladie ostéoporotique et la présence des fractures se manifestent cliniquement dans des sites où il existe une proportion relativement importante d'os trabéculaire.

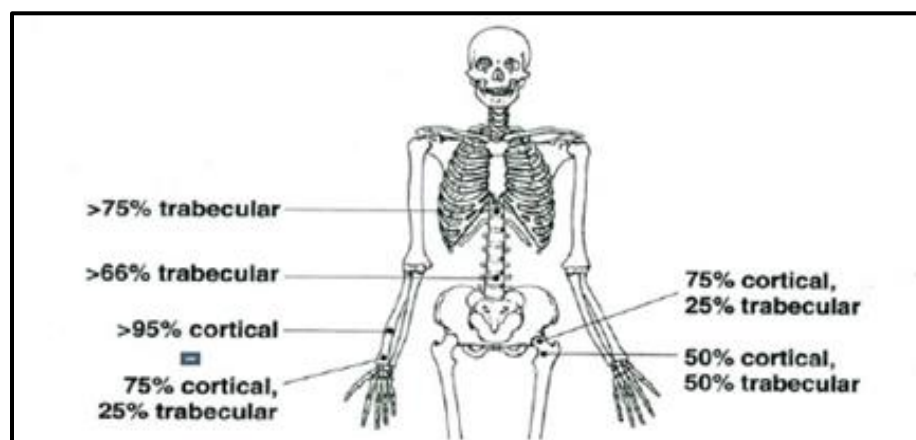


Figure 4: Proportion relative d'os cortical et d'os trabéculaire en différents sites osseux du squelette humain (Mundy, 1999)

1.1.2.4. Composition chimique de l'os

L'os est formé d'une matrice extracellulaire composée de deux constituants:

Les constituants organiques représentent 30% à 35% de la matrice et comprennent des cellules ostéoformatrices (les ostéoblastes, les ostéocytes et les cellules bordantes d'origine mésenchymateuse) et des cellules ostéorésorbantes (les ostéoclastes) qui dérivent de la lignée hématopoïétique macrophagique (Kolta et coll. 2005). La partie organique de cette matrice est l'ostéoïde. L'ostéoïde comprend 95% de fibres de collagène et forme approximativement le tiers de cette matrice extracellulaire (Baron, 2003). Ces substances déterminent la structure de l'os et lui confèrent sa flexibilité et sa résistance à la pression et à la torsion lorsqu'une contrainte mécanique y est appliquée (Kontulainen, 2002).

Les constituants inorganiques représentent 65% à 70% de la matrice et comprennent des sels minéraux comme les fluorures, les sulfates, le carbonate de calcium, le phosphate tricalcique et les chlorures. Cette partie minérale est composée d'hydroxyapatite (Baron, 2003).

1.1.2.5. Les cellules osseuses

Le tissu osseux contient quatre types de cellules: les ostéoblastes, les ostéocytes, les cellules bordantes et les ostéoclastes (Marks et Odgren, 2002).

1.1.2.5.1. Les ostéoblastes

Les ostéoblastes sont d'origine mésenchymateuse. Ces cellules sont ostéoformatrices de forme cubique, attachées entre elles, et possèdent un réticulum endoplasmique, un appareil de Golgi ainsi qu'un grand nombre de ribosomes libres. Ces cellules forment en partie le tissu osseux et ses minéraux donnent à l'os sa résistance et sa dureté. Ils synthétisent l'os neuf par l'intermédiaire des protéines qui constituent une matrice formant le tissu ostéoïde qui se minéralise ensuite (Audran et coll. 2003; Couret, 2004). La matrice ostéoïde comprend des fibres de collagène ainsi que des protéines non collagéniques comme les glycoprotéines et les

protéoglycanes (Compston, 2001; Couret, 2004). Le collagène détermine la structure de l'os et lui donne sa flexibilité ainsi que sa forte résistance aux différentes contraintes.

1.1.2.5.2. Les cellules bordantes

Les cellules bordantes sont des cellules formatrices situées à la surface de l'os. Ces cellules sont reliées entre elles et aux ostéocytes par des gaps nommés « gap junctions » (Miller et coll. 1989). Les gaps permettent aux cellules à la surface et en profondeur de communiquer afin de coordonner leurs actions. Si une cellule de type ostéoblaste est détruite, une cellule bordante est activée.

1.1.2.5.3. Les ostéocytes

Les ostéoblastes qui ne meurent pas par apoptose se transforment en ostéocytes. Les ostéocytes ont un rôle de mécanotransduction et participent au maintien de l'intégrité mécanique de l'os (Vilayphiou, 2012). Les ostéocytes sont situés dans des logettes ou ostéoplastes qui sont reliées par un réseau de canalicules dans lequel circule le fluide extracellulaire (Baron, 2001). Ce sont des cellules de tissu osseux mature sous forme étoilée qui unissent les cellules entre elles.

1.1.2.5.4. Les ostéoclastes

Ces cellules sont responsables de la résorption osseuse. Elles sont d'origine hématopoïétique, multinucléées et de grande taille dont le diamètre varie de 20 à 100 μm . Leur morphologie est caractérisée par une brosse formée par des extensions de la membrane cytoplasmique (Bossard, 1996 et Marieb, 1999). Elles possèdent un nombre important de mitochondries et de lysosomes et sont de type macrophage. Pour exercer leur action, elles doivent s'ancrer à la matrice osseuse (Giudicelli et Souberbielle, 1998). L'ostéoclaste fonctionne d'une façon cyclique en créant des lacunes de résorption. Il se déplace le long de la surface osseuse lors de la résorption osseuse. L'ostéoclaste disparaît après un certain nombre de cycles pour entrer en apoptose (Kanehisa et Heersche, 1988; Zhao et Väänänen, 2002).

1.1.2.6. Le remodelage osseux

Le remodelage osseux est un mécanisme consistant à renouveler l'os ancien ou l'os endommagé par une matrice nouvellement synthétisée (Bala, 2011). Il concerne à la fois l'os cortical et membranaire. On note deux genres de remodelage: le remodelage de fond (ou non ciblé) et le remodelage ciblé qui va représenter de 10% à 20% du remodelage total (Parfitt, 1996, et Burr, 2002). Ce processus de remodelage osseux est nécessaire au maintien de l'homéostasie calcique et à la conservation de l'intégrité du squelette. Cette homéostasie calcique est indispensable pour la conservation des propriétés mécaniques de l'os et la cicatrisation des fractures et micro-fractures.

Le remodelage osseux est soumis à deux boucles de régulation:

- Une boucle de régulation hormonale (PTH, calcitonine et calcitriol) qui permet de maintenir l'homéostasie des minéraux dans le sang, en particulier le calcium.
- Une boucle liée aux contraintes mécaniques agissant sur le squelette. Les propriétés mécaniques de l'os doivent être préservées (Baïotto, 2004).

Dans le tissu osseux, toutes les cellules vont participer et jouer un rôle coopératif au sein d'une unité dynamique nommée « unité multicellulaire de base » (BMU pour Basic Multi cellular Unit) ou « unité de remodelage osseux » (BRU pour Bone Remodeling Unit) (Frost, 1983). Chez les enfants, on suggère que 100% du squelette osseux est renouvelé chaque année contre 10% seulement chez l'adulte (Rico, 1994; Couret, 2004). La chronologie d'un cycle de remodelage dure environ quatre à six mois et comprend différentes phases: la phase de quiescence, la phase d'activation, la résorption par les ostéoclastes, l'inversion, la formation par les ostéoblastes et la phase de minéralisation (Brandi, 2009; Eriksen, 2010).

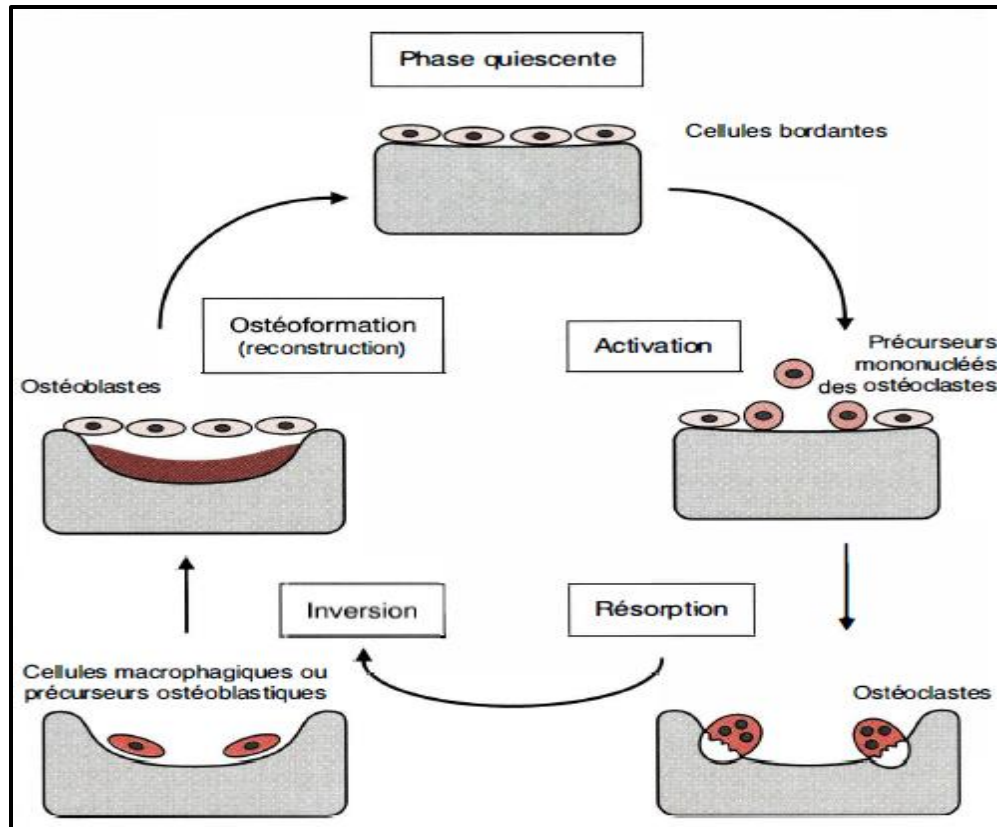


Figure 5: Cycle du remodelage osseux (Marie et De Vernejoul, 1993)

Le modelage diffère du remodelage car la phase de formation de l'os peut intervenir sans processus préalable de résorption. Le modelage peut donc entraîner une importante augmentation de la masse osseuse. Ce processus se produit surtout sur la surface périostée de l'os pendant la croissance. Dans ce cas, le modelage entraîne une importante croissance radiale de l'os.

1.1.2.6.1. Modélisation mécanique du remodelage osseux

En 1892, Wolff décrit que « l'os possède une structure optimale pour résister aux sollicitations mécaniques extérieures et il est capable de maintenir une configuration optimale aux contraintes mécaniques auxquelles il est soumis ». Frost, en 1964, a développé un modèle théorique basé sur les facteurs mécaniques impliqués dans le remodelage osseux. Il suggère que par le concept de MES (Minimum Effective Strain), le remodelage a pour but de minimiser les variations de

déformations subies par l'os. Lorsque l'os est soumis à un changement de régime de contraintes, on perçoit une adaptation au niveau du modelage ou du remodelage; cette adaptation osseuse aux modifications des contraintes est signalée par Frost (Frost, 1987; Frost et coll. 1998) sous la forme d'un mécanostat. Cette théorie a distingué différentes fenêtres correspondant à différentes classes de déformations ou micro déformations osseuses. Pratiquement, si les stimuli mécaniques sont d'ordre physiologique, le mécanostat est en position « off », on note un équilibre entre formation et résorption osseuse et une conservation de la masse osseuse par le remodelage. 1000 $\mu\epsilon$ correspondent à une modification de la longueur de l'os de 0,10% (Frost, 1987). Lorsque les sollicitations mécaniques sont en dehors de la fenêtre physiologique, le mécanostat est en position « on » (Ehrlich et Lanyon, 2002). En cas de contraintes trop faibles ou trop fortes, le remodelage est fortement activé. De plus, on observe une augmentation de la masse osseuse quand les niveaux de contraintes mécaniques sont élevés. L'os devient moins sensible aux contraintes mécaniques avec le temps. En effet, si ces contraintes sont de nouveau appliquées sur la structure osseuse, elles conduiront à une déformation plus faible et donc une réponse osseuse plus faible. Au contraire, la masse osseuse diminue si les contraintes mécaniques diminuent, c'est l'adaptation au nouvel environnement mécanique. Pour Frost, le seuil du modelage appelé aussi « minimum effective strain » se situe environ à 1500 - 2500 $\mu\epsilon$. Le seuil du remodelage est beaucoup plus faible (100 - 300 $\mu\epsilon$). On a une fracture sur des contraintes atteignant 25000 $\mu\epsilon$ (Frost, 1987).

1.1.2.6.2. Différents types d'activités physiques et leurs effets sur le métabolisme osseux

L'activité physique permet une augmentation de la DMO surfacique chez l'enfant du fait des contraintes mécaniques qu'elle exerce sur le tissu osseux. En effet, les études réalisées montrent que les contractions musculaires exercent des contraintes plus importantes sur l'os que le poids du corps (Burr, 1997 ; Schoenau et Frost, 2002). Ainsi, les activités à impacts comme la course, les sauts et la gymnastique stimulent la minéralisation et la formation osseuse. Au contraire, les sports sans impacts, comme la natation et le cyclisme n'ont pas d'effets positifs sur la DMO (Courteix et coll. 1998). L'étude de Ginty et coll. (2005) réalisée sur 128 garçons, pratiquant des activités à impacts au moins 8 heures par semaine, montre que ces enfants ont un CMO du corps entier plus important que ceux inactifs. D'autres études menées chez les adultes pratiquant des

activités en charge montrent également un gain osseux important (Magnusson, 2003). La musculation, par les forces de flexion et de compression qu'elle exerce, induit de bonnes réponses ostéogéniques (Heinonen, 2002). En comparant la DMO des haltérophiles à des sédentaires, il apparaît que les haltérophiles possèdent une DMO supérieure de l'ordre de 10 à 20% (Heinonen, 1995 ; Chilibeck, 1995).

1.1.2.6.3. Rôles du remodelage osseux

Le remodelage osseux assure alors plusieurs fonctions :

- L'adaptation à la croissance
- La conservation des propriétés mécaniques de l'os
- La capacité d'adaptation du corps aux différentes contraintes
- La réparation des fractures
- L'homéostasie du calcium

1.1.2.6.4. La régulation du remodelage osseux

Le remodelage osseux est sous l'influence de nombreux facteurs. En effet, Il existe plusieurs facteurs qui modulent l'expression d'OPG (ostéoprotégérine) et du RANKL (Receptor Activator of Nuclear factor-k B ligand) et donc influencent le remodelage osseux (Marie, 2006). On peut citer parmi eux les facteurs de l'accrétion osseuse et ceux de résorption.

1.1.2.6.4.1. Facteurs stimulant la formation osseuse

- Le calcium, la vitamine D, les stéroïdes sexuels, les androgènes et les oestrogènes. Les oestrogènes jouent un rôle important aussi bien chez les hommes que chez les femmes. Les concentrations d'oestrogène baissent avec l'âge (Cohen-Solal, 2003).

- L'IGF-1 (Insulin-like Growth Factor), l'ostéocalcine et la TGF- β qui est un facteur de croissance ostéoblastique. La TGF- β diminue la prolifération des précurseurs ostéoclastiques et induit leur apoptose (Dentant, 2014).
- L'OPG (ou ostéoprotégérine) est un récepteur soluble du RANK-L, qui désactive l'ODF (Osteoclast Differentiation Factor). Il inhibe l'action du RANK-L en l'empêchant de se fixer sur le récepteur RANK.

1.1.2.6.4.2. Facteurs stimulant la résorption osseuse

- Une baisse d'un ou plusieurs des facteurs cités précédemment accroît la résorption osseuse.
- La parathormone et les cytokines suivantes TNF- α , IL-1, IL-6, IL-11, IL-13, IL-17 sont régulées par les stéroïdes sexuels.
- L'ODF (ou Osteoclast Differentiation Factor) se lie au récepteur membranaire RANK.
- La M-CSF (ou Macrophage Colony Stimulating Factor) et l'ODF induisent la différenciation des monocytes en ostéoclastes (Dentant, 2014).

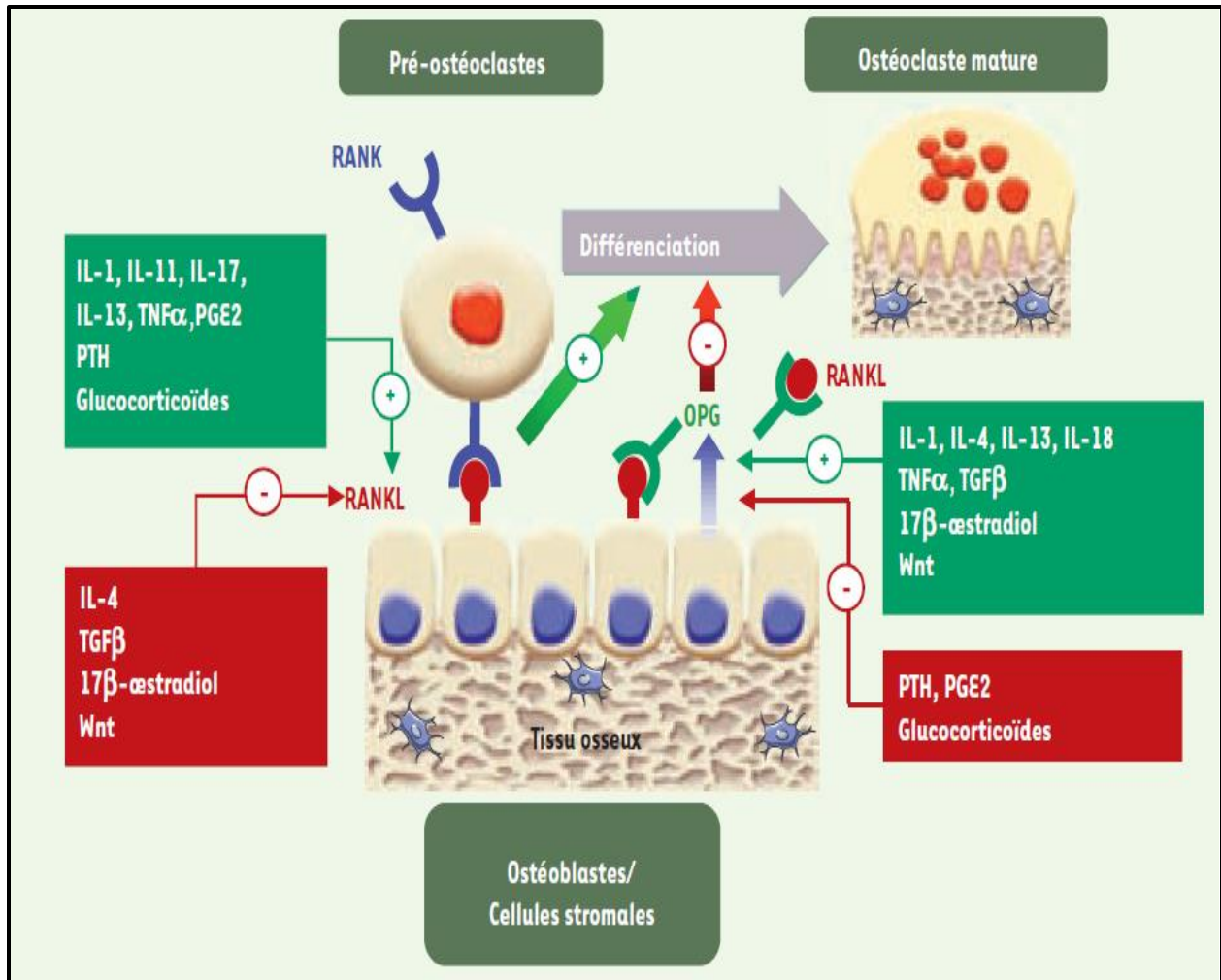


Figure 6: Contrôle du remodelage osseux par le système OPG/RANKL (Marie et Halbout, 2008)

1.2. Physiopathologie de l'ostéoporose

Il est important de distinguer l'ostéoporose primitive (plus fréquente chez la femme) des ostéoporoses secondaires qui sont plus fréquentes chez l'homme (retrouvée dans 50% des cas).

1.2.1. Ostéoporose primitive

A partir de 40 ans, il existe une perte osseuse significative aussi bien chez les femmes que chez les hommes (Sambrook et Cooper, 2006). Cette perte est très significative au niveau de l'os

trabéculaire (Sambrook et Cooper, 2006). Ainsi, la mesure de la DMO lombaire est intéressante au début de la ménopause, étant donné que la perte osseuse prédomine à cette période. A la ménopause, la perte osseuse s'accélère du fait de la carence oestrogénique, avec une perte osseuse rapide qui est estimée à 2% par an pendant 10 ans (Seeman, 2002; Sambrook et Cooper, 2006). Chez certaines femmes, cette perte osseuse peut être plus importante. Après cette phase, la perte osseuse devient plus lente et presque égale dans les deux sexes et s'accélère après 75 ans (Sambrook et Cooper, 2006). En moyenne, la perte osseuse trabéculaire chez la femme entre 20 et 80 ans est de 40% et de 25% chez l'homme (Bouxsein, 2003; Sambrook et Cooper, 2006).

La carence oestrogénique augmente le remodelage osseux et la résorption osseuse induisant un amincissement des corticales et des travées osseuses ainsi que la perforation des travées et la diminution de leurs connexions (Bouxsein, 2003). Ces perturbations expliquent la diminution de la DMO et l'altération de la microarchitecture osseuse corticale et trabéculaire chez les femmes (Bouxsein, 2003; Seeman, 2002).

Chez l'homme, la diminution progressive de la sécrétion des androgènes par les testicules causée par le vieillissement explique la perte osseuse trabéculaire quasiment linéaire avec l'âge (Seeman, 2002). Avec l'âge, l'amincissement des corticales est moins important chez les hommes que chez les femmes (Bouxsein, 2003). En effet, il est bien admis que l'hypogonadisme est associée à une perte osseuse significative (Seeman, 2002).

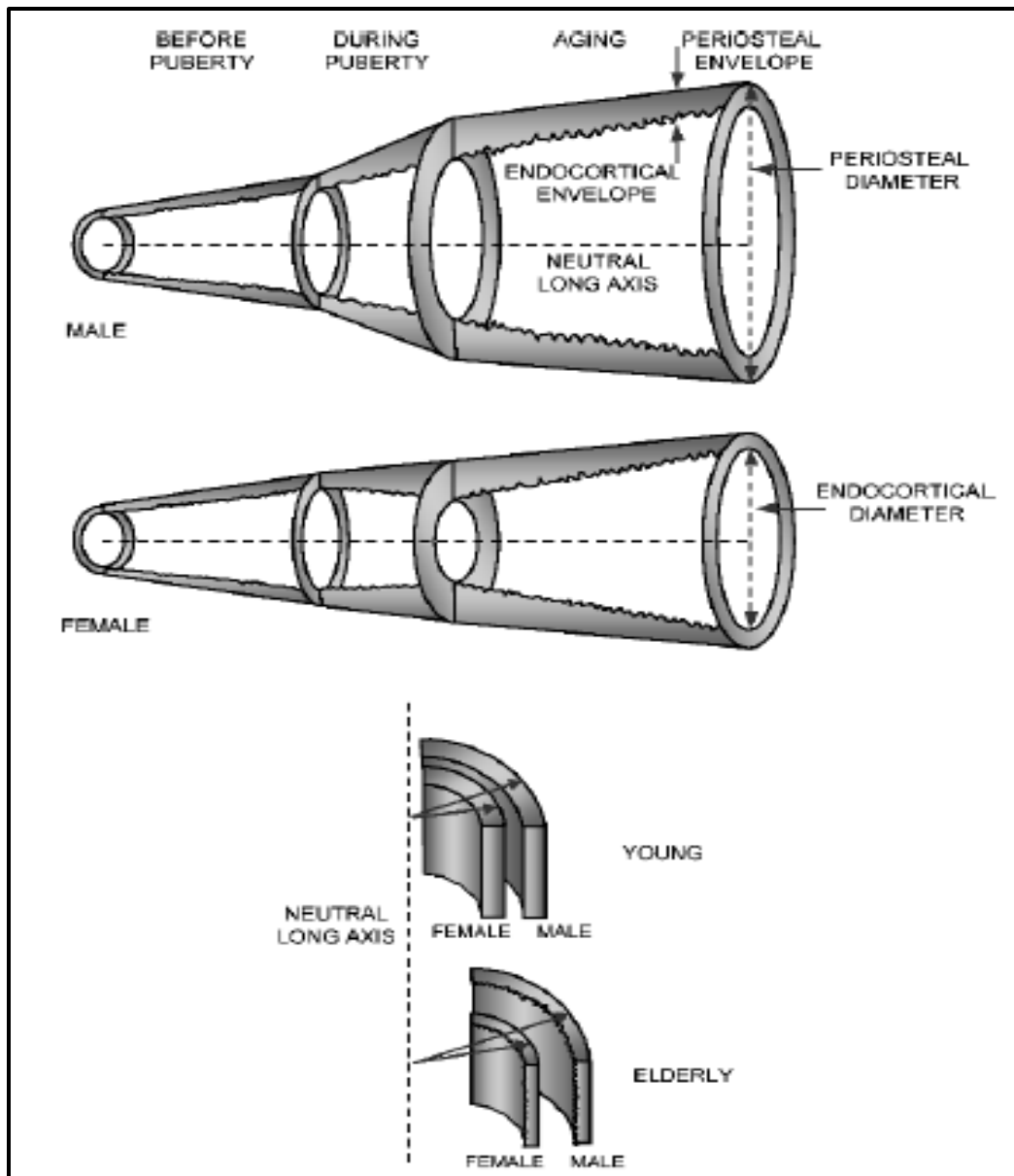


Figure 7: Représentation schématique de l'évolution des surfaces endocorticales et périostées en fonction de l'âge (Duan et coll. 2003)

1.2.2. Ostéoporose secondaire

Cette ostéoporose touche les femmes pré-ménopausées et les hommes âgés. Elle se traduit par une baisse anormale de la masse osseuse (Glaser et Kaplan, 1997). Plusieurs mécanismes conduisent à cette ostéoporose, comme les traitements médicamenteux ou certaines pathologies

qui vont conduire à la détérioration de la microarchitecture osseuse et à la diminution de la DMO (Atlan et coll. 2005). Les principales causes d'ostéoporose secondaire sont :

L'excès de consommation de glucocorticoïdes, l'hyperparathyroïdie, la grossesse, le diabète de type I, la déficience en GH, les pathologies gastro-intestinales, le VIH et certains traitements interagissant avec l'absorption ou l'action de la vitamine D, du calcium, et du phosphore (Hofbauer et coll. 2010). De plus, on ajoute l'anorexie mentale, l'aménorrhée due à la pratique du sport de haut niveau, l'immobilisation, la thalassémie, la dépression, etc. L'ostéoporose masculine est plus rare que l'ostéoporose féminine (Kaufman et Goemaere, 2008). Cependant, la mortalité est plus élevée chez l'homme que chez la femme dans les mois qui suivent une fracture du fémur (Kaufman et Goemaere, 2008).

1.3. Epidémiologie de l'ostéoporose

La prévalence de l'ostéoporose augmente après l'âge de 50 ans en particulier chez la femme. Cette prévalence est estimée à 39% à 65 ans et autour de 70% après 80 ans. Cette maladie concerne à peu près 40% des femmes ménopausées et 15% des hommes après 50 ans. En France, le nombre des fractures de l'ESF (extrémité supérieure du fémur) est estimé à 50000/an, celui du poignet à 35000 et celui des fractures vertébrales à 75000. Les fractures vertébrales sont détectables par radiographie. Ces fractures sont souvent associées à une diminution de la taille des vertèbres (Baddoura et coll. 2007).

L'ostéoporose n'est pas considérée comme un problème majeur de santé publique au Liban même si plusieurs études ont montré que les valeurs de DMO au Liban sont inférieures par rapport à celles retrouvées dans les pays européens et aux USA (El-Hajj Fuleihan et coll. 2008; El Hage et coll. 2011a). La prévalence de l'ostéopénie à la hanche dans la région de Beyrouth est estimée à 51% chez les femmes et 56,6% chez les hommes (Baddoura et coll. 2007; Baddoura et coll. 2011). Dans la même population, la prévalence de l'ostéoporose est de 33% chez les femmes et 22,7% chez les hommes (Baddoura et coll. 2007; Baddoura et coll. 2011).

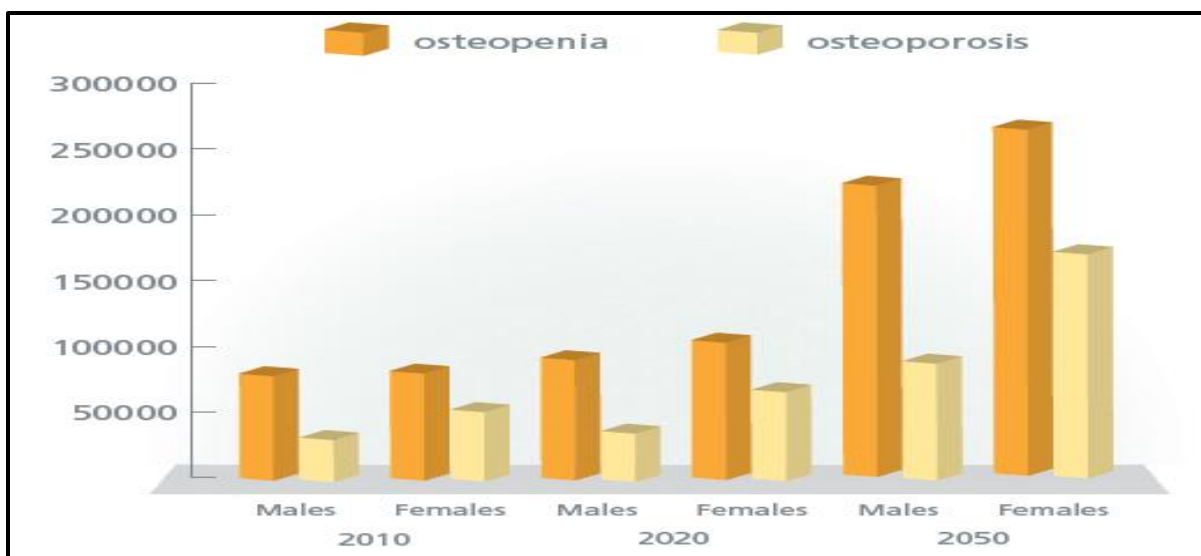


Figure 8: Incidence de l'ostéoporose et de l'ostéopénie au Liban (The Middle East and Africa audit, 2011)

Les fractures de l'ESF ont lieu chez des sujets relativement plus jeunes au Liban comparé aux populations occidentales (Baddoura, 2001). 60% des patients ayant une fracture de l'ESF ont une ostéopénie (Baddoura, 2001). Plusieurs études ont été menées au Liban afin d'explorer la prévalence des fractures de la hanche (Baddoura, 2001; Sibai et coll. 2011; Maalouf et coll. 2013).

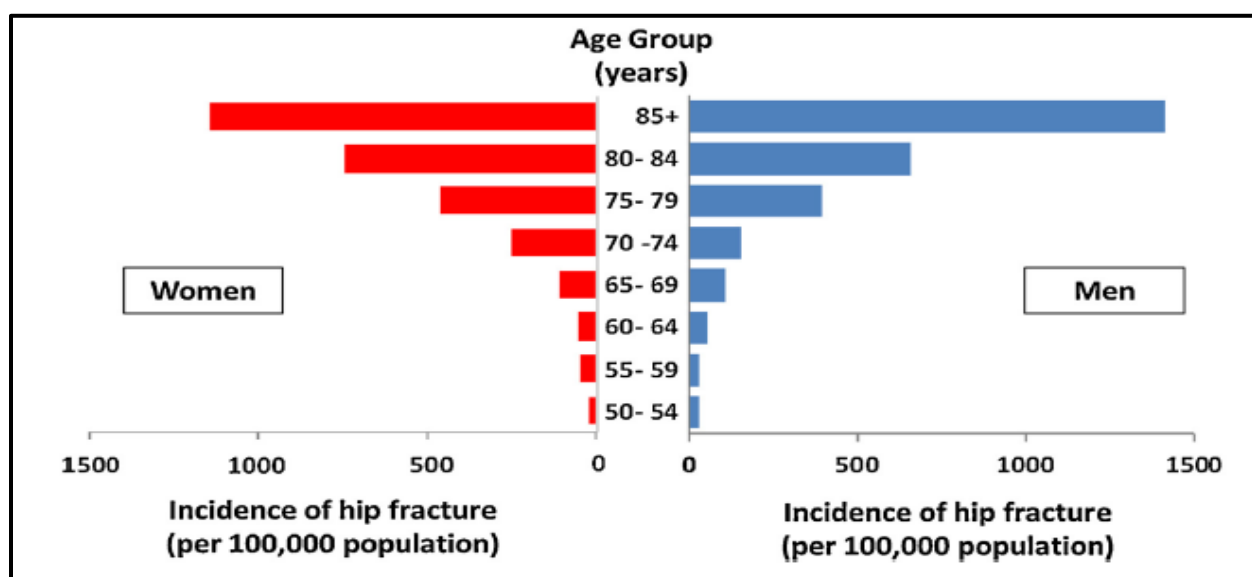


Figure 9: Incidence fracturaire de la hanche au Liban (Maalouf et coll. 2013)

Les fractures ostéoporotiques ne concernent pas seulement la hanche, le rachis lombaire et l'avant-bras (Chang et coll. 2004). En pratique clinique, toute fracture qui survient après un traumatisme à bas niveau d'énergie doit évoquer un cas d'ostéoporose sauf en cas de fracture du crâne, du rachis cervical, des doigts et des orteils. Les fractures à l'humérus, au tibia, au bassin et aux cotes sont considérées comme des fractures ostéoporotiques. A noter que les fractures au niveau du bassin entraînent une mortalité plus importante que celle due à des fractures du col fémoral. Les fractures ostéoporotiques induisent une altération de la qualité de vie et sont associées à un excès de morbidité et de mortalité (en particulier les fractures de l'ESF qui sont les plus dangereuses).

1.4. Prévention de l'ostéoporose

1.4.1. Prévention non médicamenteuse

1.4.1.1. Maintien d'un IMC normal

L'IMC est un déterminant positif de la DMO (Reid, 2010). Un faible IMC est corrélé à un risque élevé d'ostéoporose (Reid, 2010). Les sujets en sous poids ont ainsi un risque élevé de fracture (Rosen et Klibanski, 2009).

1.4.1.2. Lutte contre le tabagisme et l'alcoolisme

L'excès de consommation d'alcool influence négativement le métabolisme osseux par plusieurs mécanismes bien connus (Maurel et coll. 2012). Le tabagisme est aussi corrélé à une diminution significative de la DMO (Johnston, 1994).

1.4.1.3. Apports adéquats en calcium et vitamine D

Une carence en calcium et en vitamine D est un facteur prédictif de l'ostéoporose. Des apports adéquats doivent être assurés pour le maintien d'une bonne santé osseuse.

Tableau 1: Apports en calcium et en vitamine D conseillés pour la population Française (AFFSA, 2001)

Apports nutritionnels conseillés en calcium et en vitamine D pendant la croissance		
	Calcium mg par jour	Vitamin D µg par jour
0-6 mois	400	20-25
6-12 mois	500	20-25
1-3 ans	500	10
4-6 ans	700	5
7-9 ans	900	5
10-12 ans	1200	5
13-19 ans	1200	5**

Il faut aussi signaler dans ce cadre que la carence en vitamine D est beaucoup plus fréquente que celle en calcium.

1.4.1.4. Activité physique

L'inactivité physique est corrélée à un risque accru d'ostéoporose. En effet, la pratique d'activité physique à impacts a des effets bénéfiques sur la DMO, la géométrie osseuse et la microarchitecture osseuse. Les effets de l'activité physique sur la DMO dépendent du type et de l'intensité de l'exercice, de la durée de pratique et surtout de l'âge et du stade pubertaire du pratiquant (Kelley et coll. 2013).

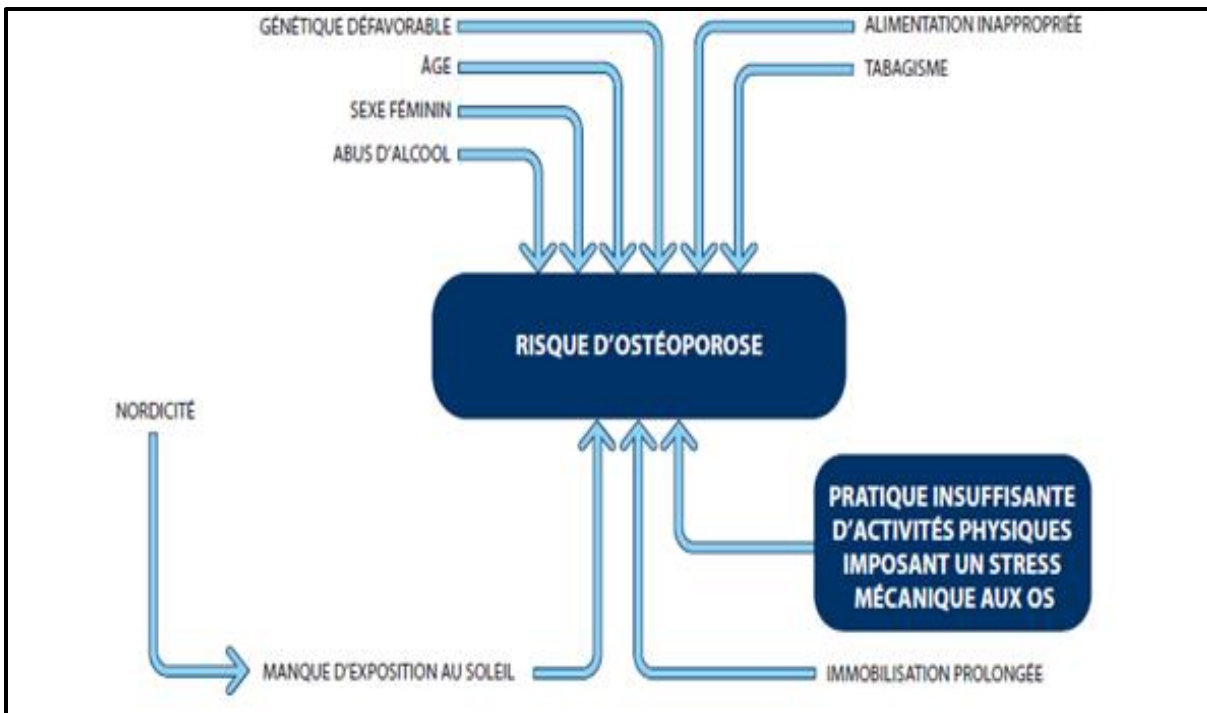


Figure 10: Certains facteurs de risque d'ostéoporose sont liés aux habitudes de vie (Blanchet, 2008)

1.4.2. Prévention médicamenteuse

Trois types de médicaments sont utilisés pour la prévention médicamenteuse de l'ostéoporose : le traitement hormonal substitutif, les bisphosphonates (l'alendronate, l'ibandronate et le risédronate) et le raloxifène. Notons cependant que la prévention médicamenteuse de l'ostéoporose tient une place limitée.

2. Les méthodes d'évaluation de la densité minérale osseuse

Différentes techniques et méthodes sont disponibles actuellement pour pouvoir mesurer les principaux paramètres du tissu osseux comme la DMO, la microarchitecture osseuse, la géométrie osseuse et les indices de résistance osseuse.

2.1. Absorptiométrie biphotonique à rayons-X (DXA)

2.1.1. Caractéristiques générales

L'ostéodensitométrie (DXA) est un examen médical permettant de mesurer la densité minérale osseuse (DMO g/cm^2) afin d'évaluer la solidité du squelette et par suite diagnostiquer l'ostéoporose avant la survenue probable de la fracture.

La DXA a une très bonne reproductibilité. L'examen est fiable, non invasif, faiblement irradiant (1 à 5 μSv seulement) avec un temps d'acquisition court (autour de 3 min) (Haymann, 2010). Cette mesure se réalise à l'aide de deux faisceaux de rayon X d'énergies différentes sur les sites osseux comme le corps entier, le rachis lombaire, la hanche et l'avant-bras (Kolta, 2008). Des électrons libres sont accélérés dans un tube à rayons X et rentrent en collision avec une cible en tungstène, ce qui produit un rayonnement X. L'absorption des photons dépend de l'énergie du rayonnement X et du coefficient d'absorption du matériau traversé et définie par la loi de Lambert-Beer (Ducher, 2005).

Concernant les résultats de la DXA:

- La densité minérale osseuse (DMO) est exprimée en g/cm^2 ;
- Le Z-score est le nombre d'écarts types entre la valeur du sujet et la valeur moyenne des adultes de même sexe et même âge.
- La densité osseuse, comme toute variable biologique, a une répartition gaussienne. Par conséquent, 95% des individus ont une valeur de densité située entre $Z = + 2$ et $Z = - 2$;
- Le T-score est le nombre d'écarts types entre la valeur du sujet et la valeur moyenne des adultes jeunes de même sexe.

2.1.2. Les limites

- Le type d'appareillage, l'opérateur et la position allongée du patient modifient la valeur de la DMO.

- La marque de l'appareil joue un rôle important sur les mesures de références de la population étudiée (les bases de références sont utilisées pour le calcul du T score).
- Les mesures chez les sujets obèses présentent des limites techniques compte tenu de l'épaisseur du tissu mou autour des zones de mesures (rachis lombaire et hanche) (Bolotin et coll. 2001).
- La DMO mesurée par DXA a une nature 2D alors que la vraie densité de l'os est 3D (Katzman et coll. 1991; Bonnick, 2007).
- La DXA ne permet pas de distinguer la masse grasse viscérale de la masse grasse sous-cutanée or ces deux différentes composantes de la masse grasse ont des effets différents sur la DMO (Gilsanz et coll. 2009).
- La DMO surfacique mesurée par DXA est influencée par la taille des os contrairement à la vraie DMO volumétrique (Katzman et coll. 1991).

2.1.3. Les paramètres osseux mesurés

2.1.3.1. Le CMO et la DMO

La DMO est fortement corrélée à la résistance biomécanique de l'os (Amman et Rizzoli, 2003). En pratique clinique, la DMO reste le meilleur déterminant du risque fracturaire comme déjà démontré par plusieurs études (Marshall et coll. 1996 ; Melton et coll. 1998).

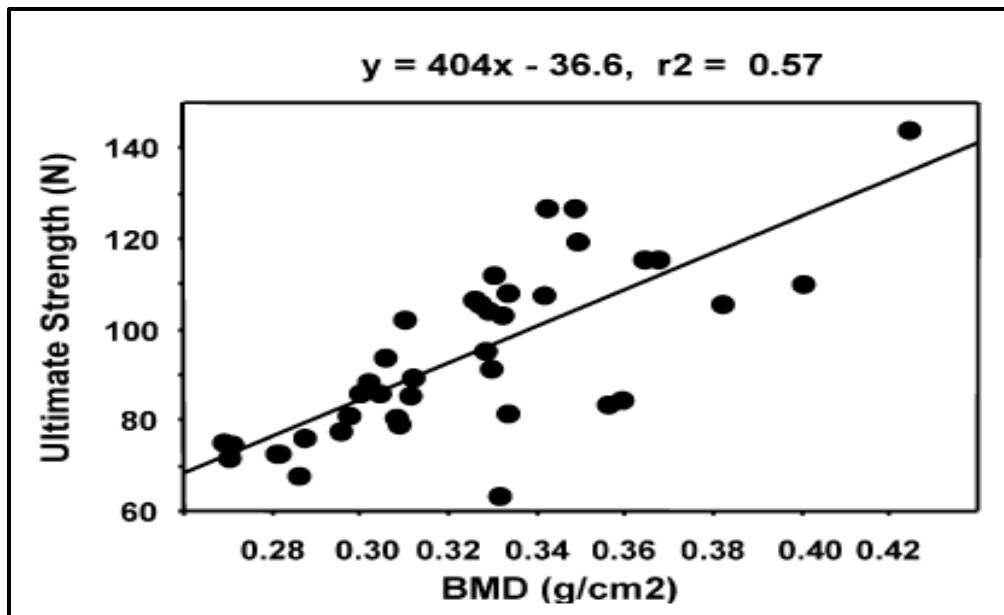


Figure 11: Relation entre la DMO et la résistance biomécanique de l'os (Amman et Rizzoli, 2003)

La densité minérale osseuse apparente (DMOA) est une estimation de la DMO volumétrique et peut être calculée à partir de la DMO surfacique et des dimensions osseuses (Katzman et coll. 1991). Cependant, l'utilisation clinique de la DMOA chez les personnes âgées n'apporte pas d'avantages en termes de prédiction du risque fracturaire (Melton et coll. 1998). D'autre part, les indices osseux suivant ont été introduits par Karlamangla et coll. (2004) afin d'estimer la résistance osseuse du col fémoral :

- CSI: Compression Strength Index ou indice de force en compression. Ce paramètre est calculé de la manière suivante: DMO du col fémoral * largeur du col fémoral / poids corporel (Karlamangla et coll. 2004). Cet indice reflète l'habileté du col fémoral à résister à la charge axiale en compression et il est prédictif des fractures ostéoporotiques chez les personnes âgées (Ayoub et coll. 2014 ; Karlamangla et coll. 2004). Chez les jeunes adultes, le CSI est négativement corrélé au poids corporel et à l'IMC mais positivement corrélé à la concentration sérique en vitamine D (Alwan et coll. 2016; Berro et coll. 2016; El Khoury et coll. 2016b). D'autre part, la pratique du football est associée à des valeurs élevées de CSI chez les jeunes adultes (El Hage, 2014; El Hage et coll. 2014d). Une

étude menée chez des enfants âgés en moyenne de 9 ans a montré une corrélation positive entre le niveau d'activité physique et le CSI (Sardinha et coll. 2008).

- BSI: Bending Strength Index ou indice de force en flexion. Il est calculé d'après Karlamangla et coll. (2004) de la manière suivante: $(\text{DMO du col fémoral} * \text{largeur du col fémoral}^2) / (\text{longueur de l'axe de la hanche} * \text{poids})$. Il reflète l'habileté du col fémoral à résister à la force en flexion et il est prédictif de la fracture ostéoporotique chez les personnes âgées (Karlamangla et coll. 2004; Faulkner et coll. 2006; Li et coll. 2013).

Tableau 2: Risque relatif de fracture ostéoporotique pour chaque augmentation d'une déviation standard de la DMO après ajustement pour l'âge et l'IMC (Karlamangla et coll. 2004)

Predictor	Relative risk (95% confidence interval)	P-Value
Bone density		0.0013
Composite strenght measures		
Compression strenght index	0.39 (0.25, 0.60)	<0.0001
Bending strenght index	0.43 (0.27, 0.70)	0.0007
Impact strenght index	0.34 (0.20, 0.58)	<0.0001

Chez les jeunes adultes, le BSI est comme le CSI positivement corrélé à la concentration sérique en vitamine D mais négativement corrélé au poids corporel et à l'IMC (Alwan et coll. 2016 ; Berro et coll. 2016; El Khoury et coll. 2016b).

- ISI: Impact strength index ou indice de force aux contraintes. Cet indice est calculé de la manière suivante : $(\text{DMO CF} * \text{Largeur CF} * \text{longueur de l'axe de la hanche}) / (\text{taille} * \text{poids})$ (Karlamangla et coll. 2004). Sardinha et coll. (2008) ont montré que le niveau d'activité physique est positivement corrélé à cet indice chez des enfants.

Il apparait dans la figure suivante que tous ces indices ont une capacité discriminante des fractures ostéoporotiques chez les personnes âgées (Ayoub et coll. 2014; Karlamangla et coll. 2004).

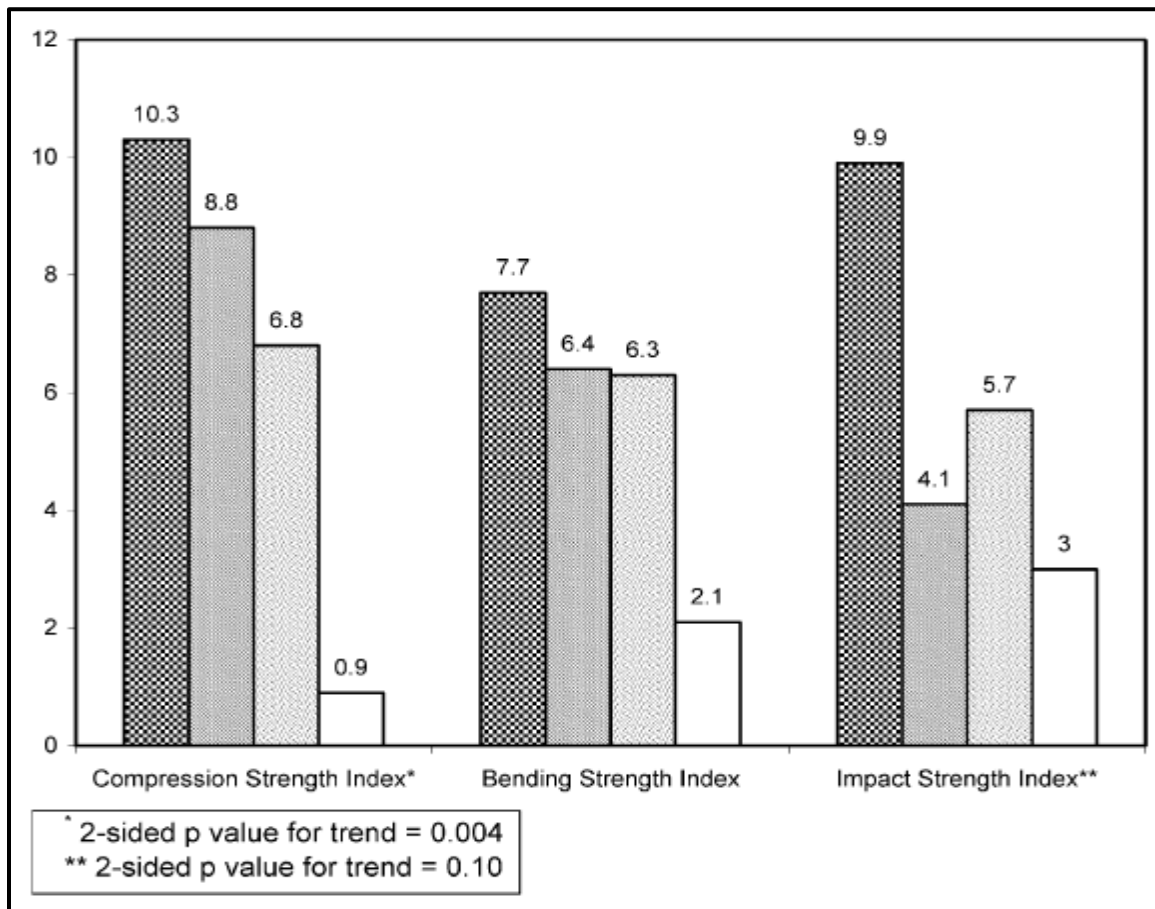


Figure 12: Le risque de fracture de la hanche par quartile de CSI, BSI et ISI (Karlamangla et coll. 2004)

2.1.3.2. Le TBS

C'est un indice de texture osseuse mesuré au niveau du rachis lombaire. Cet indice est corrélé à certains paramètres de la microarchitecture osseuse (BV/TV et SMI) mais ne permet pas de mesurer objectivement la microarchitecture osseuse. Le TBS est élevé chez les sujets pratiquant des activités physiques à impacts biomécaniques élevés (Heiniö et coll. 2015). Par ailleurs, le TBS est corrélé positivement à la DMO mais la force d'association entre ces deux paramètres dépend de la population choisie.

Tableau 3: Valeurs de TBS en fonction de la spécialité sportive (Heiniö et coll. 2015)

Group	TBS (unitless)	BMD (g/cm²)
Hight- impact	1.46 (0.06) [1.328 – 1.548]	1.44 (0.12) [1.190 – 1.624]
Odd- impact	1.45 (0.07) [1.296 – 1.556]	1.32 (0.09) [1.224 – 1.564]
Hight- magnitude	1.48 (0.07) [1.337 – 1.588]	1.32 (0.14) [1.123 – 1.586]
Repetitive impact	1.35 (0.07) [1.189 – 1.450]	1.15 (0.13) [0.885 – 1.352]
Repetitive non-impact	1.43 (0.07) [1.292 – 1.542]	1.22 (0.13) [0.997 – 1.471]
Reference	1.44 (0.06) [1.275 – 1.540]	1.17 (0.12) [0.899 – 1.391]

D'autre part, les études menées chez les personnes âgées montrent que le TBS a une capacité discriminante des fractures ostéoporotiques (Pour revue voir Bousson et coll. 2015).

2.1.3.3. Les indices géométriques de résistance osseuse de la hanche

Plusieurs indices géométriques de résistance osseuse évalués au niveau du col fémoral, de la région inter-trochantérienne et de la diaphyse fémorale ont été introduits par Beck et coll. (1990).

Ces indices sont corrélés à la résistance mécanique de l'os et sont prédictifs de la fracture ostéoporotique chez les personnes âgées (Beck, 2007; Kaptoge et coll. 2008; LaCroix et coll. 2010).

- La CSA ou surface de section transversale est un index de la résistance osseuse en compression. Elle est corrélée positivement à la résistance mécanique de l'os.
- Le CSMI ou moment d'inertie de la surface transversale est un index de rigidité structurale de l'os. Il est corrélé positivement à la résistance mécanique de l'os.
- Le module de section (Z) est un index de la résistance en flexion. Il est corrélé positivement à la résistance mécanique de l'os.
- L'épaisseur corticale est corrélée positivement à la résistance mécanique de l'os et prédictive de la fracture ostéoporotique chez les femmes ménopausées.

- Le Buckling Ratio (BR) est un index de stabilité corticale à la déformation. Il est corrélé négativement à la résistance mécanique de l'os mais prédictif de la fracture ostéoporotique chez les femmes ménopausées.

2.2. L'imagerie à résonnance magnétique (IRM)

L'imagerie à résonnance magnétique (IRM) est une technique extrêmement complexe qui permet d'obtenir des images du tissu osseux. Le principe de cette machine repose sur le fait qu'elle utilise des champs magnétiques de l'ordre de 1.5 T pour évaluer la microstructure osseuse (Cowin, 2001). Ce champ (en Tesla) est créé par un aimant qui peut avoir différentes formes: un tunnel ou deux disques représentant les pôles de l'aimant. L'IRM permet d'imager les tissus mous tels que la moelle osseuse, la graisse et les muscles (Cowin, 2001). Cette technique non ionisante, nous donne des images 3D des structures du corps (Bauer et Link, 2009). Comme la plupart des tissus solides, en IRM, l'os paraît en foncé à cause de la faible quantité de protons et la durée de relaxation rapide. Cette technique est intéressante surtout dans la mesure où elle permet d'explorer les interactions entre l'os et les muscles (Schmidt et coll. 2007).

2.3. Ultrasonométrie

L'ultrasonométrie est une technique de mesure quantitative. Les deux principales variables mesurées par cet outil sont la vitesse du son (SOS) et le taux de variation de l'atténuation en fonction de la fréquence d'une onde ultrasonore (BUA).

Plusieurs études ont exploré les liens entre les paramètres ultrasonores et la DMO (Chappard, 2005; Laugier, 2000). Une étude menée sur 117 hommes ostéoporotiques, ostéopéniques et normaux, a montré une forte corrélation entre la BUA et la DMO au niveau du rachis lombaire, du col fémoral et du radius. D'autres études ont également montré des corrélations importantes entre les paramètres ultrasonores et la DMO mesurée par DXA (Gluer, 2004; Wu, 1998). La BUA mesurée au talon (site riche en os trabéculaire) est très fortement corrélée à la DMO (Hans et coll. 1996; Laugier, 2006). D'autre part, la vitesse ultrasonore corticale est corrélée à la DMO mais elle est aussi influencée par d'autres variables comme l'épaisseur et la surface de la section

transversale corticale (Laugier, 2006). La plupart des études s'accordent actuellement pour dire que les paramètres ultrasonores ne reflètent pas la microarchitecture osseuse.

2.4. La radiographie

La radiographie est une technique d'imagerie qui permet de visualiser une partie du squelette par projection du rayon X sur un film photosensible plus élevé qu'en DXA ou sur un écran fluorescent. Cet examen est facilement réalisé et non douloureux. Les rayons X vont être absorbés par les tissus et recueillis sur une pellicule photosensible située derrière le patient permettant d'avoir un très bon contraste du tissu et une réflexion de la microarchitecture osseuse (Apostol et coll. 2006; Guggenbuhl et coll. 2006). Ainsi, plusieurs méthodes ont été proposées permettant une observation entre des paramètres de texture 2D et des mesures d'architectures 3D conduisant à de bonnes corrélations grâce à des techniques d'analyse de texture (Bauer et Link, 2009). Cette méthode nous permet d'avoir des informations complémentaires à celles apportées par la DMO surfacique et va donc aider à explorer le risque de fractures (Benhamou et coll. 2001).

2.5. La tomographie

La tomographie ou scanner médical, est une technique de radiographie permettant d'explorer visuellement le corps humain. Cette technique de mesure utilise un système de rotation synchronisé qui inclut une source et un détecteur de rayons X tournant tout autour du patient. Ce scanner permet d'obtenir une série de coupes radiographiques permettant de voir en 3D les zones soumises au rayonnement. En utilisant le fantôme d'hydroxyapatite, on ajoute au scanner une dimension quantitative qui va permettre d'établir la correspondance entre l'atténuation des rayons X et la densité osseuse (DMO) exprimée en g/cm^3 . De ce fait, il est donc possible de bien distinguer l'os cortical de l'os trabéculaire. Dans ce cas, on parle de « quantitative CT, ou QCT Quantitative Computed Tomography » (Carter, 1992; Bouxsein, 2008).

Des scanners pour les zones périphériques (pQCT) existent également. A titre d'exemple, il est possible de mesurer l'enveloppe corticale, l'épaisseur osseuse, la surface et la densité osseuse du

radius (Roux, 2003). Signalons que cet outil est peu utilisé en pratique clinique et est globalement utilisé dans le domaine de la recherche (Roux, 2003).

Tableau 4: Intérêts et limites des outils d'investigations des paramètres osseux in vivo (Ducher et Blimkie, 2006)

Outils	Paramètres accessibles	Intérêts	Inconvénients
DXA	Densité minérale surfacique (g/cm^2) ; surface osseuse de projection (cm^2), géométrie osseuse (par calcul mathématique)	Rapide ; relativement accessible ; peu irradiant (0,001 à 0,003 mSv) ; mesure au corps entier ou bien site-spécifique ; évaluation de la composition corporelle	Méthode 2D alors que l'os est une structure de 3D
IRM	Densité minérale osseuse volumique totale (associée à la DXA) ; géométrie osseuse ; paramètres microarchitecturaux apparents	Non irradiant ; pas de limites des sites analysés (avec une antenne spécifique) ; évaluation de la section transversale musculaire ; libre orientation des plan de coupe	Pas de mesure du contenu minérale osseux ; artéfacts de mouvements ; faible accessibilité ; cout élevé ; effets des ondes de radiofréquence sur la santé ? Irradiant (0,05 mSv pour le rachis ; faible accessibilité cout élevé
QCT	Géométrie osseuse ; densités minérales osseuses volumiques totale, trabéculaire et corticale ; paramètres microarchitecturaux apparents	Distinction du tissu cortical et du tissu trabéculaire dans l'évaluation de la densité minérale osseuse	
pQCT	Idem QCT	Idem QCT ; outil offrant la meilleure résolution pour imager la microarchitecture osseuse trabéculaire in vivo, peu irradiant (0,001 mSv pour le radius)	
US	Vitesse (SOS) et atténuation (BUA) de l'onde	Non irradiant ; rapide et accessible	

DXA : Absorptiométrie biphotonique à rayons-X ; IRM : Imagerie par résonance magnétique: QCT : Tomographie ; Pqct : Tomographie pour les zones périphériques ; US : Ultrasonométrie

3. Le pic de masse osseuse

3.1. Importance du pic de masse osseuse

La perte osseuse moyenne par an est relativement constante et peut être suivie correctement chez une personne (Melton et coll. 2005). Ainsi, de fortes corrélations ont été retrouvées entre la DMO basale et la DMO mesurée 22 ans après chez des femmes âgées de 2 à 94 ans (Melton et coll. 2005). Cette notion de « suivi » est extrêmement importante car elle a des applications cliniques. Premièrement, la prédiction du risque fracturaire basée sur une seule mesure de DMO reste fiable. Deuxièmement, malgré le fait que la DMO diminue avec l'âge, le Z-score d'un sujet varie très peu au cours de la vie (Melton et coll. 2005).

Les études épidémiologiques ont montré que l'augmentation du pic de masse osseuse ou de la densité minérale osseuse (DMO) de 10 pour cent (1 déviation standard) peut diminuer le risque fracturaire d'à peu près 50 pour cent après la ménopause (Cummings et coll. 1993; Marshall et coll. 1996; WHO, 1994). En parallèle, un calcul mathématique a montré que l'augmentation du pic de masse osseuse de 10% peut retarder l'apparition de l'ostéoporose de 13 ans (WHO, 1994).

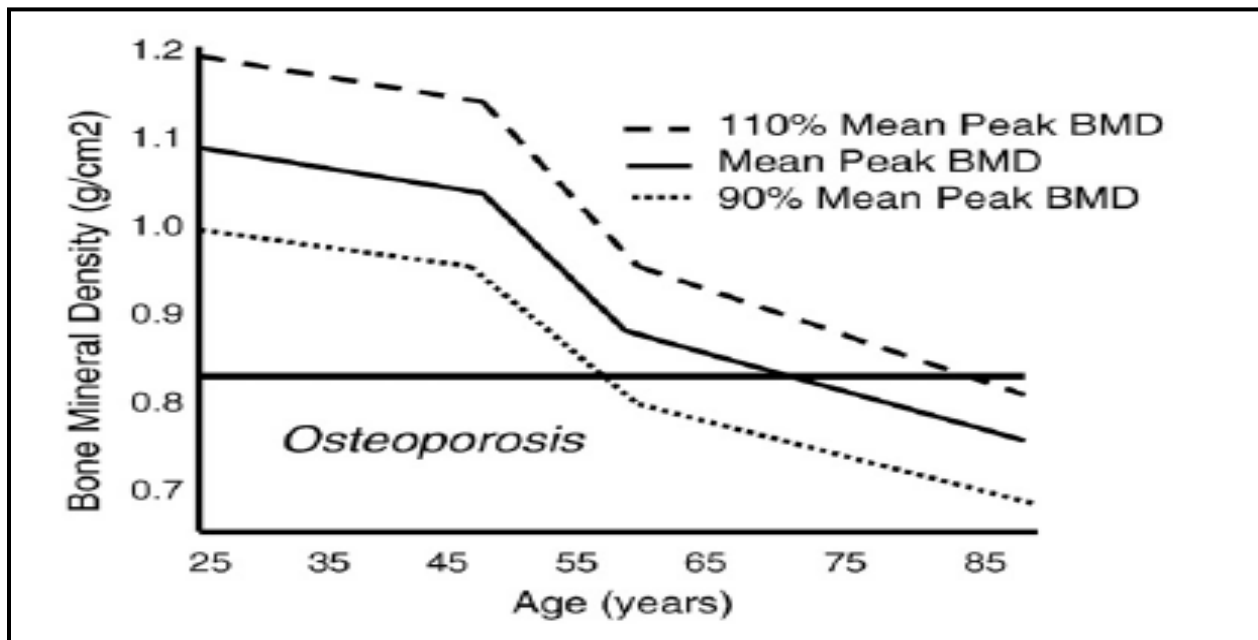


Figure 13: Pic de DMO à l'âge de 25 ans et apparition de l'ostéoporose plus tard dans la vie (Rizzoli et coll. 2010)

D'autre part, l'augmentation de l'âge de la ménopause de 10 pour cent peut retarder l'apparition de l'ostéoporose de 2 ans uniquement (Hernandez et coll. 2003). A partir de ces résultats, nous pouvons dire que la masse osseuse atteinte à la fin de la période d'acquisition est plus importante que la perte osseuse liée avec l'âge. Ainsi, le pic de masse osseuse est le facteur le plus important pour la prévention de l'ostéoporose plus tard dans la vie (Hernandez et coll. 2003). Il existe des arguments montrant que le risque fracturaire après l'âge de 60 ans est en relation directe avec les propriétés biomécaniques et structurales de l'os acquises durant les trois premières décennies de la vie (Duan et coll. 2005). Cette relation est applicable au niveau des vertèbres mais aussi au niveau du col fémoral (Duan et coll. 2005; Zebaze et coll. 2007). Ces résultats renforcent l'idée que l'augmentation du pic de masse osseuse constitue le moyen le plus efficace pour la prévention de l'ostéoporose et des fractures ostéoporotiques liées au vieillissement (Bonjour et coll. 2009).

3.2. Les déterminants du pic de masse osseuse

Plusieurs facteurs interconnectés influencent l'acquisition de la masse osseuse durant la croissance (Bonjour et coll. 2009 ; Rizzoli et coll. 2010). Les déterminants physiologiques du pic de masse osseuse incluent les facteurs héréditaires, la vitamine D, les apports nutritionnels en calcium et en protéines, les facteurs endocriniens (hormones sexuelles, IGF-1 et le $1,25\text{ (OH)}_2\text{D}$) et les facteurs mécaniques (activités physiques à impacts et poids corporel). D'un point de vue quantitatif, les facteurs génétiques semblent être les déterminants les plus importants.

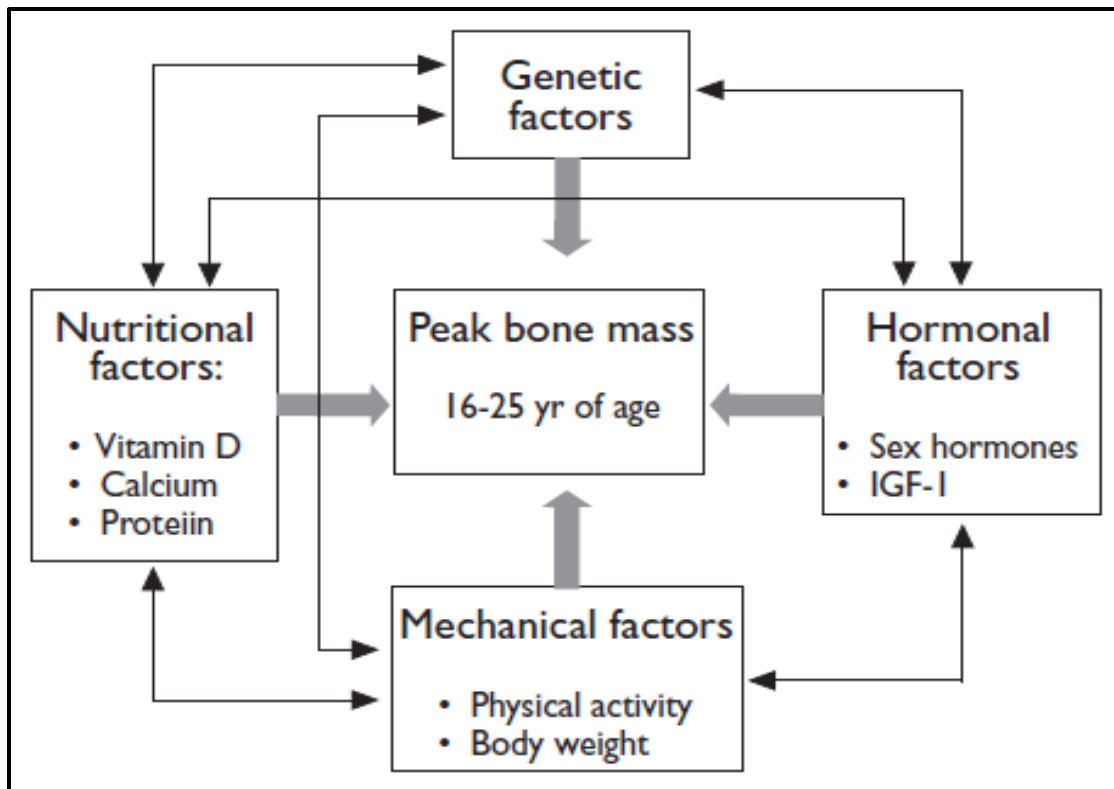


Figure 14: Les déterminants physiologiques du pic de masse osseuse et leurs interconnexions (Bonjour et coll. 2009).

3.2.1. Les facteurs génétiques

Les gènes responsables de l'acquisition de la masse osseuse sont nombreux: VDR, collagène de type 1, récepteur des estrogènes, IGF-1, IL-6, TGF- β , LRP5, leptine et BMP2 (Alos et Rauch, 2009). Il apparait que les facteurs génétiques expliquent 60 à 80 pour cent de la variabilité de la masse osseuse chez l'adulte (Bonjour et coll. 2009; Eisman, 1999). L'influence de ces facteurs génétiques sur la masse osseuse est médiée par les dimensions du squelette et la masse musculaire. Cet effet génétique est plus fort au niveau du rachis lombaire qu'au niveau du col fémoral (Eisman, 1999). Il est possible que les facteurs mécaniques (activité physique, poids corporel et force musculaire) exercent un effet plus important sur l'os cortical du col fémoral que sur l'os trabéculaire des vertèbres lombaires expliquant ainsi le fait que le col fémoral soit relativement moins influencé par les facteurs génétiques (Bonjour et coll. 2009). Malgré

l'influence majeure des facteurs génétiques sur la DMO, les facteurs environnementaux jouent également un rôle important car ils peuvent expliquer 20 à 40 pour cent de la variabilité de la masse osseuse chez l'adulte (Eisman, 1999).

3.2.2. Les facteurs hormonaux

L'augmentation de la masse osseuse à l'adolescence dépend en grande partie des facteurs hormonaux (Alos et Rauch, 2009). Durant la croissance, l'hormone de croissance (GH) joue un rôle primordial dans l'augmentation de la masse osseuse (Alos et Rauch, 2009). De même, lors de l'adrénarchie, l'augmentation des androgènes surrénaliens présente aussi des bénéfices pour l'augmentation de la masse osseuse chez les garçons et chez les filles (Alos et Rauch, 2009). En effet, durant la puberté, l'augmentation des taux de GH et d'IGF-1 est considérable pour les 2 sexes. Cette augmentation conduit à une ostéoformation et une modification de la taille et de l'épaisseur des os longs (Alos et Rauch, 2009). Chez les filles, l'accumulation de l'os endocortical est favorisée par l'influence des oestrogènes. A noter qu'il y a des interactions entre la leptine et les œstrogènes à la puberté (Matkovic et coll. 1997). La ménarche ne dépend pas seulement d'un seuil de pourcentage de masse grasse mais également d'un seuil de leptinémie (Frisch et coll. 1970; Hamrick et Ferrari, 2008; Matkovic et coll. 1997). Chez les garçons, les hormones sexuelles et l'IGF-1 conduisent au développement musculaire et favorisent la croissance osseuse périostée (Seeman, 2001). Le développement de la masse osseuse durant la croissance est dû essentiellement à une augmentation des dimensions osseuses. En effet, il y a peu de changements au niveau de la quantité du tissu minéralisé dans l'enveloppe. A la puberté, les différences inter-sexes au niveau de la masse osseuse sont principalement dues à une augmentation plus importante de la largeur des os chez les garçons (Bonjour et coll. 2009). La durée de croissance osseuse est plus importante chez les garçons que chez les filles (Bonjour et coll. 2009). La figure suivante montre qu'au niveau trabéculaire, la DMO volumétrique augmente à la puberté du fait de l'augmentation de l'épaisseur et du nombre de trabécules (Rauch, 2008).

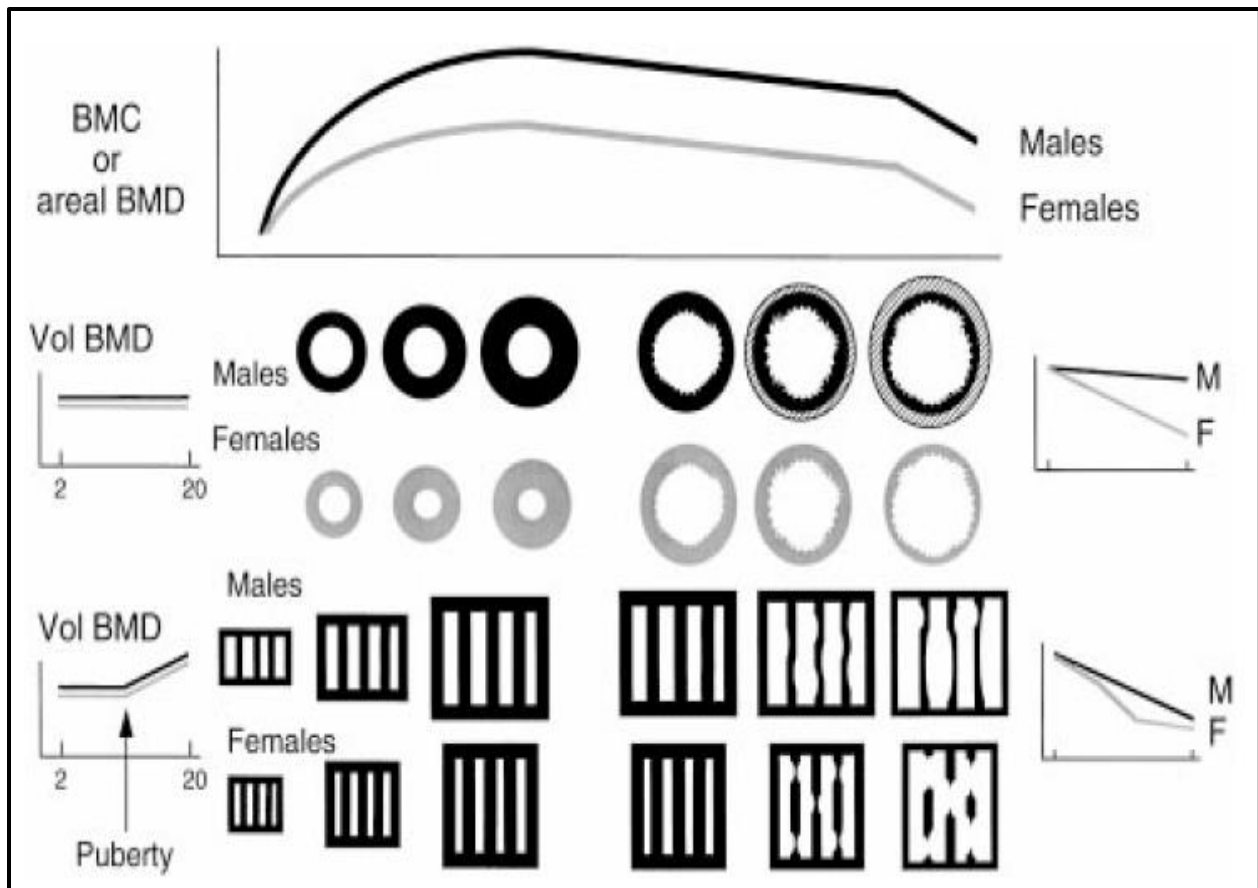


Figure 15: Evolution des différents paramètres osseux en fonction de l'âge et du sexe (Seeman, 2001)

Le « timing » de l'acquisition osseuse est également différent entre les deux sexes. La figure suivante nous montre la vitesse d'acquisition de la masse maigre, du CMO du corps entier et de la taille pour les deux sexes entre 9 et 19 ans (Rauch et coll. 2004).

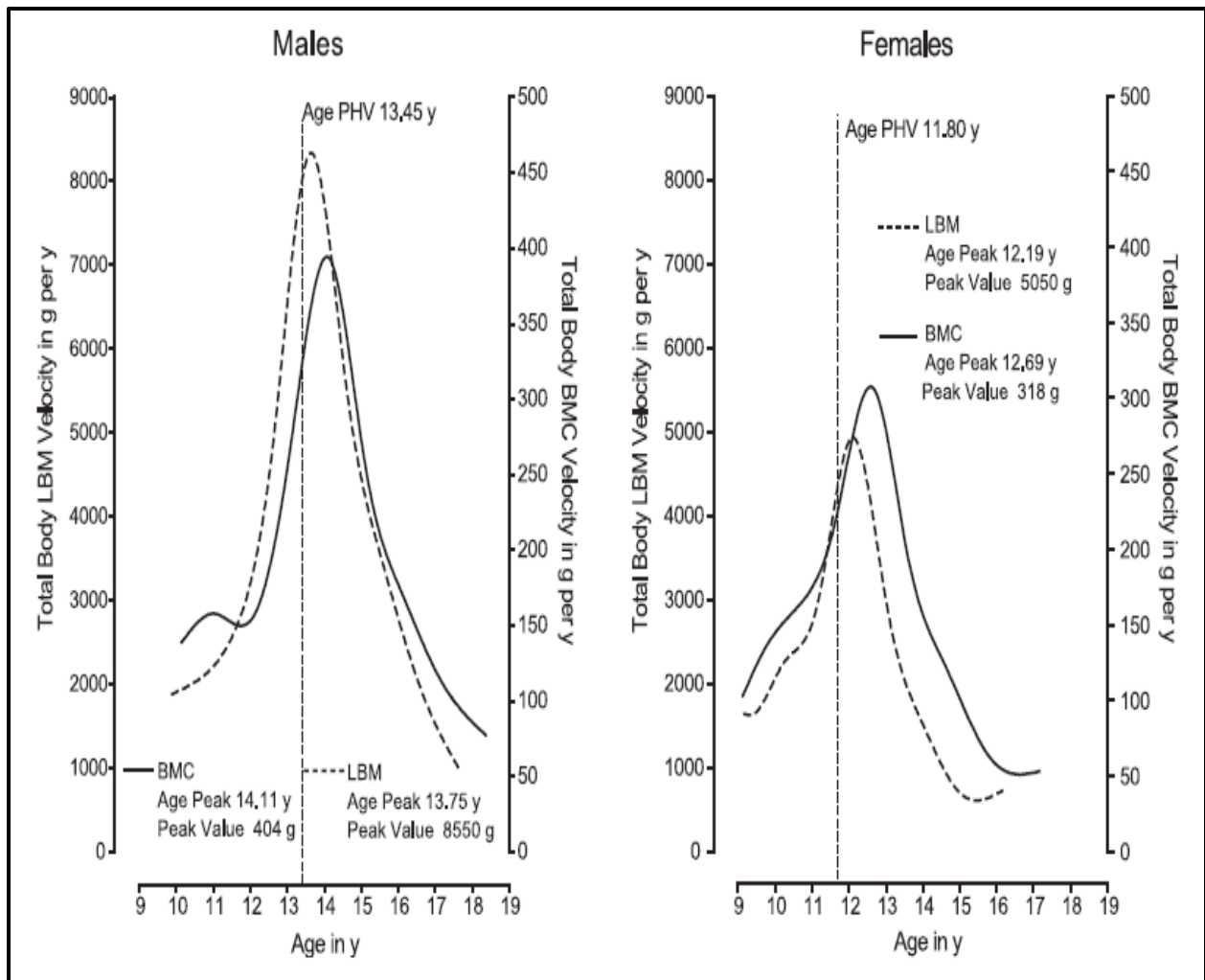


Figure 16: Vitesse d'acquisition de la masse maigre, du CMO du corps entier et de la taille pour les deux sexes entre 9 et 19 ans (Rauch et coll. 2004)

Le pic d'acquisition de la masse osseuse est postérieur au pic de croissance staturale (Rauch et coll. 2004). De plus, le pic d'acquisition de la masse musculaire est antérieur à celui de la masse osseuse (Rauch et coll. 2004). Cette relation est bien documentée et correspond à une incidence de fractures accrue appelée « fragilité transitoire » rencontrée à la puberté (Rauch et coll. 2004).

3.2.3. Les facteurs mécaniques

3.2.3.1. Niveau de contraintes mécaniques par activité sportive

Kemper et coll. (2002) ont classifié les activités physiques en fonction de leur niveau de contraintes mécaniques. En effet, la classification normale qui est basée sur le Met-score n'est pas pertinente quant à l'évaluation des contraintes mécaniques sur le tissu osseux. A titre d'exemple, la natation a une intensité métabolique élevée mais son « GRF » est faible.

Tableau 5: Niveaux de contraintes mécaniques par activité sportive (Kemper et coll. 2002)

Physical activities	Metabolic intensity		Mechanic strain	
	(MET)	Score	(GRF)	Score
Yoga	<4	0	0.5 – 1	0
Volleyball	4 – 7	1	5 – 10	3
Bicycling	4 -7	1	0.5 – 1	0
Soccer, field hockey	7 – 10	2	3 – 5	2
Skating	7 – 10	2	1-3	1
Running	>10	3	1-3	1
Swimming	>10	3	0.5 -1	0
Basketball	>10	3	5-10	3

D'autres chercheurs ont également classifié les niveaux de contraintes mécaniques des activités sportives sur la hanche et le rachis lombaire.

Tableau 6: Niveaux de contraintes mécaniques de plusieurs activités sportives sur la hanche et le rachis lombaire (Groothausen et coll. 1997)

Activity	Ground Reaction Force* (body Weight)	Bone Loading Unit: Hip	Bone Loading Unit: Spine
Yoga	0.5 – 1.0	4.0	5.0
Biking –road	0.5 – 1.0	4.1	4.6
Biking – mountain		7.3	11.1
Swimming	0.5 – 1.0	4.0	4.0
Walking	1.6 – 2.0	7.0	4.0
Softball	2.0	8.0	11.1

Skating	1.0 – 3.0	7.4	4.4
Running	1.0 – 3.0	8.1	8.1
Aerobics	2.8 – 3.0	8.0	5.0
Soccer	3.0 – 5.0	8.4	8.3
Sprinting	2.0 – 6.0	11.7	11.1
Plyometrics	4.0 – 7.0	12.0	11.0
Volleyball	4.8 – 10.0	11.9	11.3
Basketball	4.1 – 10.0	11.7	8.4
Gymnastics	11.0	12.0	12.0

Dolan et coll. (2006) ont développé un questionnaire qui permet d'estimer les contraintes mécaniques sur les os. Ce questionnaire pourrait être bénéfique pour diagnostiquer les femmes à risque élevé d'ostéoporose étant donné que les résultats obtenus par ce questionnaire sont corrélés à la DMO même si la nature de ce questionnaire est rétrospective (Dolan et coll. 2006).

Tableau 7: Niveaux de contraintes mécaniques de plusieurs activités journalières et sportives sur la hanche et le rachis lombaire (Dolan et coll. 2006).

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
Hicking	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/ taekwando	8	5
Kickball	7.7	7.3
Kickboxing	5	5
Pep club	5	5
Plyometrics	12	11
rafting	4	5
Racquetball/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
Skipping	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

3.2.3.2 Facteurs mécaniques et DMO

3.2.3.2.1. Les études transversales

La pratique d'activités physiques à contraintes biomécaniques élevées est associée à une augmentation de la DMO aux sites osseux soumis à ces contraintes (Tenforde et coll. 2011). Le principe de spécificité émis par l'ACSM permet d'expliquer ces adaptations (Korht et coll. 2004; Tenforde et coll. 2011). Comme le montrent plusieurs études transversales, la pratique régulière des sports collectifs est associée à une augmentation de la DMO au niveau du rachis lombaire et de la hanche (Egan et coll. 2006; Tenforde et coll. 2011). De même, la pratique de la musculation et de l'haltérophilie est associée à une augmentation de la DMO au niveau de ces deux sites (Tenforde et coll. 2011). La pratique des sports de raquette est aussi associée à une augmentation de la DMO au bras dominant mais également aux sites soumis aux contraintes tels que le rachis lombaire et la hanche (Egan et coll. 2006; Tenforde et coll. 2011). D'autre part, la pratique de la natation ne semble pas avoir d'effets bénéfiques sur la DMO (Gomez-Bruton et coll. 2016).

Tableau 8: Résumé de plusieurs études menées sur l'influence du type de pratique sportive sur les paramètres osseux

Auteurs et année	Population	Méthodes	Résultats	Conclusion
Plaza-Carmona et coll. (2016)	65 filles âgées de 8 à 14 ans (deux groupes : football + témoin).	Composition corporelle + DMO (DXA)	La masse maigre, le CMO et la DMO étaient significativement supérieurs chez les filles qui pratiquent le football par rapport aux filles sédentaires; ces différences sont plus fortes après la puberté.	La pratique du football pendant l'enfance et l'adolescence peut faciliter une acquisition plus importante du CMO et de la DMO.
Elloumi et coll. (2009)	22 joueurs internationaux de rugby et 14 témoins (âgés entre 20 et 31 ans)	Composition corporelle + performance physique + DMO (DXA) + marqueurs de remodelage osseux	Le niveau de performance physique, le CMO, la DMO étaient supérieurs chez les joueurs de rugby par rapport aux témoins. Dans la population entière, la masse maigre et le niveau de force musculaire et la concentration sérique d'ostéocalcine étaient positivement corrélés à la DMO.	La pratique du rugby est associée à une augmentation des valeurs de DMO et des taux sériques d'ostéocalcine.

Vicente-Rodriguez et coll. (2004)	51 filles âgées en moyenne de 14,2 ans. 24 filles pratiquent le handball et 27 filles forment le groupe contrôle.	Composition corporelle + performance physique + DMO (DXA)	Les niveaux de performance physique, la masse maigre, le CMO et la DMO étaient supérieurs chez les joueuses de handball par rapport aux témoins. Une régression linéaire multiple a montré que la performance sur 30 mètres, le poids et la taille expliquent 80 pour cent de la variabilité du CMO et de la DMO du corps entier.	La pratique du handball est associée à une augmentation de la masse maigre, du CMO et de la DMO chez les filles adultes.
Calbet et coll. (2001)	33 joueurs de football (âgés en moyenne de 23 ans) et 19 témoins (âgés en moyenne de 24 ans)	Composition corporelle + DMO (DXA)	La masse maigre, le CMO et la DMO étaient significativement supérieurs chez les hommes qui pratiquent le football par rapport aux hommes sédentaires.	La pratique à long terme du football (à partir de l'âge pré-pubère) est associée à une augmentation du CMO et de la DMO au niveau du rachis lombaire et du col fémoral.
Agostinete et coll. (2016)	82 garçons (11-17 ans) suivis sur 9 mois: - 13 témoins	Composition corporelle + évaluation du stade pubertaire	Les meilleurs gains sont observés pour le groupe qui pratique le basket.	La pratique du basket est associée à une acquisition osseuse plus importante durant l'adolescence.

	- 14 joueurs de basket-ball - 9 joueurs de karaté - 12 judokas - 16 nageurs			
Gomez-Bruton et coll. (2016)	77 adolescents (34 filles et 43 garçons) pratiquant la natation et 52 adolescents (23 filles et 29 garçons) actifs (pratiquant plusieurs types d'activités physiques). L'âge des sujets était compris entre 11 et 18 ans.	Composition corporelle + DMO + ultrasons	Les adolescents de sexe masculin qui pratiquaient la natation avaient des valeurs de CMO et de DMO inférieures par rapport aux adolescents actifs pratiquant plusieurs types d'activités physiques.	La pratique de natation est associée à des faibles valeurs de CMO et de DMO chez les adolescents de sexe masculin.
Abrahin et coll. (2016)	Méta analyse: 28 études (âge : 15-71 ans)	10 études sur le cyclisme et 18 études sur la	9 études ont suggéré une relation entre la pratique du cyclisme et les faibles valeurs de DMO.	La pratique de la natation ou du cyclisme ne cause pas d'effets positifs sur la densité

		natation.	18 autres études ont montré que la pratique de la natation n'a pas d'effets positifs sur la DMO.	minérale osseuse. Par conséquent, ces sports ne doivent pas être recommandés pour la prévention de l'ostéoporose.
Walters et coll. (2012)	2 femmes (48 et 54 ans) qui pratiquent la force athlétique de manière très intense depuis 30 ans.	DMO rachis lombaire et hanche	Les Z-scores de ces deux femmes étaient extrêmement élevés (proches de 3).	Cette étude suggère que la pratique de l'haltérophilie a des effets positifs sur la DMO.
Sandstrom et coll. (2000)	14 femmes (22,2 ans) pratiquant le hockey sur glace et 14 femmes sédentaires (21,5 ans).	DMO corps entier + rachis + hanche	La DMO était supérieure chez les femmes qui pratiquent le hockey par rapport aux femmes sédentaires pour toutes les régions à l'exception de la tête.	Cette étude suggère que le hockey sur glace influence positivement la DMO et la force musculaire.
Calbet et coll. (1998)	9 joueurs professionnels de tennis (âgés en moyenne de 26 ans) et 17 hommes non	DMO rachis lombaire + hanche + bras	Chez les joueurs de tennis, le poids du bras dominant était plus élevé que celui du bras non dominant (de 20 pour 100) en particulier du fait d'une masse	La pratique de tennis est associée à une augmentation de la DMO du rachis lombaire et du col fémoral. cette étude a des implications

	actifs (âgés en moyenne de 24 ans).		maigre plus élevée et d'un CMO plus élevé. La DMO du rachis lombaire et la DMO de la hanche étaient supérieures chez les joueurs de tennis par rapport aux témoins. La force maximale isométrique était positivement corrélée à la DMO du triangle de Ward ($r = 0,77$; $p < 0,05$).	pratiques dans le domaine de la prévention de l'ostéoporose chez les sujets adultes.
Hind et coll. (2006)	109 athlètes d'endurance (19-50 ans)	DMO rachis lombaire + hanche	La DMO est faible chez les athlètes d'endurance et dans les deux sexes en comparant avec une courbe de référence. La DMO du rachis lombaire était plus élevée chez les athlètes qui pratiquaient la musculation en raison de deux fois par semaine.	L'incorporation de la musculation dans l'entraînement des athlètes d'endurance peut avoir des effets bénéfiques sur la DMO.

Summary of whole-body and lumbar spine BMD values for cross-sectional studies in young adult eumenorrhoeic females						
Sport	Author	Age	<i>n</i>	Whole-body (% above controls)	Femoral neck (% above controls)	Lumbar spine (% above controls)
Volleyball	Lee et al. (1995) [5]	19.4 ± 1.3	11	6.9	11.4	17.9
	Fehling et al. (1995) [4]	19.5 ± 1.3	8	16.2	17.4	19.6
	Risser et al. (1990) [17]	19.6 ± 1.5	12	–	–	14.7
Basketball	Lee et al. (1995) [5]	19.9 ± 1.6	7	7.8	20.0	13.7
	Risser et al. (1990) [18]	19.6 ± 1.1	9	–	–	12.2
Rugby Union	Current study	21.4 ± 1.9	30	13.5	21.7	16.5
Weightlifting	Heinonen et al. (1993) [7]	24.6 ± 4.6	18	–	10.1	14.8
Body builders	Heinrich et al. (1990) [6]	25.7 ± 5.2	11	–	14.7	12.0
Squash	Heinonen et al. (1995) [8]	25.0 ± 3.9	18	–	18.9	14.8
Gymnastics	Fehling et al. (1995) [4]	19.6 ± 1.0	13	9.9	17.4	14.7
Netball	Current study	20.7 ± 1.3	20	6.3	14.5	12.4
Speed skaters	Heinonen et al. (1995) [8]	21.4 ± 8.6	14	–	6.2	7.4
Runners	Duncan et al. (2002) [19]	17.6 ± 1.4	15	8.6	9.7	12.2
	Current study	21.5 ± 2.6	11	6.3	13.3	3.0

Figure 17: Résumé de plusieurs études menées sur la DMO des femmes réglées pratiquant plusieurs types d'activités physiques. Les résultats sont exprimés en pourcentage au-dessus des valeurs retrouvées chez les femmes témoins (Egan et coll. 2006).

A partir de toutes ces études, nous pouvons indiquer trois déterminants de la densité minérale osseuse:

- La masse maigre: La masse maigre est l'un des meilleurs déterminants de la DMO. Les mécanismes qui peuvent expliquer cette relation sont les suivants: le lien mécanique entre l'os et le muscle, les facteurs génétiques qui influencent à la fois la masse maigre et la DMO, les facteurs hormonaux (la GH, l'IGF-1, les androgènes et l'insuline) qui influencent positivement la masse maigre et la DMO (Herring et coll. 1994; Slemenda, 1995; Seeman et coll. 1996).

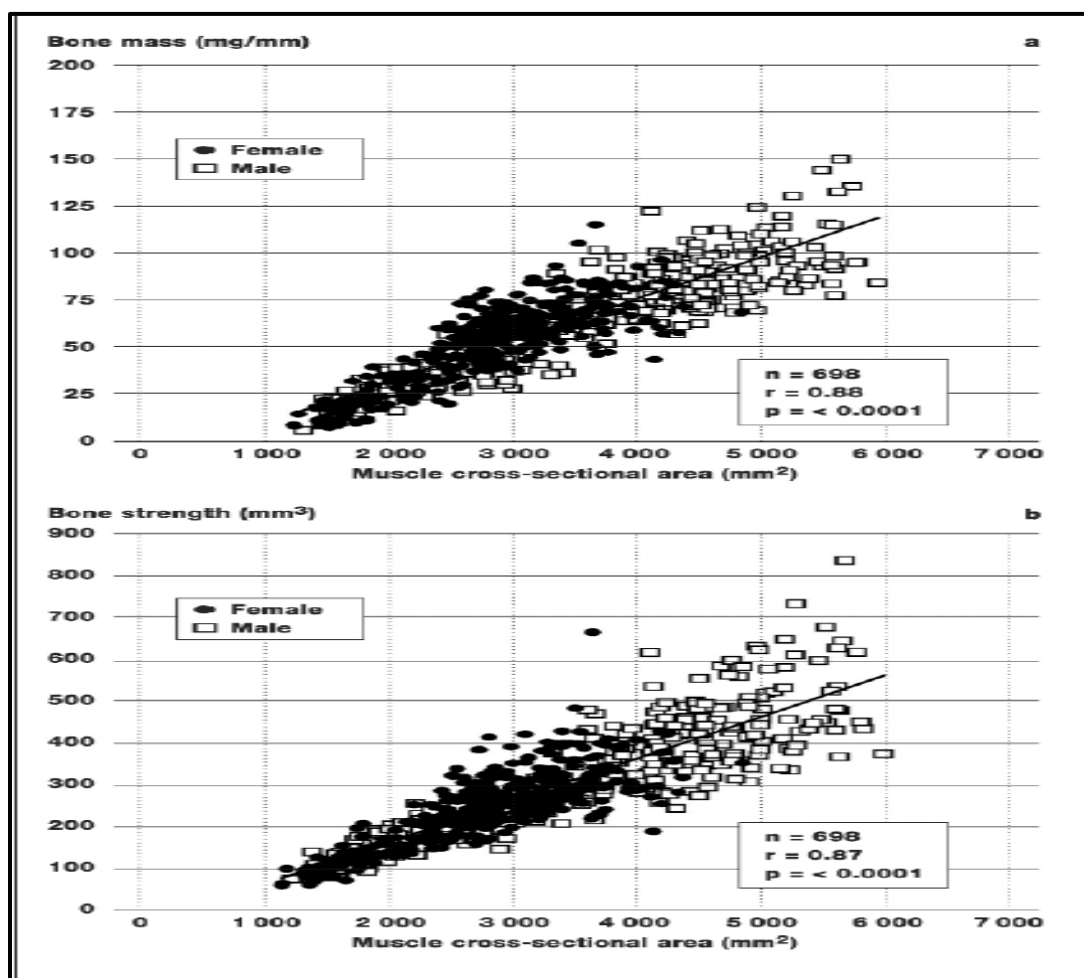


Figure 18: Relation entre la surface musculaire transversale et la résistance osseuse (Schonau et Fricke, 2006)

- La force musculaire: La relation entre l'os et le muscle est bien déterminée. De plus, plusieurs études ont démontré que la DMO d'un site osseux donné était corrélée à la force des muscles n'ayant aucune relation anatomique (fonctionnelle) avec l'os en question (Bevier et coll. 1989; Snow-Harter et coll. 1990; Nordström et coll. 1996). Le tableau suivant nous résume les résultats de plusieurs études transversales menées sur ce sujet.

Tableau 9 : Résumé de plusieurs études menées sur les relations entre les paramètres de force musculaire et les variables osseuses

Auteurs et année	Population	Méthodes	Résultats	Conclusion
Marin et coll. (2010)	117 femmes ménopausées	Mesures de force de préhension et de DMO	La force de préhension était positivement corrélée à la DMO du rachis lombaire ($r = 0,49$; $p < 0,001$), à la DMO du col fémoral ($r = 0,56$; $p < 0,001$) et la DMO du corps entier ($r = 0,52$; $p < 0,001$).	La stratégie d'augmenter la force musculaire est intéressante dans le domaine de la prévention de l'ostéoporose féminine.
Witzke et Snow (1999)	54 adolescentes âgées en moyenne de 14,6 ans.	Wingate + force maximale + DMO	La puissance musculaire était positivement corrélée à la DMO de tous les sites osseux ($r = 0,41-0,67$; $p < 0,001$). La force maximale était positivement corrélée à la DMO de tous les sites osseux ($r = 0,41-0,53$; $p < 0,001$).	L'augmentation de la puissance musculaire est associée à une meilleure acquisition osseuse durant la croissance.

Pasco et coll. (2015)	863 femmes âgées de 26 à 97 ans	Force maximale des fléchisseurs de la hanche et des abducteurs de la hanche + DMO + masse maigre	Des corrélations positives entre les niveaux de force maximale et la DMO de la hanche ont été retrouvées. Ces corrélations ont disparu après ajustement pour la masse maigre.	La corrélation positive entre la force maximale et la DMO de la hanche a disparu après ajustement pour la masse maigre totale ou la masse appendiculaire.
Ahedi et coll. (2014)	321 sujets (hommes et femmes)	Tests IRM + force + DXA	La section transversale des fléchisseurs de la hanche était positivement corrélée à la DMO de la hanche. La force musculaire de la jambe était légèrement corrélée à la DMO.	Le volume musculaire et la force musculaire sont des déterminants positifs de la DMO et ils contribuent au maintien de la DMO avec l'avance en âge.
Snow Harter et coll. (1990)	59 femmes	Tests de force maximale de plusieurs muscles + force de préhension + DMO	La force maximale du biceps brachial était le meilleur déterminant positif de la DMO de la hanche et la force de préhension était le meilleur déterminant positif de la DMO du rachis lombaire et de l'avant-	La force musculaire explique 15 à 20 pour cent de la variabilité de la DMO.

			bras.	
Pocock et coll. (1989)	73 femmes âgées de 20 à 75 ans	Tests de force musculaire + DMO	La force musculaire était positivement corrélée à la DMO du rachis lombaire, de la hanche et de l'avant-bras. Chez les femmes ménopausées, la force musculaire était positivement corrélée à la DMO de la hanche et de l'avant-bras.	La force musculaire est un déterminant important de la DMO.
Shin et coll. (2014)	97 sujets âgés en moyenne de 56 ans.	Divers tests physiques + DMO	La force de préhension était positivement corrélée à la DMO de l'avant-bras.	La force de préhension est un déterminant de la DMO de l'avant-bras.
Liu et coll. (2014)	44 femmes âgées de 39 à 61 ans	Tests de force musculaire + composition corporelle + DMO	La masse maigre était un déterminant de la DMO contrairement à la masse grasse.	La masse maigre a un rôle important dans la prévention de l'ostéopénie et de l'ostéoporose.

- La $\text{VO}_2 \text{ max}$ (L/min): Plusieurs études ont démontré des corrélations positives entre la $\text{VO}_2 \text{ max}$ (L/min) et la DMO. Les mécanismes pouvant expliquer cette relation ne sont pas totalement élucidés. Dans la plupart des études, la $\text{VO}_2 \text{ max}$ (L/min) est corrélée au CMO et à la DMO du fait probablement de la linéarité entre la masse maigre et la $\text{VO}_2 \text{ max}$ (L/min). Concernant les corrélations entre la $\text{VO}_2 \text{ max}$ (ml/mn/kg) et la DMO, la présence de corrélations semble dépendre du genre et du statut pondéral de la population étudiée (El Hage et coll. 2014c). Le tableau suivant nous résume les résultats de plusieurs études transversales menées sur ce sujet.

Tableau 10 : Résumé de plusieurs études menées sur la relation entre la consommation maximale d'oxygène et les paramètres osseux

Auteurs et année	Population	Méthodes	Résultats	Conclusion
El khoury et coll. (2016a)	52 jeunes hommes surpoids et obèses	DXA + VO ₂ max	La VO₂ max (L/min) est corrélée aux paramètres osseux (CMO et DMO). La VO₂ max (L/min) était un meilleur déterminant positif de la DMO CE et de la DMO de la hanche que la masse maigre.	La VO ₂ max (L/min) est un déterminant indépendant de la DMO chez les jeunes adultes en surpoids et obèses.
Zunquin et coll. (2016)	57 filles et 67 garçons en surcharge pondérale (7 à 17 ans).	Mesures de la composition corporelle, du CMO, de la DMO et de la VO ₂ max (L/min).	La VO₂ max (L/min) est corrélée aux paramètres osseux (CMO et DMO) pour les deux sexes. Les corrélations entre VO₂ max (L/min) et paramètres osseux (CMO et DMO) ont persisté après ajustement pour l'âge ou la masse maigre.	La VO ₂ max (L/min) est un déterminant indépendant de la DMO chez les enfants en surcharge pondérale.

El Hage et coll. (2014c)	20 femmes et 37 hommes (18 à 32 ans)	Mesures de la composition corporelle, du CMO, de la DMO et de la VO ₂ max (L/min).	La VO₂ max (L/min) est corrélée aux paramètres osseux (CMO et DMO) pour les deux sexes. Les corrélations entre VO₂ max (L/min) et paramètres osseux (CMO et DMO) ont persisté après ajustement pour l'âge.	La VO ₂ max (L/min) est un déterminant indépendant de la DMO chez les jeunes adultes.
Mowry et coll. (2009)	59 adolescentes et jeunes femmes (< 25 ans)	Mesures de la vitamine D, de la composition corporelle et de la VO ₂ max (ml/min/kg).	La concentration sérique en vitamine D était positivement corrélée à la VO₂ max (ml/min/kg) ($r = 0,36$; $p < 0,05$). Le pourcentage de masse grasse était négativement corrélé à la VO₂ max (ml/min/kg) ($r = -0,70$; $p < 0,05$). Le pourcentage de masse grasse était négativement corrélé à la concentration sérique de vitamine D ($r = -0,44$; $p < 0,05$).	La concentration sérique en vitamine D est un déterminant positif de la VO ₂ max (ml/min/kg) chez les jeunes femmes.

Afghani et coll. (2004)	39 femmes réglées (22-21 ans)	Mesures de la composition corporelle, du CMO, de la DMO et de la VO ₂ max (L/min).	La VO ₂ max (ml/min/kg) explique 8 pour cent de la variabilité de la DMO du corps entier.	La VO ₂ max (ml/min/kg) est un déterminant positif de la DMO chez les femmes.
Huuskonen et coll. (2000)	140 hommes âgés de 54 à 63 ans.	Mesures de force et de DMO	Le fait d'être en sous-poids, une faible consommation de calcium et une faible force musculaire sont des facteurs de risque d'une faible DMO.	La VO ₂ max n'était pas corrélée aux paramètres osseux.
Vicente-Rodriguez et coll. (2004)	28 garçons pré pubères	Mesures performance physique et de DMO	Pas de corrélations entre VO ₂ max et CMO ou DMO.	Les performances en détente verticale et en sprint sur 30 mètres sont les meilleurs déterminants du CMO et de la DMO.
Pocock et coll. (1986)	46 femmes ménopausées	Mesures des caractéristiques anthropométriques, du CMO, de la DMO et de la VO ₂	La VO ₂ max (L/min) était positivement corrélée à la DMO du rachis lombaire et à la DMO du col fémoral.	La VO ₂ max (L/min) est le seul déterminant positif de la DMO du col fémoral chez les femmes ménopausées.

		max (L/min).		
--	--	--------------	--	--

3.2.3.2.2. Les études longitudinales

Plusieurs études randomisées contrôlées ont également montré une relation de causalité entre la pratique d'activités physiques (musculature et/ou sports à impacts) et l'augmentation de la DMO (Bolam et coll. 2013; Kelley et coll. 2013). Le pourcentage d'augmentation de la DMO dépend de l'âge, du stade pubertaire et du sexe de la population étudiée (Bolam et coll. 2013; Kelley et coll. 2013). La pratique de la musculature et des sports à impacts doit être considérée comme une stratégie de prévention contre l'ostéoporose chez les personnes adultes (Bolam et coll. 2013).

3.2.3.3. Facteurs mécaniques et géométrie osseuse

Il a été démontré que la taille des os augmente en réponse à la pratique sportive chez des enfants pré-pubères et en début de puberté (Dyson et coll. 1997; Mackelvie et coll. 2004; Petit et coll. 2002). Plus précisément, la surface périsotée est plus sensible aux contraintes mécaniques en début de puberté tandis que la surface endostée réagit davantage aux contraintes mécaniques vers la fin de la puberté (Ruff et coll. 1994). D'un point de vue théorique, la résistance osseuse dépend en partie des dimensions osseuses car les os sont d'autant plus résistants que la masse osseuse est située loin de l'axe longitudinal de l'os (Turner et Burr, 1993).

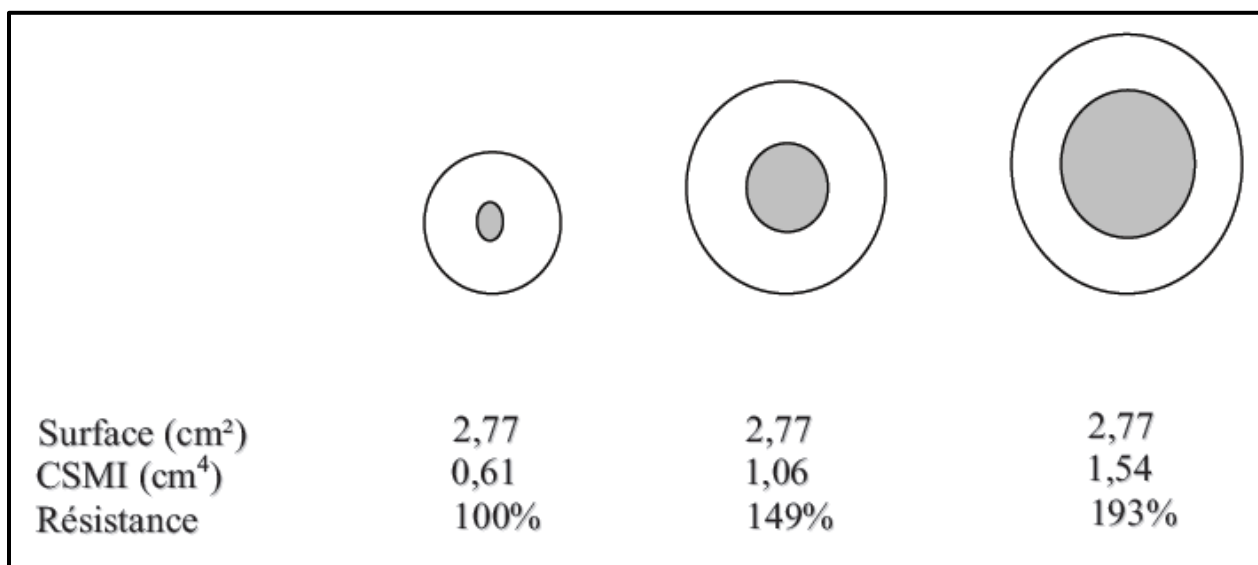


Figure 19: Influence de la surface osseuse sur la résistance mécanique de l'os (Briot, 2009)

La pratique régulière du tennis est associée à une expansion périostée au niveau de l'humérus dominant chez des filles pré-pubères (Bass et coll. 2002). Chez des joueuses de tennis en péri- ou en post puberté, une réduction de la taille du canal médullaire a été observée (Bass et coll. 2002). D'autres chercheurs ont également montré des adaptations de la géométrie osseuse en réponse à l'entraînement en gymnastique (Ward et coll. 2005).

D'autre part, plusieurs études menées chez les jeunes adultes et utilisant la technique de Beck (appelée « hip structure analysis ») ont montré des adaptations positives de la géométrie osseuse de la hanche en réponse à la pratique sportive (El Hage, 2013; El Hage et coll. 2014c ; Ferry et coll. 2011; Ferry et coll. 2013; Nikander et coll. 2005; Tenforde et coll. 2011). Les valeurs de CSA et de Z sont élevées chez les sujets pratiquant des sports à impacts (volley-ball, football et sauts).

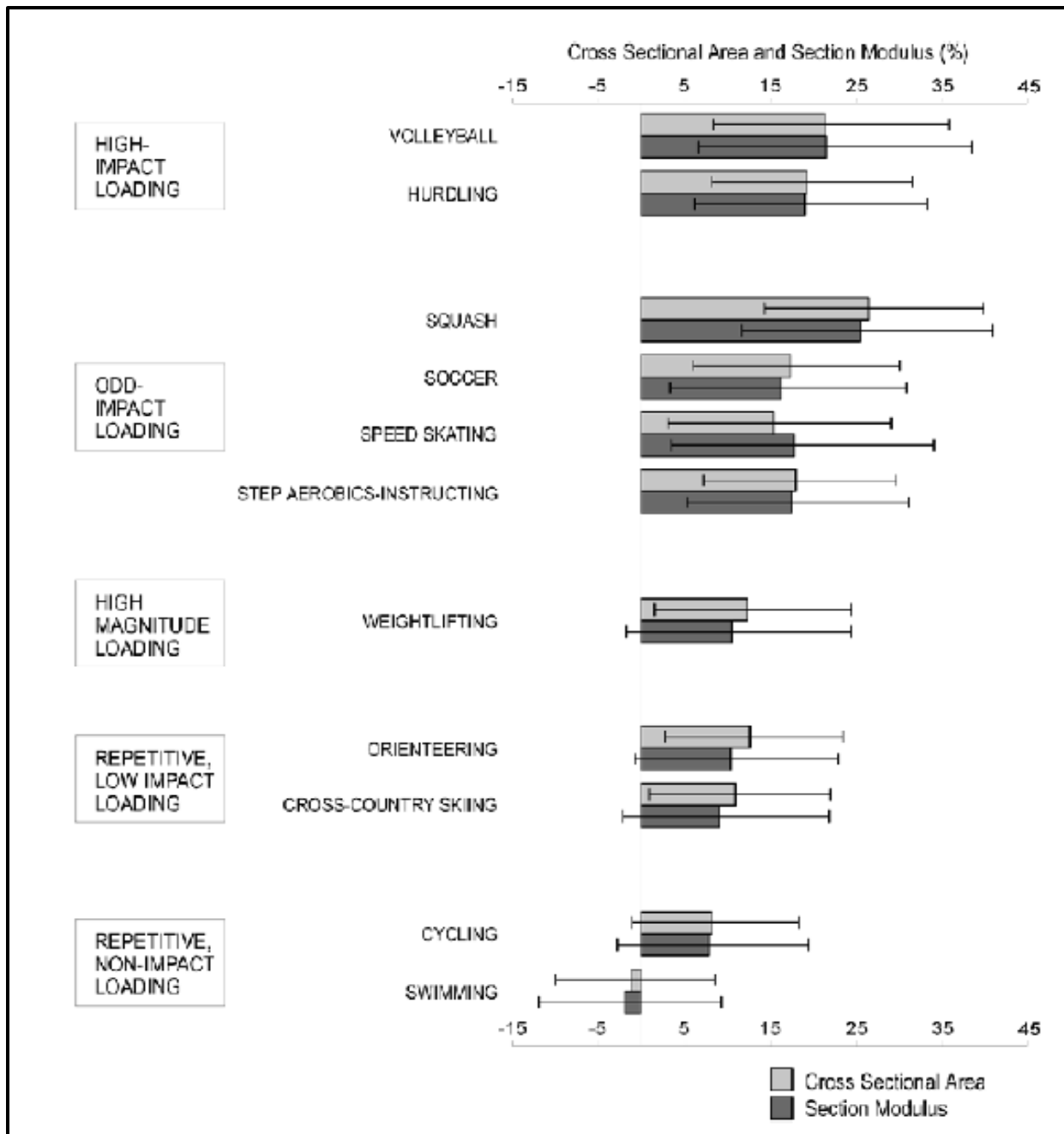


Figure 20: CSA et Z chez des femmes pratiquant différents types d'activités physiques. Les valeurs sont exprimées en pourcentage par rapport à un groupe féminin témoin (Nikander et coll. 2005)

3.2.3.4. Facteurs mécaniques et trabecular bone score (TBS)

Le score de l'os trabéculaire est un paramètre de texture osseuse qui est prédictif de la fracture ostéoporotique chez les femmes ménopausées (Bousson et coll. 2015). Le TBS est corrélé à plusieurs paramètres microarchitecturaux et il est facilement mesuré dans la pratique clinique (Bousson et coll. 2015). Une étude a comparé les valeurs de TBS chez des jeunes femmes pratiquant plusieurs types d'activités physiques et a montré que celles pratiquant la musculation et les sauts avaient les valeurs de TBS les plus élevées (Heinio et coll. 2015).

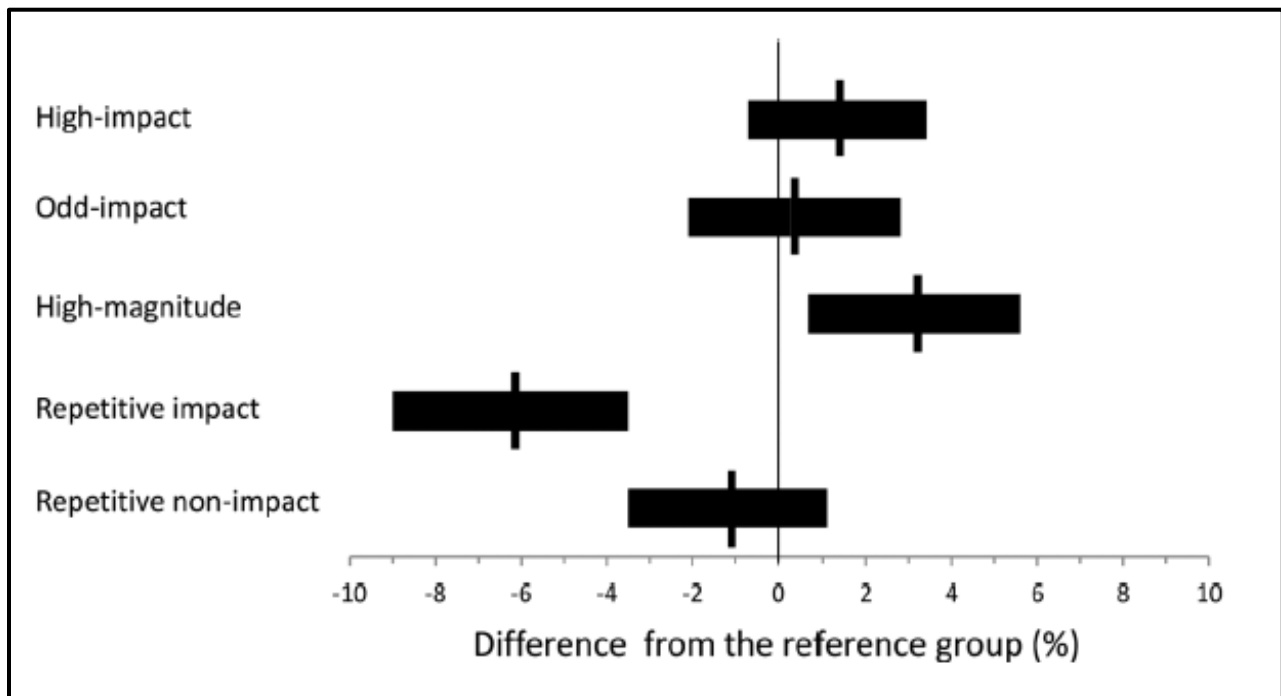


Figure 21: Valeurs de TBS en fonction du type de pratique sportive (Heino et coll. 2015)

3.2.3.4.1. Facteurs corrélables au TBS

Le vieillissement est associé à une diminution des valeurs de TBS; la courbe d'évolution du TBS en fonction de l'âge est proche de celle de la DMO.

Chez les femmes adultes, les caractéristiques anthropométriques (poids, taille et IMC) ne sont généralement pas corrélées au TBS (El Hage et coll. 2014b). Cependant, la DMO reste positivement corrélée au TBS même si la force d'association entre ces deux variables osseuses

dépend du statut pondéral de la population étudiée (El Khoury et coll. 2016a; El Hage et coll. 2014b).

Chez 88 jeunes femmes Finlandaises, la force maximale des membres inférieurs et la détente verticale sont positivement corrélées au TBS d'après Heinio et coll. (2015). De même, Zakhem et coll. (2015) ont montré que la VO₂ max (L/min), la force maximale en demi-squat et la détente horizontale sont corrélées au TBS chez un groupe de jeunes femmes adultes. El Khoury et coll. (2016a) ont démontré que la VO₂ max (ml/min/kg) est positivement corrélée au TBS chez de jeunes hommes en surpoids et obèses.

Group	TBS vs. leg press force	TBS vs. jumping force
High-impact	0.46	0.49
Odd-impact	0.09	-0.14
High magnitude	0.12	0.09
Repetitive impact	0.43	-0.09
Repetitive non-impact	0.37	-0.21
Reference	0.16	0.35
Pooled group	0.34	0.22
<i>*significant ($p < 0.05$) are given in bold face.</i>		

Figure 22: Corrélations simples entre le TBS et les paramètres de performance physique dans les groupes pratiquant plusieurs types d'activités physiques (Heino et coll. 2015)

3.2.3.5. Conséquences de la réduction des contraintes mécaniques

La gravité terrestre a un effet positif sur la DMO et la microarchitecture osseuse. L'immobilisation prolongée (bed rest) et l'immobilisation forcée (clinique) sont associées à une diminution de la DMO.

L'effet de l'immobilisation à long terme associée à une réduction des contraintes mécaniques au niveau du squelette osseux induit une perte osseuse significative et un trouble de la

minéralisation osseuse (Jaworski, Uhthoff, 1986 ; Leblanc et coll. 1990 ; Schneider et coll. 1995 ; Vico et coll. 2000).

Durant les vols en apesanteur au cours de la mission de Skylab 4, on a observé une diminution du taux corporel de calcium de 1.5 % (Rambaut et coll. 1979). De même, chez les astronautes en situation d'apesanteur, une déminéralisation est observée au niveau du bassin, du fémur et du tibia (Vicot, 2000 ; Leblanc, 1996) mais rarement au niveau de la colonne lombaire (Leblanc, 1998). En microgravité et quelle que soit la durée du vol, la DMO du corps entier et des membres supérieurs ne serait pas affectée (Rambaut, 1979 ; Schneider, 1992).

Au niveau mécanistique, les vols spatiaux entraînent une diminution du nombre et de l'activité des ostéoblastes (Vico et coll. 1988 ; Caillot-Augusseau et coll. 1998).

Au retour sur terre, la compensation de la DMO dépend de la durée du vol spatial (Rambaut et coll. 1979 ; Smith et coll. 1999). Une étude a indiqué que cette perte osseuse n'était toujours pas compensée 5 ans après le retour sur terre (Rambaut et coll. 1979).

3.2.4 Facteurs nutritionnels

3.2.4.1. Apports caloriques

Un régime hypocalorique est associé à une diminution de la masse maigre induisant une diminution des contraintes mécaniques sur le squelette et donc par conséquent une diminution de la formation osseuse et une augmentation de la résorption osseuse (Rizzoli et coll. 2008). Une étude a montré qu'une restriction calorique de 30 pour cent sur une période de 5 jours va diminuer les marqueurs de l'activité ostéoblastique de 10% et qu'une restriction calorique de 70% sur la même période va diminuer les marqueurs de l'activité ostéoblastique de 30% avec une augmentation significative des marqueurs de l'activité ostéoclastique (Ihle et Loucks, 2004). Ces modifications sont associées à une diminution des concentrations sériques d'estradiol, d'insuline, d'IGF-1 et des hormones thyroïdiennes (Ihle et Loucks, 2004). L'ingestion du glucose augmente la sécrétion de calcitonine et diminue celle de la PTH (Clowes et coll. 2002a). L'amyline est co-sécrétée avec l'insuline et inhibe la résorption osseuse (Cornish et coll. 2001). L'ingestion de protéines et de graisses diminue la résorption osseuse (Clowes et coll. 2002b;

Henriksen et coll. 2003; Bjarnason et coll. 2002). Les mécanismes qui lient ces apports au métabolisme osseux incluent la sécrétion de plusieurs hormones (PTH, amyline et calcitonine) mais également la sécrétion de GIP (glucose-dependent insulino tropic polypeptide), GLP-1 (glucagon-like peptide-1) et GLP-2 (Henriksen et coll. 2003). Enfin, la Ghréline peut aussi agir comme médiateur des effets de la restriction calorique sur l'os (Reid, 2010).

3.2.4.2. Le calcium

Plusieurs études ont signalé que le fait d'avoir des apports suffisants en calcium et en protéines est nécessaire pour la santé des os chez les adolescents comme chez les personnes âgées (pour revue voir Rizzoli et coll. 2008). Chez les sujets en cours de croissance, l'augmentation des apports calciques est associée à une meilleure acquisition osseuse aboutissant ainsi à un pic de masse osseuse plus élevé (Bonjour et Rizzoli, 2001). La supplémentation en calcium diminue le remodelage osseux et peut également influencer la formation osseuse (Bonjour et coll. 1997). Chez les femmes ménopausées, la supplémentation en calcium et en vitamine D réduit significativement le risque fracturaire (Reid et coll. 2006).

3.2.4.3. Les protéines

Les apports protéiques influencent positivement la croissance osseuse et l'acquisition de la masse osseuse (Bonjour et coll. 2001). Les apports protéiques stimulent la production hépatique d'IGF-1 qui augmente la prolifération et l'activité des ostéoblastes (Rizzoli et coll. 2008). Plusieurs études transversales ont montré des corrélations positives entre les apports protéiques et la DMO (Chevalley et coll. 2008; Morroni et coll. 2004; Ihle et coll. 2004; Clowes et coll. 2002; Grey et coll. 2007). De plus, une étude a montré que le niveau de perte osseuse en période de vieillissement est inversement corrélé aux apports protéiques (Hannan et coll. 2000).

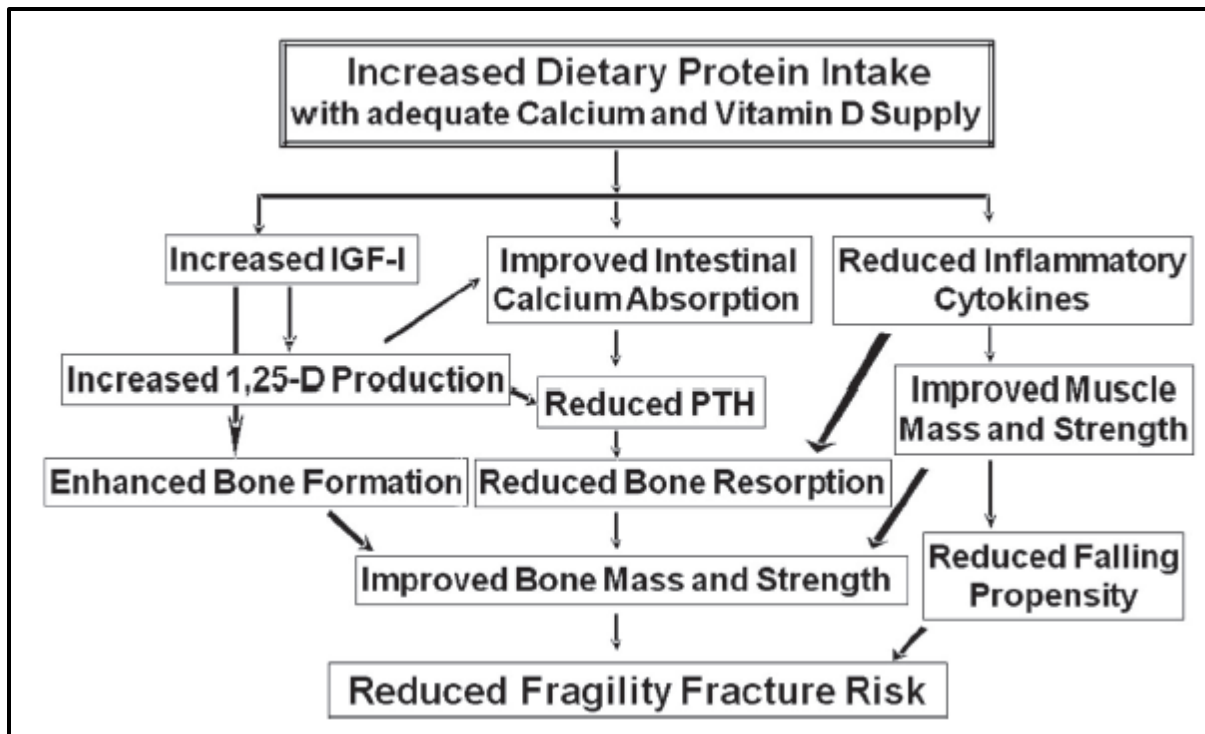


Figure 23: Apports adéquats en protéines, calcium et vitamine D et réduction du risque fracturaire chez les personnes âgées (Bonjour, 2011)

3.2.4.4. La vitamine D

Les effets physiologiques de la vitamine D sur le tissu osseux sont bien connus (Coxam et coll. 2013). Des concentrations faibles en vitamine D (25-40 nmol/l) peuvent diminuer la croissance osseuse et la minéralisation osseuse et donc augmentent le risque d'avoir une faible masse osseuse (Rizzoli et coll. 2010). Dans l'étude de NHANES qui a inclut 13432 sujets, une corrélation positive a été signalée entre la concentration plasmatique en vitamine D et la DMO, dans la plage de valeurs plasmatiques de vitamine D de 22,5 à 94 nmol/L (Bischoff-Ferrari et coll. 2004).

Globalement, le risque de fracture à la hanche est négativement corrélé aux concentrations sériques de 25(OH) D (Cauley et coll. 2008). Des valeurs supérieures à 30 ng/ml sont considérées comme protectrices contre ces fractures (Cauley et coll. 2008). La déficience en

vitamine D est également associée à une faiblesse musculaire qui influence également le risque fracturaire par l'intermédiaire de l'augmentation du risque de chutes (Janssen et coll. 2002).

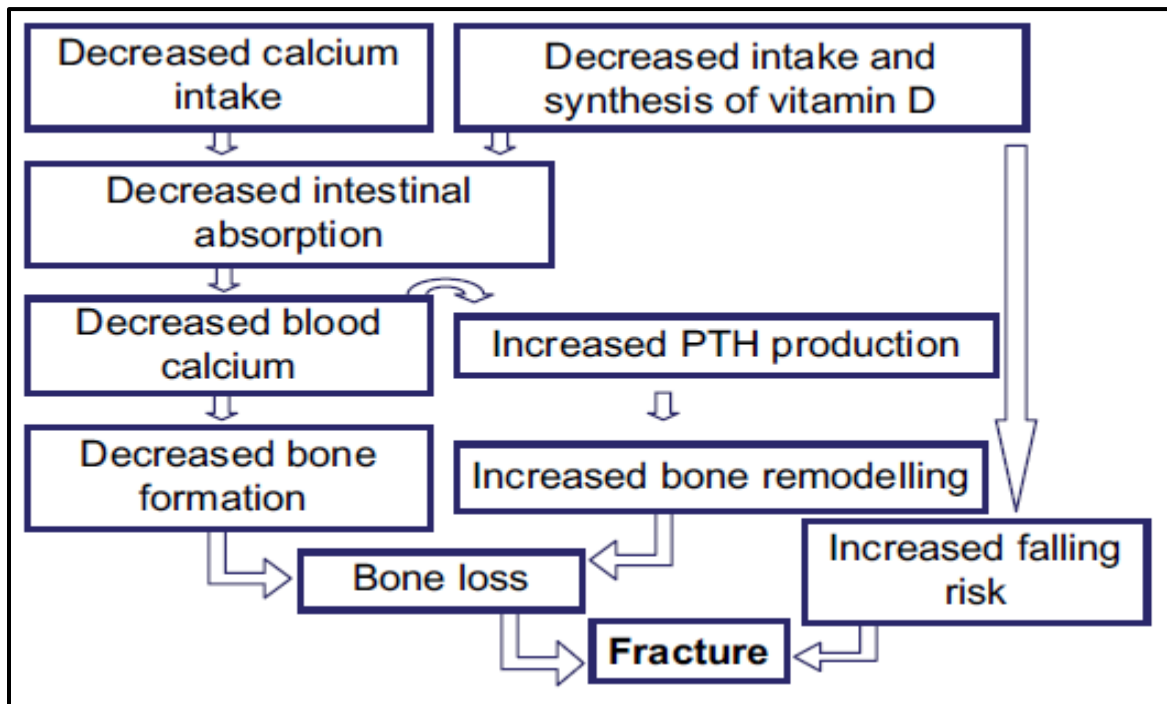


Figure 24: Mécanismes augmentant le risque fracturaire du fait de la déficience en calcium et en vitamine D (Rizzoli, 2008)

4. Obésité et paramètres osseux

4.1. Aspects mécanistiques

L'excès de poids influence le métabolisme osseux par plusieurs mécanismes : les mécanismes mécaniques, les hormones, le sommeil et les polluants organiques.

4.1.1. Mécanismes mécaniques

La DMO est positivement corrélée au poids corporel et à l'IMC. Cette relation est principalement expliquée par l'augmentation des contraintes mécaniques sur le squelette du fait de l'obésité (Reid, 2002; Wang et coll. 2005). Cependant, la DXA peut surestimer la DMO chez les sujets obèses comme décrit par plusieurs études (Grampp et coll. 1997; Guglielmi et coll. 1994; Javed et coll. 2009; JM et coll. 1999). La masse maigre est un meilleur déterminant positif de la DMO que la masse grasse chez les hommes (Kremer et Gilsanz, 2016). Chez les femmes, l'importance relative de la masse maigre et de la masse grasse sur les valeurs de DMO dépend du stade pubertaire (prépubertaire, post-pubertaire) et de l'âge (jeune adulte, péri-ménopause ou post-ménopause).

L'obésité évaluée par un IMC élevé semble protéger les hommes et les femmes contre les fractures ostéoporotiques (De Laet et coll. 2005). Une étude européenne a également démontré qu'un IMC élevé protège contre les fractures vertébrales (Johnell et coll. 1997). En parallèle, un poids corporel faible augmente le risque fracturaire au niveau de la hanche (Ensrud et coll. 1997). Des études antérieures ont montré que le risque fracturaire est corrélé positivement à la masse grasse chez les femmes Françaises et les hommes Chinois (Schott et coll. 1998; Lau et coll. 2000). Plus particulièrement, la masse grasse viscérale semble avoir des effets néfastes sur les paramètres de résistance osseuse (Gilsanz et coll. 2009; Goulding et coll. 2001). En résumé, les études cliniques sur l'influence de l'obésité sur le risque fracturaire ne sont pas équivoques. Cette influence dépend également du genre, de l'âge, de la composition corporelle et du site osseux étudié (Kremer et Gilsanz, 2016).

	Risque	
	Augmenté	Diminué
Femmes	Cheville Jambe Humérus Vertèbres (?)	Poignet Hanche Bassin
Hommes	Cheville Côtes	Vertèbres (?) Hanche Poignet Bassin

Figure 25: Localisation de la fracture et obésité (Cortet et Roux, 2016)

Certaines études ont montré que le risque fracturaire au niveau de quelques sites osseux peut augmenter chez les sujets obèses (Cortet et Roux, 2016; Compston et coll. 2011; Nielson et coll. 2011; Premaor et coll. 2011). Chez les femmes obèses, le risque fracturaire peut être élevé au niveau de la cheville, la jambe et l'humérus. Chez les hommes obèses, le risque fracturaire peut être élevé au niveau de la cheville et des côtes (Cortet et Roux, 2016). Les mécanismes suivants peuvent expliquer l'augmentation du risque fracturaire au niveau de certains sites chez les sujets obèses:

- La production par la masse grasse viscérale de l'adiponectine et de plusieurs cytokines inflammatoires (IL-1, IL-6 et TNF- α) ayant un effet néfaste sur la DMO (Kremer et Gilsanz, 2016).
- L'augmentation de la masse grasse viscérale est associée à une diminution de la concentration sérique d'IGF-1 (Bjorntorp, 1997; Brand et coll. 2014; Tsai et coll. 2004).
- Chez les hommes obèses, la concentration de la testostérone libre diminue (Bjorntorp, 1997).
- Chez les sujets obèses, la concentration sérique en vitamine D est faible alors que celle de la PTH est élevée (Kremer et Gilsanz, 2016).
- La DMO est élevée chez les sujets obèses. Cependant, ces valeurs ne sont pas adaptées à l'excès de poids chez les sujets obèses (Goulding et coll. 2001; Cortet et Roux, 2016).
- Le coussinet adipeux au niveau de l'humérus est faible contrairement à celui au niveau de la hanche. Ceci peut expliquer en partie l'augmentation du risque fracturaire au niveau de ce site chez les femmes obèses (Cortet et Roux, 2016).
- Les sujets obèses ont généralement un niveau faible d'activité physique et leur équilibre est « mauvais », ce qui augmente le risque de chute (Tom et coll. 2013; Waters et coll. 2010).
- Certaines études ont signalé que l'apport calcique journalier est faible chez les sujets obèses (Major et coll. 2008; Zemel, 2009).
- La voie PPAR γ est augmentée chez les obèses. Cette voie augmente l'adiposité médullaire et diminue la formation osseuse (Rosen et Bouxsein, 2005).
- La qualité du sommeil est altérée chez les sujets obèses. La durée du sommeil est également diminuée. Ces perturbations augmentent les taux de cortisol et perturbent la sécrétion de plusieurs hormones qui régulent la masse osseuse (Swanson et coll. 2015).

4.1.2. Mécanismes hormonaux

Chez les femmes ménopausées, l'augmentation de la masse grasse possède généralement des effets positifs sur la masse osseuse. Les études in-vivo montrent des corrélations positives entre la masse grasse et la DMO. De même, Reid (2010) a expliqué les principaux mécanismes par lesquels l'hyper-insulinémie associée à l'obésité contribue à l'augmentation de la masse osseuse. En effet, l'augmentation de la masse grasse est associée à une résistance à l'insuline, une augmentation de la sécrétion de l'insuline, une augmentation de la sécrétion de la preptine et de l'amyline (Reid, 2010). Ces perturbations induisent sur le plan hormonal une augmentation des hormones sexuelles libres et une diminution de la SHBG (Reid, 2010). Par conséquent, l'activité ostéoblastique augmente et l'activité ostéoclastique diminue favorisant ainsi une augmentation de la masse osseuse (Reid, 2010).

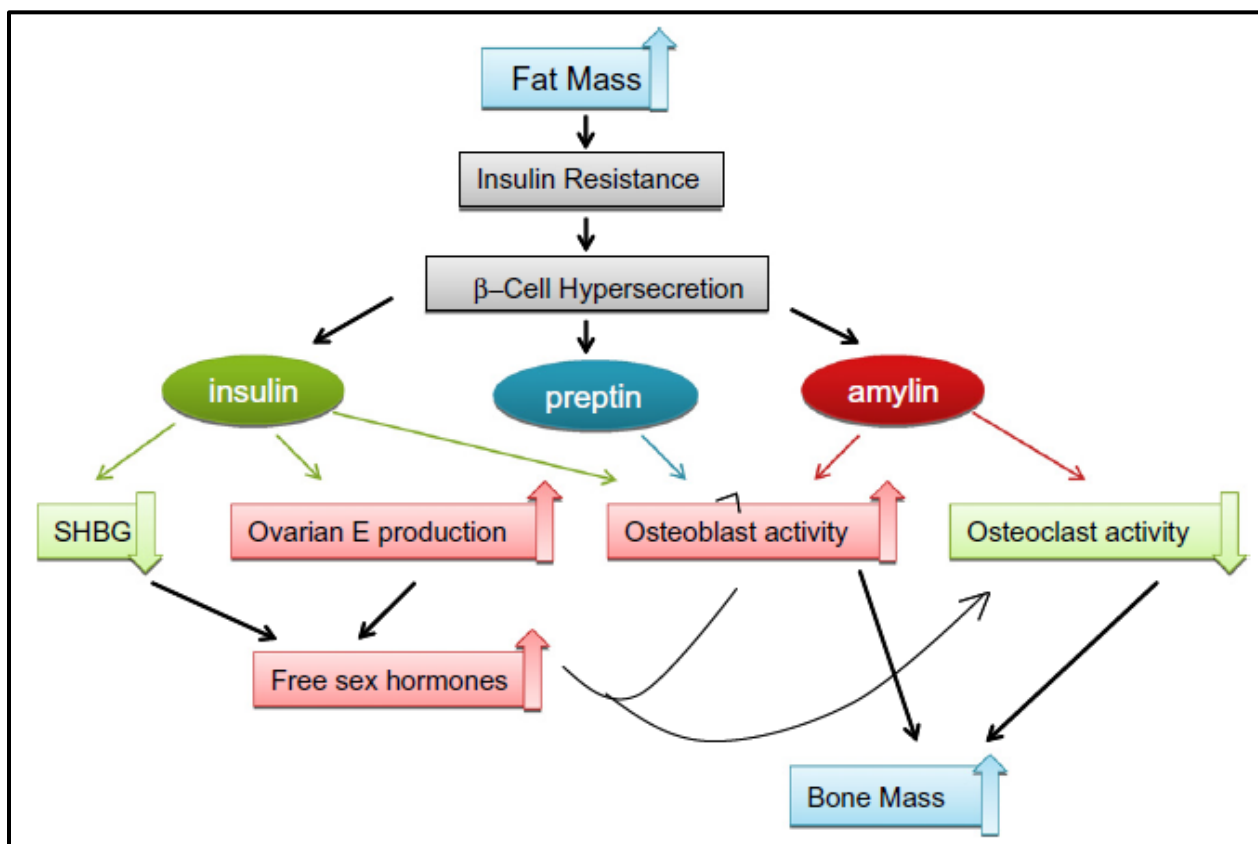


Figure 26: Résumé des principaux mécanismes par lesquels l'hyperinsulinémie associée à l'obésité contribue à l'augmentation de la masse osseuse (Reid, 2010)

Une étude menée chez des femmes ménopausées saines a montré la présence d'une corrélation négative entre l'IMC et l'activité des ostéoclastes (Revilla et coll. 1997). En accord avec les résultats de cette étude, une autre étude a montré une augmentation de la résorption osseuse suite à la perte de poids (Ricci et coll. 2001). En revanche, l'obésité masculine est associée à d'autres perturbations hormonales qui peuvent nuire à la formation osseuse. En particulier, l'obésité abdominale chez l'homme est associée à une diminution de la sécrétion de la GH et à une diminution de la concentration sanguine de la testostérone libre (Brand et coll. 2014; Tsai et coll. 2004). Si l'obésité est associée à une augmentation de l'insuline, les études concernant l'influence de la surcharge pondérale sur les concentrations d'IGF-1 ne sont pas équivoques (Bjorntorp, 1997). Les concentrations d'IGF-1 sont négativement corrélées à la masse grasse viscérale mais ne dépendent pas de la masse grasse totale (Bjorntorp, 1997).

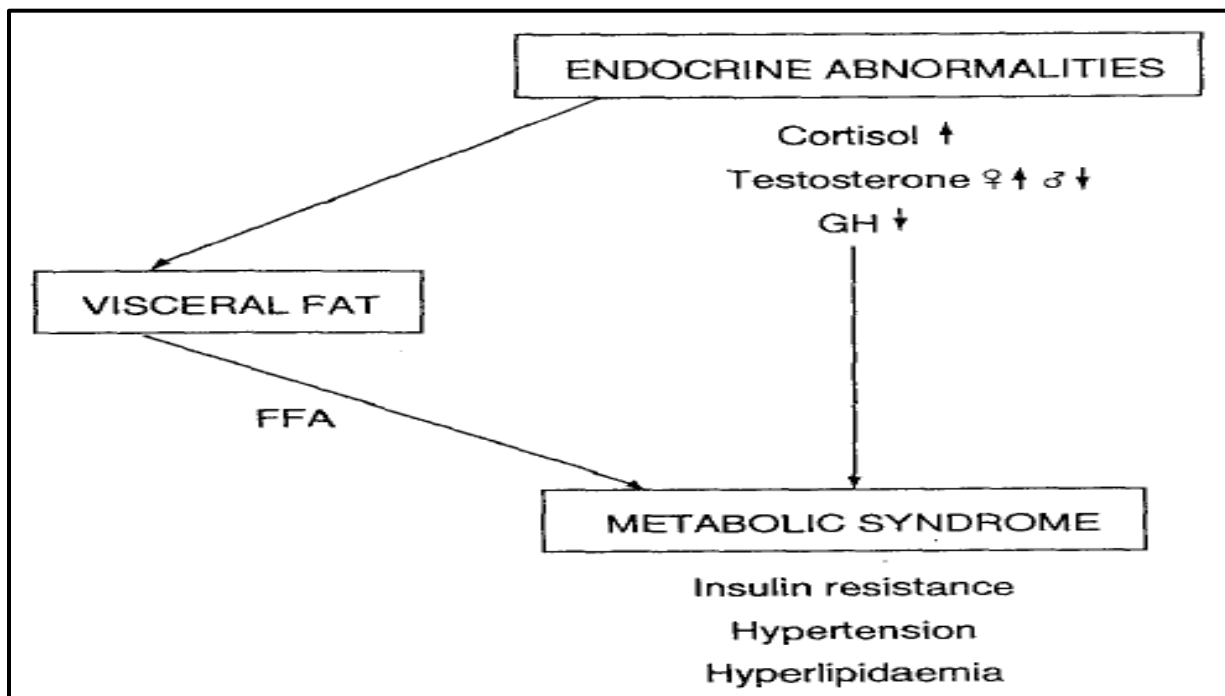


Figure 27: Masse grasse viscérale et perturbations hormonales (Bjorntorp, 1997)

Les perturbations hormonales sont souvent associées à une augmentation du profil inflammatoire et à une infiltration graisseuse du muscle (Tardif et coll. 2011; Zamboni et coll. 2008). Le

sédentarisme et le vieillissement ont donné lieu à la définition du concept d'obésité sarcopénique (Tardif et coll. 2011).

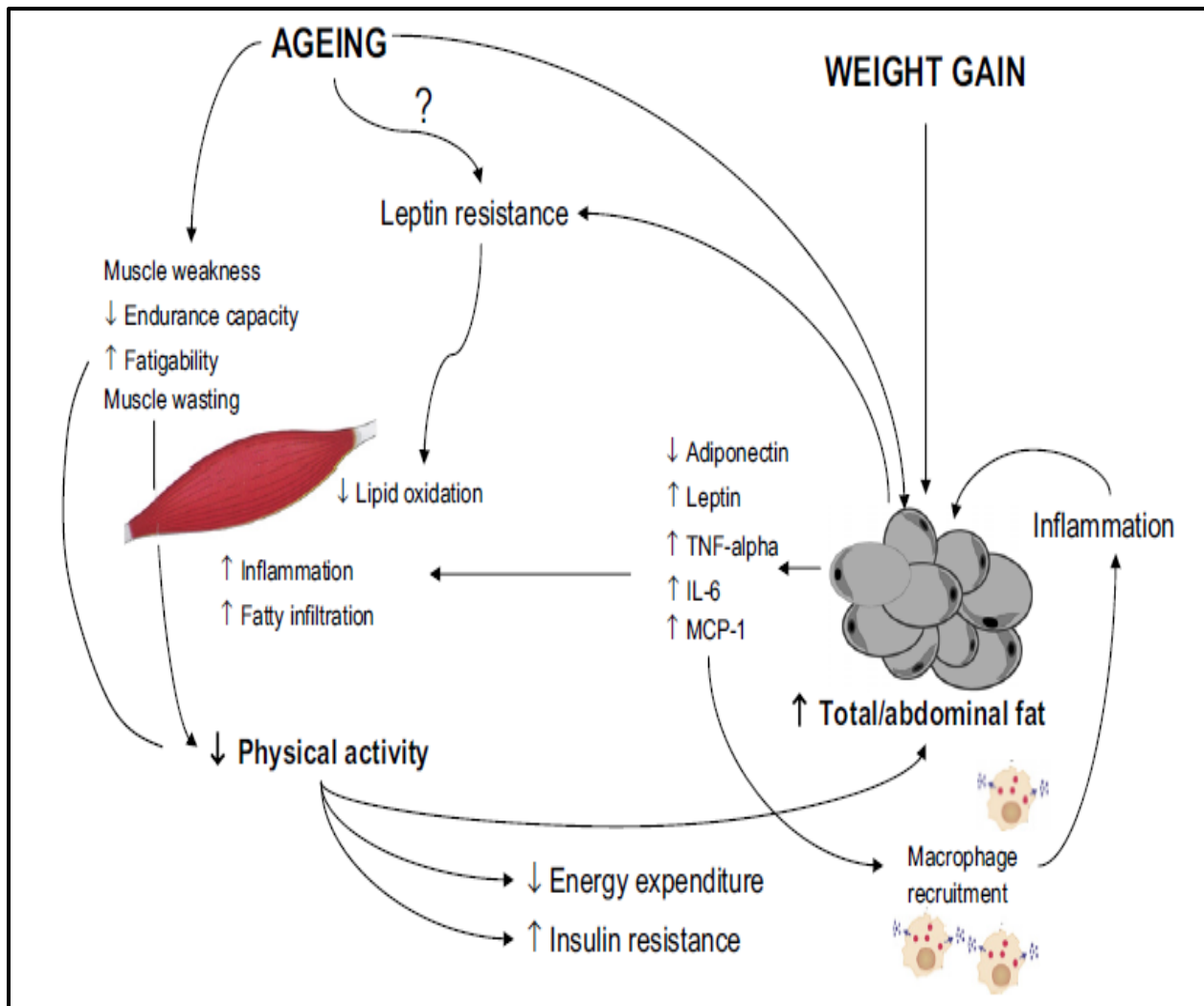


Figure 28: Les relations entre le tissu adipeux et le muscle. Un mécanisme expliquant l'installation de l'obésité sarcopénique (Zamboni et coll. 2008)

Théoriquement, l'obésité sarcopénique peut conduire à plusieurs désordres métaboliques mais également à une augmentation du risque fracturaire (Zamboni et coll. 2008). En accord avec cette théorie, plusieurs études ont montré des effets néfastes de la masse grasse abdominale et de l'obésité sur les paramètres osseux chez les hommes âgés (Zamboni et coll. 2008).

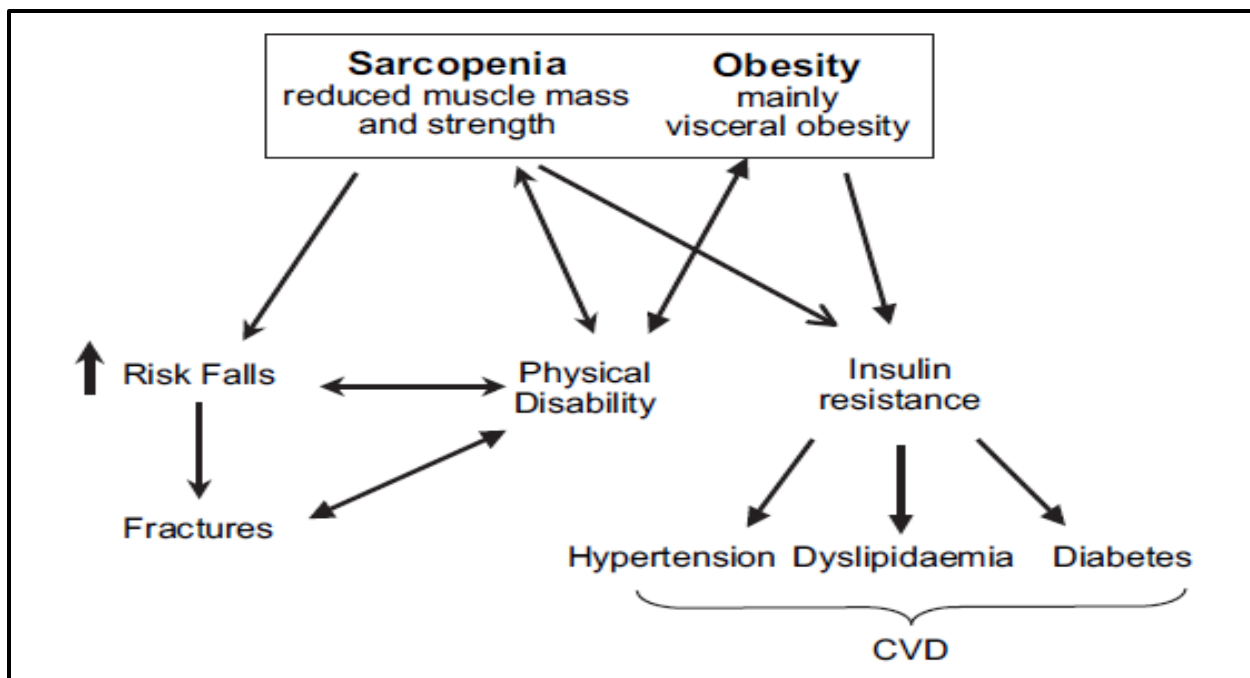


Figure 29: Les conséquences possibles de l'obésité sarcopénique chez les personnes âgées
(Zamboni et coll. 2008)

4.1.3. Le sommeil

Les besoins de sommeil varient d'un individu à l'autre, et cela dépend surtout de l'âge de l'individu (Pigeon, 2012). On note un lien significatif entre la qualité du sommeil et la prise de poids. Des études menées chez des personnes jeunes, adolescents et adultes, montrent qu'une petite durée de sommeil amène à un risque d'obésité, de prise de poids et à des troubles du métabolisme énergétique (Sandalinas, 2011; Curie, 2007). En effet, durant le sommeil, l'activité de plusieurs hormones est régulée, principalement la leptine et la ghréline. Un manque de sommeil conduit à une perturbation du fonctionnement hormonal et donc à une prise de poids (Pigeon, 2012). Cette perturbation conduit à diminuer les sécrétions de la leptine et à augmenter les sécrétions de la ghréline, donc stimuler l'appétit et la prise de poids (Van cauter et Knutson, 2008). De même, une durée de sommeil réduite perturbe la sécrétion de plusieurs hormones (hormones sexuelles, GH, insuline, IGF-1, et PTH) qui régulent la masse osseuse et augmente les cytokines inflammatoires (IL-6 et CRP) et le cortisol. De même, un sommeil court est associé systématiquement à une diminution du niveau d'activité physique usuelle. Ces perturbations

influencent négativement la masse osseuse et peuvent conduire à une augmentation du risque fracturaire.

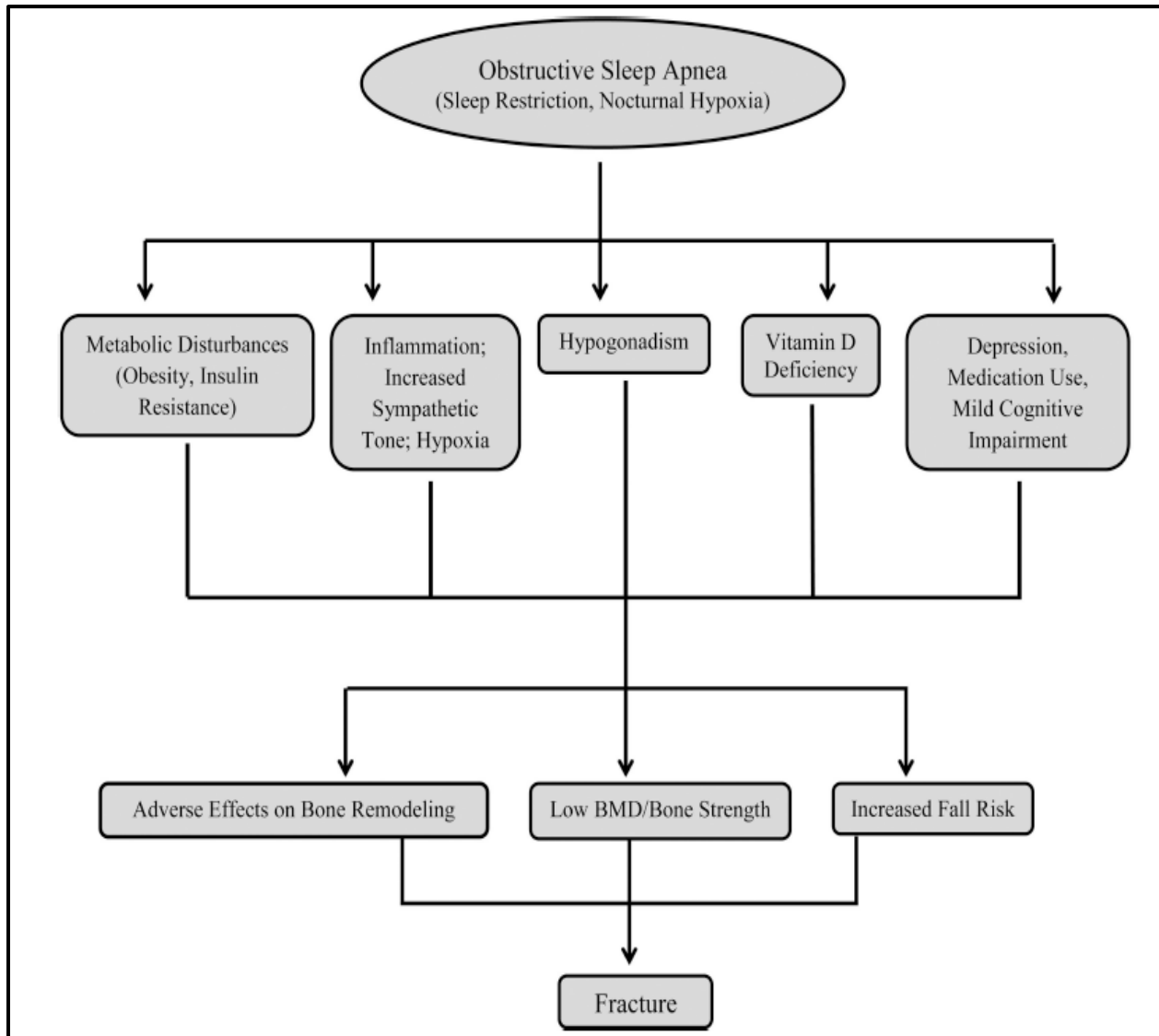


Figure 30: Représentation schématique des mécanismes permettant d'expliquer l'influence du manque de sommeil sur la résistance osseuse et le risque fracturaire (Swanson et coll. 2015)

Plusieurs études in-vivo ont montré des corrélations significatives entre la durée et ou la qualité du sommeil et la DMO (Albayrak et coll. 2016; Magali et coll. 2016; Zakhem et coll. 2014). Cependant, d'autres études n'ont pas retrouvé cette corrélation (Niu et coll. 2015; Sforza et coll.

2013). Des études supplémentaires seront nécessaires afin d'affirmer la relation entre le sommeil et la DMO.

4.1.4. Les polluants organiques

Les polluants organiques ont des effets néfastes sur le métabolisme osseux et peuvent augmenter la fragilité osseuse via la perturbation de la sécrétion des œstrogènes (Miettinen et coll. 2005; Cho et coll. 2011; Miller et coll. 1985). L'obésité associée à une augmentation de la masse grasse stocke les polluants organiques et empêche leur action néfaste sur la DMO (Cho et coll. 2011).

En synthèse de cette partie, la figure suivante nous résume les effets positifs et négatifs de l'obésité sur la DMO

For (obesity protective)	Against (obesity detrimental)
Increased loading on the cortical skeleton	Inflammatory cytokines impair bone formation
Increased protection against falls and fractures	Fatty acids stimulate resorption
Leptin directly stimulates bone formation	Leptin inhibits bone formation via sympathetic system
Greater aromatase activity increases estradiol, which would lead to: decreased bone resorption due to inhibition of RANKL ?stimulation of bone formation ?decreased sympathetic tone	Hyperglycemia impairs bone formation
	Insulinopenia impairs bone formation
	PPAR γ activation, which would lead to: inhibition of bone formation stimulation of resorption
PPAR γ , peroxisome proliferative activated receptors; RANK, receptor activator of nuclear factor κ B (tumor necrosis factor receptor superfamily, member 11a).	

Figure 31: Effets positifs et négatifs de l'obésité sur la DMO (Rosen et Bouxsein, 2006)

4.2. Etudes in-vivo

4.2.1. Le CMO et la DMO

Le CMO CE et le rapport CMO CE/taille sont augmentés chez les sujets obèses (Leonard et coll. 2004; Reid, 2010). La DMO et le rapport DMO/taille sont généralement élevés chez les sujets obèses (Leonard et coll. 2004; Reid et coll. 1992). L'obésité influence davantage la DMO des os porteurs (hanche et rachis lombaire) que celle des os non porteurs (avant-bras) (Bonjour et coll. 2009; Reid, 2010).

4.2.2. La densité minérale osseuse apparente (DMOA)

La DMOA au niveau du corps entier est abaissée chez les obèses (Rocher et coll. 2008; El Hage et coll. 2010). Cependant, la DMOA au niveau du rachis lombaire et du col fémoral est augmentée chez ces derniers (El Hage et coll. 2011a). D'autre part, l'IMC n'est pas significativement corrélé à la DMOA au niveau de l'avant-bras (El Hage et coll. 2011b).

4.2.3. Les indices géométriques de résistance osseuse de la hanche calculés par la technique *HSA*

La CSA et le Z sont augmentés chez les sujets obèses. Le BR est diminué témoignant d'une meilleure stabilité corticale et une meilleure résistance aux fractures de la hanche (Beck et coll. 2009; El Hage et coll. 2013; Petit et coll. 2005; Rocher et coll. 2013).

4.2.4. Les indices de résistance osseuse du col fémoral calculés par la méthode de Karlamangla et coll. (2004)

Les trois indices (CSI, BSI et ISI) sont abaissés chez les sujets obèses (El Khoury et coll. 2016b). L'augmentation de la DMO du col fémoral n'est pas adaptée à l'excès de poids chez les obèses.

4.2.5. Le TBS

Le poids et l'IMC ne sont pas positivement corrélés au TBS chez les adultes (Ayoub et coll. 2016; El Hage et coll. 2013b). De plus, des études montrent des corrélations négatives entre les indices d'adiposité et le TBS chez les hommes (Ayoub et coll. 2016; Romagnoli et coll. 2016). Il faut cependant signaler que des problèmes techniques se posent pour la mesure du TBS chez des sujets ayant un $IMC > 35 \text{ kg/m}^2$ (Hans et coll. 2009; Leslie et coll. 2013).

5. La réponse osseuse aux contraintes mécaniques chez les sujets obèses

5.1. Les principes d'action de l'activité physique sur la densité minérale osseuse

Le collège américain de médecine du sport (ACSM) a proposé cinq principes pour expliquer les effets de l'activité physique sur la DMO: la surcharge, la spécificité, la réversibilité, l'influence du capital de départ et l'entraînabilité.

- La spécificité: La réponse osseuse est limitée aux sites osseux sollicités par les contraintes mécaniques appliquées. A titre d'exemple, une différence significative est observée au niveau de la géométrie osseuse entre le bras dominant et le bras non dominant chez les joueurs de tennis (Ducher et coll. 2009).
- La surcharge: Pour obtenir une réponse ostéogénique significative, la charge d'entraînement doit être supérieure à la charge habituelle. En pratique, il faudra introduire des variations dans l'intensité et / ou le type d'exercices afin d'obtenir des gains osseux.
- La réversibilité: L'arrêt de l'entraînement physique ou la pratique d'activités physiques conduit à des effets délétères sur le métabolisme osseux. Des études montrent une perte osseuse importante lors des périodes de repos total (allitement) ou relatif (arrêt de l'entraînement). Cette perte osseuse peut être expliquée par la diminution des forces mécaniques agissant sur le squelette. Les vols spatiaux sont également associés à une perte osseuse importante qui dépend en particulier de la durée du vol. L'activité physique peut être un facteur important de l'acquisition minérale osseuse seulement si cette

pratique peut induire des contraintes durant un entraînement à long terme (Baxter-Jones et coll. 2008).

- Le capital de départ: En réponse à un entraînement physique, les gains de DMO sont plus importants chez les sujets ayant au départ une DMO plus basse (Baxter-Jones et coll. 2008).
- L'entraînabilité: In-vivo, la valeur maximale de DMO pouvant être atteinte est fixée génétiquement. Les valeurs maximales de DMO diffèrent selon les individus. L'entraînabilité est déterminée par ce potentiel génétique. Plus il est élevé, plus les progrès potentiels du sujet en réponse à l'entraînement physique seront importants (Bonjour et coll. 2009).

5.2. Les lois mathématiques qui régissent les adaptations osseuses aux contraintes mécaniques

Après plusieurs dizaines d'années de recherches menées sur ce sujet, Turner (1998) a énoncé 3 lois concernant ce sujet :

- L'entraînement isométrique n'induit pas de réponses ostéogéniques (Lanyon et Rubin 1984). L'entraînement dynamique est nécessaire pour avoir une réponse osseuse significative (Turner, 1998). Le tissu osseux est sensible aux rythmes des déformations osseuses appliquées (le changement au niveau de la déformation par unité de temps). Les rythmes des déformations les plus importantes conduisent à une meilleure réponse ostéogénique (Lanyon et Rubin, 1984). Ceci suggère qu'il faille mobiliser les charges avec rapidité pour avoir les gains au niveau de la DMO (O'Connor et coll. 1982).
- Une courte durée de contraintes mécaniques est nécessaire pour initier une réponse osseuse (Turner, 1998). L'augmentation excessive de la durée des contraintes n'apporte pas des bénéfices sur le plan osseux. Ceci suggère que les séances d'entraînement doivent être de courte durée (Turner, 1998; Judex et coll. 1999).
- Les cellules osseuses s'habituent aux contraintes mécaniques habituelles qui deviennent non ostéogéniques avec le temps (Turner, 1998). Ceci suggère qu'il faille varier les exercices physiques avec le temps (O'Connor et coll. 1982).

5.3. La spécificité de la réponse osseuse à l'exercice physique en fonction du type d'activité physique chez les obèses

Chez les sujets obèses, l'assiduité à l'entraînement et la qualité d'exécution des mouvements sont nécessaires afin d'obtenir les meilleurs gains osseux (El Hage et coll. 2009b; Mackelvie et coll. 2002). Ces deux points sont extrêmement importants lors de la planification des protocoles d'entraînements visant à augmenter la DMO chez les obèses.

5.3.1. L'entraînement de la force avec charges

Les sujets obèses ont une très bonne adhésion à l'entraînement de la force (Benson et coll. 2008). De plus, ce type d'entraînement a plusieurs bénéfices: l'augmentation de la masse maigre et de la force maximale, la diminution de la masse grasse, l'amélioration du profil lipidique et la diminution de la résistance à l'insuline (Alberga et coll. 2011; Benson et coll. 2008). L'entraînement de la force agit sur les fibres de type 2b qui sont les plus résistantes à l'insuline (Alberga et coll. 2011). L'entraînement de la force peut ainsi réduire le risque d'être atteint par le syndrome métabolique (Alberga et coll. 2011). Plusieurs études menées chez les sujets obèses ont montré des effets positifs sur la DMO (Shah et coll. 2011; Sgro et coll. 2009; Yu et coll. 2005).

5.3.2. L'entraînement en endurance

L'entraînement en endurance a plusieurs effets bénéfiques sur la santé: la diminution de la masse grasse, l'amélioration des aptitudes aérobies, l'amélioration du profil lipidique et la diminution de la résistance à l'insuline. Une étude menée chez des adolescentes a montré des augmentations significatives de la DMO et du CMO chez les adolescentes en surpoids et obèses (El Hage et coll. 2009b). Dans cette étude basée sur des exercices de courses à même intensité relative et des jeux collectifs, l'adhésion des sujets obèses était très bonne, permettant d'expliquer les gains osseux (El Hage et coll. 2009b). Une autre étude a montré que l'entraînement combiné (aérobie plus force) est efficace pour améliorer les paramètres métaboliques et augmenter la DMO chez les adolescents obèses (Campos et coll. 2014).

5.3.3. L'entraînement pliométrique

Les exercices pliométriques sont bien connus pour leurs effets ostéogéniques (Egan et coll. 2006). Une étude montre une adaptation positive du tissu osseux chez des sujets prépubertaires dont l'indice de masse corporelle (IMC) est normal mais pas chez ceux dont l'IMC est supérieur au 75^{ème} percentile après sept mois d'entraînement en sauts (Mackelvie et coll. 2002). Dans cette étude (Mackelvie et coll. 2002), l'absence de résultats positifs chez les sujets dont l'IMC est supérieur au 75^{ème} percentile semble pouvoir être attribuée à la faible adhésion de ces derniers au programme proposé. En effet, de l'avis même des auteurs, l'investissement des sujets en surcharge pondérale dans l'entraînement était relativement plus faible que celui des sujets normaux: les sujets dont l'IMC est inférieur ou supérieur au 75^{ème} percentile faisaient tous des sauts verticaux, et dans ce cas, les sujets dont l'IMC est supérieur au 75^{ème} percentile sont démotivés et surestiment leur effort, ce qui peut expliquer le manque d'adaptation chez ce groupe (Mackelvie et coll. 2002). Le tableau suivant nous résume les résultats de plusieurs études longitudinales menées sur l'influence de l'entraînement physique sur les paramètres osseux chez les sujets obèses.

Tableau 11: Résumé de plusieurs études longitudinales menées sur l'influence de l'entraînement physique sur les paramètres osseux chez les sujets obèses

Auteurs et année	Population	Méthodes	Résultats	Conclusion
Shah et coll. (2011)	107 sujets obèses âgés > 65 ans répartis en 4 groupes: 1) Groupe témoin 2) Groupe faisant un régime alimentaire 3) Groupe faisant un entraînement 4) Groupe entraînement + régime alimentaire	Mesures du poids, de la composition corporelle, de la DMO et des marqueurs du remodelage osseux (ostéocalcine, CTX et PINP). Un an d'entraînement en raison de 3 ENT/semaine. Chaque séance incluait des exercices aérobies et des exercices de musculation avec	- La DMO de la hanche a augmenté uniquement chez le groupe faisant un entraînement (3). - Le poids corporel a diminué chez les groupes 2 et 4. - Les taux de CTX et d'ostéocalcine ont augmenté chez le groupe faisant un régime alimentaire (2) contrairement au groupe 3. - Les taux de PINP ont diminué chez le groupe 3 et ont augmenté chez le 2.	- L'entraînement physique augmente la DMO chez les personnes obèses. - L'entraînement physique associé à un régime alimentaire atténue les effets néfastes de la perte du poids sur le métabolisme osseux.

		charges.	- Une régression multiple a démontré que la masse maigre, la force maximale et les taux d'ostéocalcine sont des déterminants indépendants des variations au niveau de la DMO de la hanche.	
Zaki (2014)	80 femmes ménopausées obèses réparties en deux groupes: 1) Groupe faisant un entraînement vibratoire à haute fréquence 2) Groupe faisant un entraînement de résistance	Huit mois d'entraînement. Mesures de la DMO, de l'IMC et des paramètres de force.	- La DMO a augmenté au niveau du rachis lombaire et de la hanche dans les deux groupes. - Le niveau d'activité physique était corrélé à la DMO. - L'IMC a diminué dans les deux groupes.	L'entraînement vibratoire à haute fréquence augmente la DMO chez les femmes obèses.

Vaitkeviciute et coll. (2014)	206 enfants répartis en 4 groupes en fonction de leur IMC: 1) Sous poids 2) Poids normal 3) Surpoids 4) Obèse	Etude de suivi sur 2 ans: mesure du niveau d'activité physique par l'actimètre.	- L'activité physique moyenne et/ou intense a un effet positif sur la DMO du col fémoral.	Le fait d'être en sous poids augmente le risque d'avoir une DMO faible.
Mackelvie et coll. (2002)	121 enfants prépubères : - Groupe entraîné - Groupe témoin	Entraînement de sauts sur 7 mois: - 3 fois par semaine - 10 minutes par séance	L'entraînement pliométrique a augmenté la DMO chez les enfants ayant un IMC normal ou faible. L'entraînement pliométrique n'a pas augmenté la DMO chez les enfants ayant un IMC relativement élevé.	L'entraînement pliométrique n'augmente pas la DMO chez les enfants ayant un IMC élevé (> 75 ^{ème} percentile).
El Hage et coll. (2009b)	21 adolescentes 6 obèses 8 en surpoids	Entraînement multidisciplinaire de 12 semaines	La DMO sous totale a augmenté significativement dans les trois groupes. Le CMO sous-total a augmenté	L'entraînement multidisciplinaire en endurance est efficace pour augmenter le CMO et la

	7 normo-pondérées		significativement dans les groupes obèses et en surpoids.	DMO chez les adolescentes obèses.
Courteix et coll. (2015)	90 sujets avec syndrome métabolique répartis en trois groupes selon la modalité d'entraînement. 44 sujets témoins	Entraînement mixte d'un an qui diffère selon les modalités: - Force modérée et endurance modérée - Force élevée endurance modérée - Force modérée et endurance élevée	Les trois types d'entraînement ont amélioré les paramètres anthropométriques et métaboliques. La DMO n'a pas augmenté dans les trois groupes entraînés. Dans le groupe entraîné, les sujets les plus adhérents à l'entraînement ont amélioré leur DMO plus que ceux qui étaient les moins adhérents.	Dans le contexte de perte de poids, l'adhérence à l'entraînement conditionne la réponse osseuse.
Campos et coll. (2014)	42 adolescents obèses répartis en deux groupes:	Entraînement pour une durée d'un an.	Les deux groupes entraînés ont amélioré les paramètres métaboliques.	L'entraînement combiné (aérobie plus force) est efficace pour améliorer les paramètres métaboliques et

	Groupe fait un entraînement en endurance Groupe fait un entraînement combiné (endurance + force)		La DMO a augmenté uniquement chez le groupe combiné.	augmenter la DMO chez les adolescents obèses.
Sgro et coll. (2009)	31 adolescents obèses répartis selon la durée d'entraînement G8: 8 semaines d'entraînement G16: 16 semaines d'entraînement G24: 24 semaines d'entraînement	Entraînement de force en raison de 3 fois par semaine.	Le CMO du corps entier a augmenté chez le groupe G24 à t = 24 semaines.	Un entraînement de 24 semaines augmente le CMO du corps entier chez les adolescents obèses.

Yu et coll. (2005)	81 enfants en surpoids/obèses répartis en deux groupes: Groupe faisant un régime alimentaire Groupe faisant un régime alimentaire + entraînement en résistance	Entraînement de 36 semaines: Mesures de la composition corporelle et des paramètres osseux.	Gains plus importants à six mois en masse maigre et en CMO chez le groupe entraîné. A la fin de l'étude, nous avons des tendances mais non significatives.	Chez les adolescents qui sont en restriction alimentaire, l'entraînement de la force est efficace pour améliorer la masse maigre et le contenu minéral osseux.
-----------------------	---	---	--	---

6. Synthèse et objectifs

En synthèse, le pic de DMO est un déterminant important du risque fracturaire et l'optimisation de ce pic est une stratégie importante dans le domaine de la prévention de l'ostéoporose. Ce pic est sous l'influence de plusieurs facteurs y compris les facteurs mécaniques comme le poids et l'activité physique caractérisée par des contraintes biomécaniques. L'un des meilleurs déterminants du pic de DMO est la masse maigre et plusieurs études récentes ont démontré que la masse maigre, la force maximale musculaire et la VO_2 max (L/min) sont fortement corrélées à la DMO chez les adultes normo-pondérés. De plus, le poids corporel est positivement corrélé à la DMO et l'obésité est associée à une augmentation des valeurs de DMO en particulier au niveau des sites porteurs comme la hanche et le rachis lombaire. L'obésité semble également avoir des effets protecteurs contre les fractures de la hanche. Néanmoins, il existe plusieurs arguments en faveur d'un effet négatif de l'obésité sur la masse osseuse et surtout chez les hommes. Une étude longitudinale a suggéré que la réponse ostéogénique à l'entraînement physique serait atténuée chez les sujets obèses. Cependant, plusieurs autres études longitudinales ont démontré un gain significatif de la DMO en réponse à des protocoles d'entraînements chez les personnes obèses. La réponse ostéogénique à l'exercice physique chez les sujets obèses reste peu connue, et les études transversales ayant comparé les paramètres osseux chez des sujets sédentaires obèses ou en surpoids par rapport aux sujets actifs obèses ou en surpoids restent, à notre connaissance, très parcellaires. Par conséquent, ce travail de thèse basé essentiellement sur trois études scientifiques, s'articule autour de trois objectifs principaux :

- Le premier objectif est de comparer les paramètres osseux chez des hommes adultes sportifs en surpoids ou obèses et des hommes sédentaires en surpoids ou obèses.
- Le deuxième objectif est de définir des paramètres de performance physique corrélables à la DMO chez des jeunes hommes en surpoids et obèses.
- Le troisième objectif est d'explorer la relation entre la consommation maximale d'oxygène et les indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI) chez des jeunes hommes en surpoids et obèses.

L'hypothèse principale de ce travail de thèse repose sur l'idée que la masse maigre, la force maximale musculaire et la VO_2 max (L/min) sont des déterminants positifs de la DMO chez les jeunes hommes en surpoids et obèses.

Deuxième partie : Contribution personnelle

Méthodologie générale

1. Matériels et Méthodes

1.1. Sujets

178 jeunes adultes Libanais (56 femmes et 122 hommes) âgés de 18 à 35 ans et 130 adultes Français (85 femmes et 45 hommes) âgés de 18 à 38 ans ont participé à cette thèse. Le recrutement a eu lieu dans plusieurs universités. Les sujets étaient sains, ne recevaient ni traitement médicamenteux ou vitaminique susceptible de modifier leur statut osseux, n'avaient pas d'antécédents de maladie métabolique ou osseuse et n'avaient pas subi d'immobilisation prolongée. Le consentement éclairé a été obtenu des participants.

1.2. Evaluation de la densité minérale osseuse

La composition corporelle et les paramètres osseux (CMO, DMO, géométrie osseuse et TBS) ont été évalués par DXA. La DXA est la méthode de référence pour l'évaluation de la DMO et la composition corporelle. La mesure de la DMO par DXA est relativement rapide, peu irradiante et accessible du fait de sa présence dans la plupart des hôpitaux. Néanmoins, la DXA est une méthode 2D alors que l'os est une structure 3D.

1.3. Ultrasonographie quantitative osseuse

Chez les adultes Français, des mesures ultrasonographiques (Pegasus Smart Medlink®) ont été effectuées au niveau du calcaneus du pied dominant ; le signal est contrôlé en temps réel (visualisation sur l'écran) afin d'éliminer les erreurs de mesure. Les résultats objectivent la BUA. Cette technique est non irradiante, rapide et accessible mais ne permet pas de mesurer directement les paramètres osseux. Cependant, les variables mesurés (SOS et BUA) sont positivement corrélés à la DMO surfacique mesurée par DXA.

1.4. Questionnaires

Des questionnaires validés ont été utilisés afin d'évaluer la consommation calcique journalière, la consommation protéique journalière, le niveau d'activité physique et la qualité de sommeil.

1.5. Tests physiques

Des tests de performance physique (sauts athlétiques, détente verticale, test navette, test de préhension, test de force maximale des membres inférieurs et mesure de la consommation maximale d'oxygène) ont été réalisés dans plusieurs études.

La méthodologie spécifique de chaque étude sera précisée ultérieurement (partie Etudes).

Tableau 12: Design des études

Séries d'études	Titre des études	Objectifs
Etudes antérieures sur les relations entre les niveaux de performance physique et les paramètres osseux chez de jeunes adultes	1a. Les déterminants de santé corrélables à la densité minérale osseuse appréciée par ultrasonométrie	Explorer la relation entre la performance physique et la BUA mesurée au niveau du calcaneum
	1b. Performance physique et densité minérale osseuse chez de jeunes adultes libanais	Explorer la relation entre les paramètres de performance physique et la DMO chez de jeunes adultes
	1c. Étude observationnelle sur l'impact du type d'activité physique sur la densité minérale osseuse, la géométrie osseuse de la hanche et le TBS chez des hommes adultes	Explorer l'influence du type d'activité physique sur la DMO, la géométrie osseuse et le TBS chez de jeunes hommes adultes

Etudes antérieures sur l'influence du statut pondéral sur les paramètres osseux chez de jeunes adultes Libanais	2a. Le Trabecular Bone Score chez des jeunes femmes en surcharge pondérale et normo-pondérées	Explorer l'influence du statut pondéral sur la DMO et le TBS chez de jeunes femmes
	2b. Le Trabecular Bone Score chez des jeunes hommes obèses, en surpoids et normo-pondérés	Explorer l'influence du statut pondéral sur la DMO et le TBS chez de jeunes hommes
Troisième série d'études: Activité physique, performance physique et paramètres osseux chez des jeunes hommes en surpoids et obèses	3a. Influence du niveau d'activité physique sur les paramètres osseux chez des jeunes hommes en surcharge pondérale	Explorer l'influence du niveau d'activité physique sur les paramètres osseux chez des jeunes hommes en surcharge pondérale
	3b. Paramètres osseux chez des jeunes hommes sportifs en surpoids ou obèses et des jeunes hommes sédentaires en surpoids ou obèses	Comparer les paramètres osseux chez des hommes sportifs en surpoids ou obèses et des hommes sédentaires en surpoids ou obèses
	3c. Etude de corrélation entre la consommation maximale d'oxygène et les indices de résistance osseuse du col fémoral chez des jeunes hommes en surpoids et obèses	Explorer la relation entre la consommation maximale d'oxygène et les indices de résistance osseuse du col fémoral chez des jeunes hommes en surpoids et obèses

Etudes antérieures sur les relations entre les niveaux de performance physique et les paramètres osseux chez de jeunes adultes

1a. Les déterminants de santé corrélables à la densité minérale osseuse appréciée par ultrasonométrie

Introduction: La masse osseuse est influencée par de nombreux facteurs comme la génétique, la nutrition, les concentrations de certaines hormones et les contraintes mécaniques (poids du corps et activité physique). Le pic de masse osseuse à 25 ans conditionne la courbe de décroissance de la densité minérale osseuse (DMO) menant à l'ostéoporose. Le but de ce travail était d'étudier les relations éventuelles entre des paramètres de santé facilement mesurables (facteurs anthropométriques, performances physiques et nutrition) et la BUA (Broadband Ultrasound Attenuation ou atténuation du signal ultrasonore) mesurée au niveau du calcaneus.

Méthodes: Au total, 130 sujets (85 femmes et 45 hommes) âgés en moyenne de 21 ans (18 à 38 ans) ont participé à cette étude (Universanté-CEMHaVie). Le poids, la taille, la masse grasse, le tour de hanche et le tour de taille ont été mesurés et l'indice de masse corporelle (IMC) a été calculé. Le niveau de condition physique a été déterminé à l'aide de plusieurs tests: test de Sargent (TS), test de navette (TN) 4 * 10 m et test de force de préhension du poignet (FP). Des questionnaires validés ont été utilisés afin d'évaluer le niveau d'activité physique quotidien (Global Physical Activity Questionnaire [GPAQ]), l'indice de qualité du sommeil de Pittsburgh (IQSP) et la consommation calcique journalière (CCJ). L'atténuation du signal ultrasonique (BUA) a été mesurée au niveau du calcaneum par un appareil de type « Pegasus Smart Medlink® ».

Résultats: Chez les sujets féminins, le poids ($r = 0,46$; $p < 0,001$), l'indice de masse corporelle ($r = 0,43$; $p < 0,001$), la masse grasse ($r = 0,27$; $p < 0,01$), le tour de hanche ($r = 0,25$; $p < 0,01$) et le tour de taille ($r = 0,31$; $p < 0,01$) étaient positivement corrélés à la BUA. En revanche, nous n'avons pas retrouvé de corrélation entre la BUA et la quantité d'activité physique évaluée par le GPAQ, la condition physique (TS, TN et FP) et la consommation calcique journalière. Chez les hommes, aucune corrélation significative n'a été mise en évidence entre les paramètres mesurés et la BUA.

Conclusion: Les caractéristiques morphologiques mesurées dans cette étude (l'IMC, le poids, la masse grasse, le tour de hanche et le tour taille) semblent des déterminants de santé corrélés à la BUA chez les jeunes femmes mais pas chez les jeunes hommes. Ces corrélations paraissent intéressantes à étudier sur une population plus importante.

1. Introduction

L'ostéoporose touche la plupart des pays et constitue un problème majeur de santé publique (Nih et coll. 2001 ; Holroyd et coll. 2008). Cette maladie touche principalement les personnes âgées (Nih et coll. 2001 ; Holroyd et coll. 2008). On estime que plus de 40 millions de citoyens des Etats-Unis ont une ostéoporose ou une ostéopénie, la majorité étant des femmes de plus de 50 ans (Kanis et coll. 1994). En Europe, on estime que plus d'une femme sur 3 ayant plus de 50 ans est ostéoporotique en se fondant sur la définition de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (Cole et coll. 2008 ; Holroyd et coll. 2006).

Les outils d'évaluation du système squelettique ont connu une importante évolution au cours de ces dernières années (Laugier et coll. 2006 ; Xu et coll. 2014). Les variables mesurées par les mesures ultrasonographiques quantitatives osseuses reflètent généralement la résistance osseuse et sont utiles pour déterminer le risque de fracture chez les patients atteints d'ostéoporose (Laugier et coll. 2006 ; Muftic et coll. 2013) et pour une évaluation quantitative de l'os dans un certain nombre de circonstances cliniques (Laugier et coll. 2006 ; Muftic et coll. 2013). L'ultrasonographie a été proposée pour évaluer la densité minérale osseuse (DMO) en raison de son aspect non invasif et non irradiant ainsi que son faible coût (Laugier et coll. 2006 ; Muftic et coll. 2013).

Les résultats des mesures ultrasonographiques effectuées au niveau du calcaneus ont été comparés à la DMO mesurée par DXA au niveau de plusieurs sites (rachis lombaire, hanche et col fémoral). Dans plusieurs études, des relations significatives ont été déterminées entre la mesure ultrasonore et la DMO mesurée par la DEXA dans des différentes tranches d'âges (Greenspan et coll. 1997 ; Huopio et coll. 2004). D'autres études suggèrent que l'ultrasonographie ne peut pas être utilisée pour confirmer le diagnostic de l'ostéoporose (Floter et coll. 2011). Cependant, plus récemment des relations significatives ont été déterminées entre

la BUA (*Broadband Ultrasound attenuation* ou atténuation du signal ultrasonore) et la DMO (Schnitzer et coll. 2012 ; Xu et coll. 2014).

En effet, la BUA signifie le taux de variation de l'atténuation en fonction de fréquence d'une onde ultrasonore (Laugier et coll. 2006). La mesure au calcaneus, généralement qualifiée de transmission transverse, est considérée comme une alternative à l'absorptiométrie biphotonique en raison de l'excellente corrélation à la DMO au niveau de ce site qui est riche en os trabéculaire (Laugier et coll. 2006).

De nombreux facteurs influencent l'acquisition de la masse osseuse comme l'hérédité, qui compte pour environ 60-80% dans la variabilité de la masse osseuse, le sexe, l'activité physique, le statut hormonal et les apports nutritionnels (McGuigan et coll. 2002 ; Bonjour et coll. 2009). Le rôle des caractéristiques anthropométriques sur l'acquisition de la masse osseuse est contradictoire. Certains auteurs trouvent que la masse grasse chez les adolescents et les jeunes adultes n'est pas associée ou est négativement corrélée à la masse osseuse (Weiler, 2000 ; Janicka et coll. 2007). Au contraire, d'autres auteurs ont trouvé que les jeunes femmes (adultes et préménopausées) présentant une masse grasse importante ont un taux plus faible de résorption osseuse et que ce paramètre est un facteur d'augmentation de la DMO (Reid, 1992 ; Zhu et coll. 2014).

Dans d'autres études, des relations positives ont été révélées entre l'indice de masse corporelle et la DMO (Reid, 2002 ; Clark et coll. 2006). Le but de ce travail était d'étudier les relations éventuelles entre des paramètres de santé facilement mesurables (facteurs anthropométriques, performances physiques et nutrition) et l'atténuation du signal ultrasonique mesurée au niveau du calcaneus. En ce qui concerne l'objectif clinique, ce travail a pour but d'encourager les kinésithérapeutes à mesurer la BUA et les caractéristiques anthropométriques afin de diagnostiquer les sujets ayant une faible masse osseuse.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Plan général

L'étude, de type observationnelle transversale, s'inscrit dans un projet global de santé publique dénommé Universanté-CemHavi© (UN, CNIL n 1487869 v 0) comportant un observatoire de la santé des étudiants de la Côte d'Opale et des journées de promotion de la santé. Une journée Universanté (UN) est proposée aux étudiants au début de chaque année universitaire (octobre -

novembre). La participation est facultative mais les étudiants de première année sont fortement incités à y participer dans le cadre de leurs travaux dirigés en promotion de la santé ; leur participation n'est pas valorisée par un bonus de points ou d'ECTS.

2.2. Sujets

L'étude présentée ici porte sur les données recueillies lors de la rentrée universitaire 2013 auprès des primo entrants en institut de formation paramédicale (infirmières, ergothérapeutes et kinésithérapeute). Cent trente jeunes adultes (85 femmes et 45 hommes) âgés de 18 à 38 ans ont participé à cette étude. Ils étaient en bonne santé physique et mentale, sans antécédents médicaux affectant le métabolisme osseux et sans traitement hormonal ou vitaminique susceptible d'influencer le métabolisme osseux.

2.3. Méthodes de recueil des données

Les sujets ont rempli, dans une même unité de temps et de lieu, un questionnaire autoadministré (dépistage des troubles du comportement alimentaire, bien être ; évaluation du niveau d'activité physique usuel et de la quantité et de la qualité du sommeil) puis ont suivi un circuit de mesures physiques dont une mesure ultrasonique au niveau du calcaneus. Un examen clinique a clos la séance de mesures et a orienté éventuellement le participant vers une prise en charge dans le cadre de la partie promotion de la santé (CemHavi). Les déterminants suivants ont été retenus pour ce travail.

2.3.1. Paramètres cliniques

La taille (Leicester High Measure®, Tanita, UK), le poids et la masse grasse (balances OMRON BF 500®, Kyoto, Japan), le tour de taille (en position debout), le tour de hanche (en position debout) et la pression artérielle ont été mesurés.

2.3.2. Qualité de sommeil

Le Questionnaire « Indice de qualité du sommeil de Pittsburgh (PSQI) » évalue la qualité rétrospective et déclarative du sommeil des dernières semaines. Il est associé ici à un recueil déclaratif des heures de coucher et de lever ainsi que de la latence d'endormissement estimée. Le PSQI comprend 19 questions d'auto-évaluation et 5 questions posées au conjoint ou compagnon

de chambre (s'il en est un). Seules les questions d'auto-évaluation sont incluses dans le score. Les 19 questions d'autoévaluation se combinent pour donner 7 "composantes" du score global, chaque composante recevant un score de 0 à 3. Dans tous les cas, un score de 0 indique qu'il n'y a aucune difficulté tandis qu'un score de 3 indique l'existence de difficultés sévères. Les 7 composantes du score s'additionnent pour donner un score global allant de 0 à 21 points, 0 voulant dire qu'il n'y a aucune difficulté, et 21 indiquant au contraire des difficultés majeures (Buysse et coll. 1989).

2.3.3. Tests physiques

Le test de Sargent (qui évalue la force explosive des membres inférieurs) (De Salles et coll., 2012), le test de navette sur 4 x10 mètres (qui évalue la vitesse et la coordination) et le test de force de préhension (Grip D®, Takai, Japan) du poignet (Cuenca-Garcia et coll. 2012) ont été réalisés. Les tests physiques utilisés sont simples, valides et faciles à mettre en place (compte tenu des circonstances où se placent les tests). Par ailleurs, le test de force de préhension est largement utilisé dans les études qui s'intéressent aux associations entre force musculaire et densité minérale osseuse.

Le test de Sargent permet d'évaluer la force explosive et la puissance maximale des membres inférieurs. Dans un premier temps, le sujet s'enduit les doigts de craie. Dans un deuxième temps, en se tenant droit, l'épaule à environ 15 cm du mur, les pieds bien à plat sur le sol, le sujet élève son bras dominant (celui qu'il utilisera lors du test) le plus haut possible et effectue une première marque de craie sur le mur. Dans un troisième temps, sans changer de position, le sujet effectue immédiatement un contre-mouvement et saute le plus haut possible. À l'apogée du saut, le sujet touche une nouvelle fois le mur avec la même main. La détente sèche en centimètres est alors l'écart (arrondi au cm près) entre les deux marques. 3 essais sont autorisés et le meilleur résultat des 3 essais est enregistré.

Le test de navette 4 x 10 m permet d'estimer la vitesse de déplacement, l'agilité et l'évaluation de la coordination. Deux lignes parallèles sont tracées sur le sol, à 10 m de distance. L'exercice est effectué deux fois pour couvrir la distance de 40 m (4 x 10 m). Le participant est invité à se préparer derrière la ligne de départ. L'accélération se débute par un signal sonore suivi des changements de direction. A chaque fois que le sujet traverse une des lignes, il doit ramasser (en premier temps) et faire les échanges (en deuxième et en troisième temps) des éponges qui sont

déplacées derrière les lignes. Le temps est enregistré dès que son pied dépasse la ligne de fond. Trois essais sont demandés pour chaque participant, et la meilleure performance est retenue.

Le test de force de préhension permet de mesurer la force maximale dynamométrique de préhension de la main dominante. Le participant serre la poignée du dynamomètre le plus fort possible (le membre supérieur était étendu le long du corps). L'appareil enregistre la force maximale. Les participants réalisent trois essais. La meilleure performance est retenue.

2.3.4. Niveau usuel d'activité physique

L'activité physique a été évaluée par le questionnaire GPAQ (Bull, 2009). Le volume hebdomadaire d'activité physique a été enregistré (Bull et coll. 2009).

2.3.5. Consommation calcique journalière (CCJ)

La CCJ a été évaluée par un questionnaire fréquentiel (Fardellone et coll. 1991). Ce questionnaire comporte 30 questions évaluant la consommation de produits laitiers, viandes, poissons, oeufs, diverses céréales, légumes secs, légumes verts, fruits, desserts, eau (minérale et du robinet), jus de fruits et boissons alcoolisées (vin, bière et cidre). Aucun sujet ne recevait de suppléments calciques dans notre étude.

2.3.6. Ultrasonographie quantitative osseuse.

Des mesures Ultrasonographiques (Pegasus Smart Medlink®) ont été effectuées au niveau du calcaneus du pied dominant ; le signal est contrôlé en temps réel (visualisation sur l'écran) afin d'éliminer les erreurs de mesure. Les résultats objectivent la BUA. Le principe de fonctionnement est basé sur les modifications de la transmission des ultrasons par l'os minéralisé. Cette méthode est non irradiante, non invasive, peu coûteuse et beaucoup moins encombrante qu'un appareil de DXA. Les ultrasons sont des vibrations mécaniques dont la fréquence est supérieure à 20 kHz. Un appareil à ultrasons est équipé de deux transducteurs : un qui émet le signal et l'autre qui le réceptionne, la zone à analyser se positionnant entre les deux. Le couple émetteur-récepteur peut être l'un en face de l'autre dans le cas de la transmission transverse, ou bien l'un à côté de l'autre dans le cas de la transmission longitudinale. C'est ainsi, que seuls des sites osseux périphériques peuvent être mesurés, comme le calcaneus (qui est le site le plus souvent mesuré dans les études). La mesure qui est généralement effectuée

correspond à l'atténuation de l'intensité de l'onde ultrasonore (BUA). L'atténuation peut se définir comme étant la résultante des phénomènes d'absorption et de diffusion dus à l'os, la moelle et les tissus mous. La valeur de BUA a été décrite comme étant un reflet de la DMO (Laugier et coll. 2006).

2.3.7. Statistiques

Les données sont traitées à l'aide du logiciel R, et sont exprimées en moyenne $\pm$ écart types. Les différences inter-sexes ont été précisées par le test-*t* de Student. Les corrélations ont été précisées par le test de Pearson pour les distributions normales et par le test de Spearman pour les distributions non normales. Une valeur de $p < 0,05$ était exigée afin d'affirmer le caractère significatif des résultats.

3. Résultats

3.1. Caractéristiques cliniques et BUA de la population étudiée

L'âge, les caractéristiques morphologiques (le poids, la taille, la masse grasse, l'IMC, le tour de hanche, le tour de taille), les apports nutritionnels, le PSQI, le niveau d'activité physique usuel, le niveau de performance physique (tests de Sargent, de navette et de force de poignet) et la mesure de la BUA de la population étudiée apparaissent dans le tableau 13. Il y avait des différences inter-sexes significatives au niveau du poids, de la taille, du pourcentage de la masse grasse, du tour de taille, de la CCJ, du volume hebdomadaire d'activité physique et des performances obtenues dans les différents tests physiques.

3.2. Corrélations entre les caractéristiques cliniques et la BUA chez les jeunes femmes

Le poids ($r = 0,46$; $p < 0,001$), l'indice de masse corporelle ($r = 0,43$; $p < 0,001$), la masse grasse ($r = 0,27$; $p < 0,01$), le tour hanche ($r = 0,25$; $p < 0,01$) et le tour taille ($r = 0,31$; $p < 0,01$) étaient faiblement corrélés à la BUA (Tableau 14).

3.3. Corrélations entre les caractéristiques cliniques et la BUA chez les jeunes hommes.

Nous n'avons pas trouvé de corrélations entre les paramètres mesurés chez les jeunes hommes et la mesure de la BUA (tableau 15).

4. Discussion

L'effet des caractéristiques anthropométriques sur la densité minérale osseuse est décrit depuis les années 1990. Cet effet dépend généralement de l'âge ou du stade pubertaire (pubère, adolescent, jeune adulte et adulte), du sexe (homme, femme), de l'indice de masse corporelle (sous poids, normal, surpoids et obèse) et des sites osseux mesurés (porteurs et non porteurs) (Weiler et coll. 2000 ; Clark et coll. 2006).

Dans notre étude menée sur 130 jeunes adultes français, l'indice de masse corporelle est positivement corrélé à la BUA mesurée au niveau du calcanéum, chez les jeunes femmes mais pas chez les jeunes hommes. Dans ce travail, on note également que la masse grasse était faiblement corrélée à la BUA chez les jeunes femmes ; ceci est en accord avec des études précédentes (Reid, 1992 ; Zhu et coll. 2014) et suggère que chez les femmes la masse grasse peut stimuler la formation osseuse en régulant certains facteurs hormonaux (Zhu et coll. 2014 ; Reid, 2002). Le tour de hanche et le tour taille ont été corrélés à la BUA. En revanche, la répartition de la masse grasse en fonction du rapport du tour taille sur le tour de hanche n'était pas corrélée à la BUA ; ce résultat se rapproche de celui d'une étude antécédente (Benetou et coll. 2011).

Cependant, nous signalons qu'il existe plusieurs composants du syndrome métaboliques autre que le rapport tour de taille/tour de hanche (Folsom et coll. 2000 ; El Hage et coll. 2012). De ce fait, il est difficile de comparer les résultats de plusieurs études qui ont essayé d'explorer l'influence du syndrome métabolique sur le tissu osseux quand ces études ont utilisé des composants différents (Folsom et coll. 2000 ; El Hage et coll. 2012).

Enfin, chez les femmes, aucune corrélation n'était observée entre la BUA et les performances physiques (test de Sargent, navette et force de poignet) et les facteurs environnementaux (PSQI, CCJ et APu). Chez les jeunes hommes, aucun des paramètres mesurés ou évalués n'est corrélé à la BUA. Cependant, il faut noter que le pourcentage de masse grasse chez les jeunes femmes était significativement plus élevé que chez les jeunes hommes. Cette différence peut expliquer que la corrélation entre les caractéristiques anthropométriques et la BUA n'a été retrouvée que chez les jeunes femmes et nécessiterait d'autres investigations. En effet, la masse grasse peut stimuler la formation osseuse en produisant des oestrogènes à travers l'aromatisation des androgènes et en augmentant les concentrations d'insuline et le taux périphérique de la leptine. Ces modifications hormonales entraînent habituellement une augmentation de la masse osseuse. En conclusion, nos résultats suggèrent que chez les femmes, les caractéristiques morphologiques

(l'IMC, le poids, la masse grasse, le tour de hanche et le tour taille) sont des déterminants de santé corrélés à la BUA. Ce résultat n'est pas retrouvé chez les jeunes hommes. L'identification des facteurs corrélables à la DMO ou la BUA à l'âge du pic de masse osseuse peut aider à prévenir de manière précoce l'ostéopénie et l'ostéoporose. En perspectives, la mesure de la BUA et des caractéristiques anthropométriques par le kinésithérapeute peut aider à définir le futur risque ostéoporotique chez les jeunes femmes. Ces résultats doivent maintenant être confirmés lors d'une étude de plus grande ampleur, car ce petit échantillon ne permet pas d'évaluer précisément les facteurs qui ont un impact important sur la minéralisation et constitue la principale limite méthodologique de notre travail. De plus, il serait intéressant dans le futur d'explorer les importances relatives des caractéristiques anthropométriques, des apports nutritionnels, du niveau d'activité physique et du niveau de performance physique sur la DMO et la BUA en fonction de l'âge et du sexe.

Tableau 13: Caractéristiques cliniques et BUA de la population étudiée

	Femmes (n = 86)	Hommes (n = 45)
Age (ans)	21,9 ± 5,8	22,4 ± 4,9
Poids (kg)	63,3 ± 12,1 ***	72,7 ± 10,2
Taille (cm)	1,64 ± 0,05 ***	1,77 ± 0,07
IMC (kg/m ²)	23,6 ± 4,1	23,2 ± 2,5
Masse grasse (%)	33,6 ± 7,2 ***	18,5 ± 5,7
Tour taille (cm)	75,4 ± 10,6 ***	79,06 ± 7,7
Tour hanche (cm)	97,2 ± 11,8	95,4 ± 7,1
Tour de taille/tour de hanche	0,77 ± 0,08 **	0,82 ± 0,04
Temps passé au lit (h)	7,6 ± 1,05	7,4 ± 0,8
PSQI	6,1 ± 2,9	5,4 ± 2,7
CCJ (mg/j)	603 ± 253 ***	854 ± 366
Test de Sargent (cm)	27,8 ± 5,7 ***	48,2 ± 10,2
Test de navette 4 x 10 m (secondes)	14,5 ± 2,9 ***	12,2 ± 1,5
Force de poignet (kg)	26,7 ± 5,5 ***	42,8 ± 7,5
APu (heures/semaine)	3,0 ± 2,7 ***	6,2 ± 4,0
BUA (dB/MHz)	77,3 ± 5,9	78,6 ± 6,1

BUA : Broadband Ultrasound Attenuation ; IMC : indice de masse corporelle ; IQSP : indice de qualité du sommeil de Pittsburgh ; CCJ : consommation calcique journalière ; APu : activité physique usuelle ; *** différences significatives entre femmes et hommes, $p < 0,001$; ** différences significatives entre femmes et hommes, $p < 0,01$

Tableau 14: Corrélations entre les caractéristiques cliniques et la BUA chez les femmes

	BUA	Valeur de p
Age (ans)	0,11	0,27
Poids (kg)	0,46 ***	< 0,001
Taille (cm)	0,11	0,30
IMC (kg/m ²)	0,43 ***	< 0,001
Masse grasse (kg)	0,27 **	< 0,01
Tour taille (cm)	0,31 **	< 0,01
Tour hanche (cm)	0,25 **	< 0,01
Tour de taille/tour de hanche	-0,15	0,08
Temps passé au lit (h)	-0,16	0,12
PSQI	0,15	0,15
CCJ (mg/j)	0,19	0,08
Test de Sargent (cm)	-0,10	0,31
Test de navette 4 x 10 m (secondes)	-0,02	0,84
Force de poignet (kg)	-0,06	0,57
APu (heures/semaine)	0,08	0,41

BUA : Broadband Ultrasound Attenuation ; IMC : indice de masse corporelle ; PSQI : indice de qualité du sommeil de Pittsburgh ; CCJ : consommation calcique journalière ; APu : activité physique usuelle ; *** P < 0,001 ; ** P < 0,01.

Tableau 15: Corrélations entre les caractéristiques cliniques et la BUA chez les hommes

	BUA
Age (ans)	-0,15 ns
Poids (kg)	-0,12 ns
Taille (cm)	-0,12 ns
IMC (kg/m ²)	-0,17 ns
Masse grasse (kg)	-0,14 ns
Tour taille (cm)	-0,01 ns
Tour hanche (cm)	-0,02 ns
Tour de taille/tour de hanche	-0,19 ns
Temps passé au lit (h)	0,12 ns
PSQI	0,06 ns
CCJ (mg/j)	-0,08 ns
Test de Sargent (cm)	-0,01 ns
Test de navette 4 x 10 m (secondes)	0,05 ns
Force de poignet (kg)	0,12 ns
APu (heures/semaine)	0,08 ns

BUA : Broadband Ultrasound Attenuation ; IMC : indice de masse corporelle ; IQSP : indice de qualité du sommeil de Pittsburgh ; CCJ : consommation calcique journalière ; APu : activité physique usuelle ; ns : valeur non significative ($p < 0,05$).

1b. Performance physique et densité minérale osseuse chez de jeunes adultes libanais

Introduction: Le but de cette étude est d'explorer les relations entre les performances obtenues dans plusieurs tests physiques et les paramètres osseux évalués par la mesure de la densité minérale osseuse (DMO) et du contenu minéral osseux (CMO) chez un groupe de jeunes adultes libanais.

Méthodes: 106 sujets sains (45 femmes et 61 hommes) âgés en moyenne de 22 ans ont participé à cette étude. Le poids et la taille ont été mesurés, et l'indice de masse corporelle (IMC) a été calculé. Le niveau de performance physique a été mesuré à l'aide de plusieurs tests physiques: détente verticale (DV), détente horizontale (DH), triple bond (TB), 5 sauts pieds joints et force maximale des membres inférieurs évaluée par le test de demi-squat (DS). La composition corporelle, la DMO et le CMO du corps entier (CE), la DMO du rachis lombaire (L2-L4), la DMO de la hanche totale (HT) et la DMO du col fémoral (CF) ont été mesurés par absorptiométrie biphotonique à rayons-X (DXA).

Résultats: Chez les femmes, la taille, la masse maigre, la force maximale en demi-squat et les performances obtenues dans trois tests physiques (DV, 5 sauts pieds joints et DS) étaient positivement corrélés aux valeurs de DMO et de CMO. Chez les hommes, la masse maigre et la force maximale en demi-squat étaient positivement corrélées aux valeurs de DMO et de CMO.

Conclusion: Cette étude suggère que la masse maigre et la force maximale en demi-squat sont positivement corrélées à la DMO chez les jeunes adultes.

1. Introduction

L'ostéoporose est un problème de santé publique majeur dans la plupart des pays (Bonjour et coll. 2009). Cette maladie osseuse fréquente est caractérisée par une DMO faible et par des détériorations micro-architecturales du tissu osseux induisant une augmentation du risque de fracture au niveau de plusieurs sites osseux (Bonjour et coll. 2009). Le pic de masse osseuse atteint durant la troisième décennie de la vie est un déterminant important du futur risque

fracturaire (Bonjour et coll. 2007). De ce fait, l'augmentation de la valeur atteinte par le pic de DMO représente une importance capitale dans le domaine de la prévention de l'ostéoporose (Bonjour et coll. 2009). Le pic de masse osseuse est régulé par plusieurs facteurs comme la génétique, la nutrition, les hormones, les forces mécaniques (comme le poids du corps et l'activité physique) et d'autres facteurs comme le sommeil et le niveau de stress (bonjour et coll. 2009 ; Bonjour et coll. 2007).

La pratique régulière d'activités physiques caractérisées par des contraintes mécaniques importantes stimule la formation osseuse et améliore la DMO dans les sites les plus sollicités (Ainsworth, 2002 ; El Hage, 2012). En effet, selon la théorie de Frost (Frost, 2003) dite du mécanostat, la résistance de l'os s'adapte aux contraintes mécaniques qui lui sont appliquées. Cette théorie a été soutenue par de nombreuses études menées sur les animaux (Hart, 2001 ; Warner, 2006). Chez l'être humain, il a été démontré que le poids corporel et la masse maigre sont les meilleurs déterminants de la DMO dans les deux sexes (Petit et coll. 2005 ; Kobayashi et coll. 2005). De nombreuses études ont également montré une corrélation significative entre la DMO et les performances obtenues dans certains tests physiques utilisés en pratique sportive courante (Vincente-Rodriguez et coll. 2004 ; Sherk et coll. 2009). Le but de cette étude est d'explorer les relations entre les performances réalisées lors de différents tests physiques (détente verticale, détente horizontale, triple bonds, 5 sauts pied joints et force maximale en demi-squat) et la DMO chez des jeunes adultes libanais. L'identification de nouveaux déterminants de la DMO permettrait un dépistage et une prise en charge précoce des futurs cas d'ostéopénie et d'ostéoporose.

2. Matériels et méthodes

2.1. Sujets

Cent six jeunes adultes Libanais (45 femmes et 61 hommes) âgés en moyenne de 22 ans (17 à 34 ans) ont volontairement participé à cette étude. Le recrutement a eu lieu dans plusieurs Universités privées. Les sujets étaient sains, ne recevaient ni traitement médicamenteux ou vitaminique susceptible de modifier leur statut osseux, n'avaient pas d'antécédent de maladie métabolique ou osseuse et n'avaient pas subi d'immobilisation prolongée. Le consentement éclairé a été obtenu des participants. Ce protocole a reçu l'approbation du comité d'éthique de l'Université de Balamand.

2.2. Mesures des caractéristiques anthropométriques et de la densité minérale osseuse

Le poids et la taille ont été mesurés à l'aide d'une balance électronique (Taurus, précision = 0,1 kg) et d'une toise (Seca, précision = 0,1 cm). L'indice de masse corporelle (IMC) a été calculé comme le poids corporel divisé par la taille au carré (kg/m^2). Des mesures d'absorptiométrie biphotonique à rayons-X (GE Healthcare, Lunar iDXA) ont été réalisées au niveau du corps entier, du rachis lombaire, de la hanche entière et du col fémoral. La masse maigre et la masse grasse ont également été déterminées par DXA. Toutes ces mesures ont été réalisées par le même technicien et sur la même machine dans le même centre hospitalier. Dans ce centre, le coefficient de variation pour les mesures de DMO était inférieur à 1 % (El Hage et coll. 2012).

2.3. Consommation calcique journalière (CCJ)

La CCJ a été évaluée par un questionnaire fréquentiel préalablement validé (Morin, 2005). Ce questionnaire comporte 30 items : produits laitiers, viandes, poissons, œufs, diverses céréales, légumes secs, légumes verts, fruits, desserts, eau (minérale et du robinet), jus de fruits et

boissons alcoolisées (vin, bière et cidre). Aucun sujet ne recevait de suppléments calciques dans notre étude.

2.4. Consommation protéique journalière (CPJ)

La CPJ a été évaluée par un questionnaire fréquentiel préalablement validé. Ce questionnaire comporte 20 items : produits laitiers, fromages, viandes, poissons, œufs, pommes de terres, haricots, lentilles, légumes secs, pains, pizzas, crèmes glacées... Aucun sujet ne recevait de suppléments protéiques dans notre étude.

2.5. Activité physique (AP)

Le volume hebdomadaire (heures/semaines) de pratique sportive a été évalué par un questionnaire validé (Ainsworth et coll. 2002).

2.6. Sauts athlétiques (détente horizontale, triple bonds et 5 sauts pieds joints)

Les performances physiques dans les trois tests athlétiques (détente horizontale, triple bonds et 5 sauts pieds joints) ont été mesurées comme précédemment décrit (Chamari et coll. 2008; Hudgins et coll. 2012). Les mesures ont été effectuées dans la même journée et avec un temps de récupération de 5 minutes (entre les trois types de sauts). Trois essais ont été réalisés pour chaque test physique (avec trois minutes de récupération entre les essais) et le meilleur saut a été enregistré.

2.7. Demi-squat (DS)

La force maximale en demi-squat a été évaluée par un appareil de musculation classique (Smith machine) en respectant les instructions de l'Association nationale de conditionnement et de force musculaire (Hanson et coll. 2007).

2.8. Détente verticale (DV)

La détente verticale a été évaluée à l'aide d'un accéléromètre (Myotest Pro). Deux paramètres principaux ont été retenus : la détente verticale (centimètre), et la puissance (w). Les sujets réalisaient trois séries de cinq sauts (*Counter movement jump* ou CMJ) avec deux minutes de récupération entre les séries. Nous avons retenu le meilleur essai sur base de la détente verticale la plus élevée (Jidovtseff et coll. 2008 ; McNair et coll. 2011).

2.9. Statistiques

Les analyses statistiques ont été effectuées par le logiciel R©. Les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux sont exprimés en moyenne $\pm$ la déviation standard. Les différences inter-sexes ont été précisées par le test-*t* de Student. Les corrélations ont été précisées par le test de Pearson. Des régressions linéaires multiples ont été utilisées pour tester les relations entre les paramètres osseux (DMO et CMO) et plusieurs déterminants de la masse osseuse (comme la masse maigre et la force maximale en demi-squat). Une valeur de $p < 0,05$ était exigée pour affirmer le caractère significatif des résultats.

3. Résultats

3.1. Caractéristiques cliniques et paramètres osseux de la population étudiée

L'âge, les caractéristiques morphologiques, le volume hebdomadaire d'activité physique, les performances obtenues dans les tests physiques (DV, DH, TB, 5 sauts et force maximale en DS), les apports alimentaires (CCJ, CPJ) et les paramètres osseux de la population étudiée apparaissent dans le (Tableau 16). L'âge n'était pas différent entre les hommes et les femmes. Le poids, la taille, la masse maigre, la force maximale en demi-squat et les valeurs de DMO étaient significativement supérieurs chez les hommes que chez les femmes ($P < 0,001$).

3.2. Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux chez les jeunes femmes

La taille, la masse maigre et les performances obtenues en DV, 5 sauts pieds joints et DS étaient positivement corrélés aux valeurs de DMO et de CMO (Tableau 17). La masse maigre était positivement corrélée au CMO CE ($r = 0,85$; $P < 0,001$), à la DMO CE ($r = 0,75$; $P < 0,001$), à la DMO L2-L4 ($r = 0,70$; $P < 0,001$), à la DMO HE ($r = 0,75$; $P < 0,001$) et à la DMO CF ($r = 0,74$; $P < 0,001$). La force maximale en demi-squat était positivement corrélée au CMO CE ($r = 0,60$; $P < 0,01$), à la DMO CE ($r = 0,52$; $P < 0,01$), à la DMO L2-L4 ($r = 0,72$; $P < 0,001$), à la DMO HE ($r = 0,57$; $P < 0,01$) et à la DMO CF ($r = 0,63$; $P < 0,001$).

3.3. Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux chez les jeunes hommes

La MM et la force maximale en DS étaient positivement corrélés aux valeurs de DMO et de CMO (Tableau 18). La masse maigre était positivement corrélée au CMO CE ($r = 0,68$; $P < 0,001$), à la DMO CE ($r = 0,59$; $P < 0,01$), à la DMO L2-L4 ($r = 0,41$; $P < 0,01$), à la DMO HE ($r = 0,34$; $P < 0,05$) et à la DMO CF ($r = 0,28$; $P < 0,05$). La force maximale en demi-squat était

positivement corrélée au CMO CE ($r = 0,69$; $P < 0,001$), à la DMO CE ($r = 0,73$; $P < 0,001$), à la DMO L2-L4 ($r = 0,63$; $P < 0,001$), à la DMO HE ($r = 0,59$; $P < 0,001$) et à la DMO CF ($r = 0,51$; $P < 0,001$).

3.4. Régressions linéaires multiples

Chez les femmes, la masse maigre était un meilleur déterminant positif de la DMO et du CMO que la force maximale en DS (Tableau 19). La force maximale en DS était un meilleur déterminant positif de la DMO et du CMO que la masse maigre chez les hommes (Tableau 20).

4. Discussion

Cette étude menée chez 106 jeunes adultes Libanais a principalement montré que la masse maigre et la performance en demi-squat sont des variables positivement corrélées à la DMO et au CMO.

Le poids corporel était corrélé à la DMO CE et au CMO CE des jeunes hommes et à la DMO au niveau de la plupart des sites osseux chez les jeunes femmes ; ces résultats sont en accord avec ceux de plusieurs études (Reid et coll. 2008 ; El Hage et coll. 2013). Une corrélation significative a été retrouvée entre l'IMC et la DMO CE chez les jeunes hommes ; il est généralement admis que les valeurs brutes de DMO sont plus élevées chez les sujets en surpoids et obèses par rapport aux sujets normo-pondérés (Petit et coll. 2005 ; Ellis et coll. 2003 ; El Hage et coll. 2009).

En revanche, nous ne retrouvons pas de corrélation entre l'IMC et la DMO chez les jeunes femmes. Parmi les différents paramètres étudiés, la masse maigre était l'un des meilleurs déterminants positifs des valeurs de DMO et de CMO dans les deux sexes. Cette forte relation entre la masse maigre et les paramètres osseux est en accord avec de nombreuses données de la

littérature (Douchi et coll. 2003 ; Travison et coll. 2008). Dans les deux sexes, nous ne retrouvons pas de corrélations entre la masse grasse et les valeurs de DMO ou de CMO. En effet, il a été signalé que l'importance relative du tissu adipeux sur les valeurs de CMO et de DMO est supérieure chez les femmes post-ménopausées par rapport aux jeunes adultes (Heiss et coll. 1995 ; Reid et coll. 2008).

Les contraintes mécaniques influencent la masse osseuse et l'architecture dépend fort probablement des forces dynamiques appliquées sur l'os (Vainionpaa, 2009). Dans notre étude, une forte corrélation a été retrouvée entre la force maximale en demi-squat et les valeurs de DMO et de CMO dans les deux sexes. Nos résultats renforcent les résultats de nombreuses études expérimentales qui ont montré que les contraintes musculaires sont des déterminants de la réponse ostéogénique (Lanyon et coll. 1996 ; Hsieh et coll. 2001).

Chez les femmes, les performances obtenues dans deux tests athlétiques (DV et 5 sauts pieds joints) étaient corrélées aux valeurs de DMO et de CMO. Chez les hommes, la performance obtenue en DH était corrélée à la DMO du rachis lombaire. Nos résultats sont en accord avec ceux de plusieurs études qui ont démontré que la force de préhension et le niveau de puissance musculaire sont des déterminants positifs de la DMO (Dixon et coll. 2005 ; Sherk et coll. 2009). Notons que nos tests physiques (DH, DV, TB 5 sauts et squat) sont des tests fonctionnels utilisés dans des différents sports collectifs tels que le basketball, le football et le handball (Soderman et coll. 2000 ; El Hage et coll. 2012). Dans cette logique, il n'est pas surprenant de remarquer que les sportifs de haut niveau qui pratiquent ces types de sports collectifs et qui ont de bonnes performances dans les tests physiques que nous avons utilisés dans notre étude (DH, DV, TB, 5 sauts et squat) ont généralement des densités minérales osseuses élevées et nettement supérieures par rapport aux sujets sédentaires. Notons que la corrélation entre la performance obtenue au test

qui exprime la force maximale (demi-squat) et la DMO était, de manière générale, plus forte par rapport aux corrélations entre les performances aux tests qui expriment la puissance relative (détente verticale, détente horizontale, triple bonds et 5 sauts) et la DMO.

Il n'y avait pas de corrélations chez les femmes entre l'AP (heures/semaine) et les valeurs de DMO. En revanche, une corrélation significative a été retrouvée chez les jeunes hommes entre les deux paramètres. Dans notre étude, le niveau d'activité physique était significativement supérieur chez les hommes par rapport aux femmes. La pratique particulière de certains types d'activités physiques nécessitant des mouvements de flexion-extension comme les sports collectifs renforce les os en améliorant leur contenu minéral et leur architecture (Soderman et coll. 2000). En effet, c'est le type d'activité physique qui influence davantage la DMO que le volume hebdomadaire d'activité physique.

Dans notre étude, la force maximale en DS était le meilleur déterminant des valeurs de DMO et de CMO chez les hommes (Tableaux 3 et 5). En revanche, chez les femmes, la masse maigre était le meilleur déterminant des valeurs de DMO et de CMO (Tableaux 2 et 4). Il semblerait que l'importance relative de la masse maigre et de la force maximale en demi-squat sur la DMO dépende du sexe. Afin d'expliquer ce résultat, il semble probable que les hommes soient plus entraînés à ce mouvement (demi-squat). En outre, il a été démontré que la masse maigre est un fort déterminant de la DMO et des indices géométriques osseux de la hanche chez les femmes (Petit et coll. 2005 ; El Hage et coll. 2013). Il y avait d'autres différences inter-sexes au niveau des relations entre les performances obtenues dans les tests physiques et la DMO. En effet, les performances obtenues aux tests qui expriment la puissance musculaire relative (détente verticale, détente horizontale, triple bonds et 5 sauts) étaient corrélées positivement à la DMO de la hanche chez les femmes mais pas chez les hommes. En effet, dans notre étude, l'IMC était

significativement supérieur chez les hommes que chez les femmes. Un homme avec un IMC élevé peut avoir une force maximale élevée et une puissance absolue élevée mais une puissance relative faible étant donné son poids élevé. Ceci pourrait expliquer le manque de corrélations entre la plupart des performances obtenues aux tests qui expriment la puissance relative (détente verticale, détente horizontale, triple bonds et 5 sauts) et la DMO chez les hommes. Au contraire, la plupart des femmes était normo-pondérée ; Ainsi, une femme qui a une force maximale élevée va avoir une puissance relative au corps élevée. Ceci explique les corrélations significatives entre la majorité des performances obtenues aux tests qui expriment la puissance musculaire relative (détente verticale, détente horizontale, triple bonds et 5 sauts) et la DMO chez les femmes.

La CPJ de nos jeunes hommes était corrélée aux valeurs de DMO et de CMO. Cette corrélation est en accord avec les résultats de 18 enquêtes transversales qui ont retrouvé une corrélation significative positive entre l'apport en protéine et le CMO (Bonjour, 2009). En effet, sur le plan mécanistique, les apports en protéines augmentent les concentrations sériques d'IGF-1 qui vont augmenter la prolifération des ostéoblastes (Bonjour et coll. 2009 ; Bonjour et coll. 2007 ; Sodermann et coll. 2000 ; El Hage et coll. 2012). La CCJ était positivement corrélée aux valeurs de DMO et de CMO chez les jeunes hommes mais pas chez les jeunes femmes. Notons ici que les valeurs de consommation calcique journalière évaluées chez les jeunes femmes étaient inférieures à la normale.

En conclusion, cette étude montre que la masse maigre, la force maximale en demi-squat sont des variables positivement corrélées à la DMO chez les jeunes adultes. En effet, peu d'études se sont intéressées aux relations entre les paramètres osseux et les résultats lors de tests servant généralement à évaluer la forme physique de l'individu. L'utilisation de ces différents tests, facilement réalisables en pratique clinique et leur comparaison aux paramètres osseux vont

permettre d'utiliser ces nouveaux déterminants de la DMO et du CMO lors d'études sur de plus larges populations. Néanmoins, ces résultats restent à confirmer lors d'une étude longitudinale de plus grande ampleur car la nature transversale de l'étude ne permet pas d'évaluer les facteurs confondants (ayant un impact important sur la minéralisation) et constitue donc la principale limite méthodologique de notre travail. La faiblesse de notre effectif qui n'est pas représentatif de la population Libanaise pourrait également influencer le caractère significatif de certains résultats. Le niveau d'activité physique supérieur chez les hommes par rapport aux femmes peut aussi être considéré comme une limite à ce travail. Cependant, à notre connaissance, c'est l'une des rares études (dans cette catégorie de population adulte jeune) qui permet de compléter la liste des déterminants de la DMO surfacique.

Tableau 16 : Caractéristiques cliniques et paramètres osseux de la population étudiée

	Hommes (n = 61)	Femmes (n = 45)
Age (ans)	21,9 ± 3,6	22,4 ± 3
Poids (kg)	80,5 ± 14,9 ***	58,6 ± 10,3
Taille (cm)	1,74 ± 0,06 ***	1,59 ± 0,06
IMC (kg/m ²)	26,4 ± 4,4 ***	22,9 ± 3,6
Masse maigre (kg)	57,59 ± 9,13 ***	36,25 ± 5,19
Masse grasse (kg)	23,4 ± 7,5 ***	32,7 ± 8,5
CCJ (mg/j)	1123 ± 511 ***	673 ± 254
CPJ (g/j)	90 ± 40 ***	59 ± 28
AP (h/semaine)	8,4 ± 7,0 *	4,8 ± 5,1
DV (cm)	32,1 ± 6 ***	22,8 ± 5,7

Puissance (w)	3418 ± 780 ***	1963 ± 696
DH (m)	2,07 ± 0,34 ***	1,50 ± 0,33
Triple bond (m)	5,74 ± 0,84 ***	4,68 ± 0,83
5 sauts (m)	10,72 ± 1,38 ***	7,71 ± 1,53
Demi-squat (kg)	155,8 ± 42,7 ***	79,7 ± 22,4
CMO CE (g)	2904, ± 466 ***	2108 ± 325
SMO CE (cm ²)	2386 ± 343 ***	2004 ± 160
DMO CE (g/cm ²)	1,20 ± 0,12 ***	1,04 ± 0,10
DMO L2-L4 (g/cm ²)	1,19 ± 0,17 **	1,10 ± 0,14
DMO HE (g/cm ²)	1,11 ± 0,14 ***	0,94 ± 0,13
DMO CF (g/cm ²)	1,08 ± 0,16 ***	0,88 ± 0,14

IMC, indice de masse corporelle ; CCJ, consommation calcique journalière ; CPJ, consommation protéique journalière ; AP, activité physique ; DV, détente verticale ; DH, détente horizontale ; CMO, contenu minéral osseux ; SMO, surface minérale osseuse ; DMO, densité minérale osseuse ; CE, corps entier ; HE, hanche entière ; CF, col fémoral ; *** différences significatives entre hommes et femmes, P < 0,001 ; ** différences significatives entre hommes et femmes, P < 0,01 ; * différences significatives entre hommes et femmes, P < 0,05.

Tableau 17: Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux chez les femmes

	CMO CE (g)	SMO CE (cm ²)	DMO CE (g/cm ²)	DMO L2- L4 (g/cm ²)	DMO HE (g/cm ²)	DMO CF (g/cm ²)
Age (ans)	-0,05	-0,29	0,12	-0,02	-0,18	-0,19
Poids (kg)	0,51 **	0,32	0,54 **	0,25	0,44 **	0,36 *
Taille (cm)	0,74 ***	0,91 ***	0,45 *	0,38 **	0,39 **	0,41 **
IMC (kg/m ²)	0,22	-0,04	0,37	0,08	0,28	0,18
Masse grasse (kg)	-0,17	-0,32	-0,01	-0,22	-0,01	-0,05
Masse maigre (kg)	0,85 ***	0,73 ***	0,75 ***	0,70 ***	0,75 ***	0,74 ***
CCJ (mg/j)	0,12	0,36	-0,13	0,24	0,10	0,05
CPJ (g/j)	0,31	0,39	0,12	0,24	-0,00	-0,03
AP (h/semaine)	0,31	0,34	0,19	0,18	0,00	-0,08
DV (cm)	0,53 *	0,42 *	0,52 *	0,62 ***	0,44 **	0,42 *
Puissance (w)	0,55 *	0,35	0,61 **	0,47 **	0,52 **	0,47 **
DH (m)	0,49 *	0,43	0,46	0,68 ***	0,51 **	0,52 **
Triple bond (m)	0,42	0,36	0,39	0,62 ***	0,48 **	0,52 **
5 sauts (m)	0,46 *	0,38	0,43 *	0,59 ***	0,56 ***	0,57 ***
Demi-squat (Kg)	0,60 **	0,50 *	0,52 **	0,72 ***	0,57 ***	0,63 ***

IMC, indice de masse corporelle ; CCJ, consommation calcique journalière ; CPJ, consommation protéique journalière ; AP, activité physique ; DV, détente verticale ; DH, détente horizontale ; CMO, contenu minéral osseux ; SMO, surface minérale osseuse ; DMO, densité minérale osseuse ; CE, corps entier ; HE, hanche entière ; CF, col fémoral ; *** P < 0,001 ; ** P < 0,01 ; * P < 0,05.

Tableau 18: Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux chez les hommes

	CMO CE (g)	SMO CE (cm ²)	DMO CE (g/cm ²)	DMO L2 L4 (g/cm ²)	DMO HE (g/cm ²)	DMO CF (g/cm ²)
Age (ans)	0,04	-0,06	0,11	-0,04	0,11	-0,10
Poids (kg)	0,61 ***	0,14	0,57 ***	0,25	0,24	0,17
Taille	0,52 ***	0,47 ***	0,23	0,15	0,09	0,07
IMC (kg/m ²)	0,42**	-0,07	0,51 ***	0,20	0,23	0,16
Masse grasse (kg)	0,26	-0,19	0,21	0,08	0,12	0,12
Masse maigre (kg)	0,68 ***	0,31 *	0,59 ***	0,41 **	0,34 *	0,28 *
CCJ (mg/j)	0,49 ***	0,29 *	0,41 **	0,27	0,44 ***	0,27 *
CPJ (g/j)	0,44 **	0,31 *	0,35 *	0,31 *	0,30 *	0,30 *
AP (h/sem)	0,26	0,17	0,20	0,28 *	0,34 *	0,30 *
DV (cm)	0,13	0,25	0,00	0,26	0,14	0,05
Puissance (w)	0,58 ***	0,26	0,45 **	0,44 **	0,41 **	0,32 *
DH (m)	0,22	0,26	0,11	0,36 *	0,26	0,18
Triple bond (m)	0,02	0,19	-0,12	0,17	0,13	0,01
5 sauts (m)	0,02	0,26	-0,12	0,20	0,08	0,05
Demi-squat (Kg)	0,69 ***	0,47 **	0,73 ***	0,63 ***	0,59 ***	0,51 ***

IMC, indice de masse corporelle ; CCJ, consommation calcique journalière ; CPJ, consommation protéique journalière ; AP, activité physique ; DV, détente verticale ; DH, détente horizontale ; CMO, contenu minéral osseux ; SMO, surface minérale osseuse ; DMO, densité minérale osseuse ; CE, corps entier ; HE, hanche entière ; CF, col fémoral ; *** P < 0,001 ; ** P < 0,01 ; * P < 0,05.

Tableau 19 : Régressions linéaires multiples chez les femmes

Variable dépendante : CMO CE ($r^2 = 0,74$)			
	Coefficient	ES	Valeur de P
Constante	0,017	0,024	0,46
Demi-squat (kg)	3,13	1,64	0,07
Masse maigre (g)	0,045	0,007	< 0,001
Variable dépendante : SMO CE ($r^2 = 0,50$)			
Constante	0,001	0,015	< 0,001
Demi-squat (kg)	1,18	1,09	0,28
Masse maigre (g)	0,018	0,005	0,0014
Variable dépendante : DMO CE ($r^2 = 0,56$)			
Constante	0,491	0,099	< 0,001
Demi-squat (kg)	0,000	0,000	0,23
Masse maigre (g)	0,000	0,000	< 0,001
Variable dépendante : DMO L2-L4 ($r^2 = 0,64$)			
Constante	0,31	0,14	0,04
Demi-squat (kg)	0,003	0,001	0,005

Masse maigre (g)	0,000	0,000	0,0027
Variable dépendante : DMO HE ($r^2 = 0,61$)			
Constante	0,13	0,13	0,32
Demi-squat (kg)	0,001	0,000	0,19
Masse maigre (g)	0,000	0,000	< 0,001
Variable dépendante : DMO CF ($r^2 = 0,60$)			
Constante	0,074	0,14	0,61
Demi-squat (kg)	0,001	0,001	0,14
Masse maigre (g)	0,000	0,000	< 0,001

ES, erreur standard ; CMO, contenu minéral osseux ; SMO, surface minérale osseuse ; DMO, densité minérale osseuse ; CE, corps entier ; HE, hanche entière ; CF, col fémoral.

Tableau 20 : Régressions linéaires multiples chez les hommes

Variable dépendante : CMO CE ($r^2 = 0,52$)			
	Coefficient	ES	Valeur de P
Constante	0,001	0,039	0,011
Demi-squat (kg)	5,60	1,73	0,0033
Masse maigre (g)	0,019	0,007	0,022
Variable dépendante : SMO CE ($r^2 = 0,22$)			
Constante	0,001	0,019	< 0,001
Demi-squat (kg)	1,06	0,94	0,26
Masse maigre (g)	0,007	0,003	0,69
Variable dépendante : DMO CE ($r^2 = 0,50$)			
Constante	0,73	0,11	< 0,001
Demi-squat (kg)	0,001	0,000	0,0012
Masse maigre (g)	0,000	0,000	0,11
Variable dépendante : DMO L2-L4 ($r^2 = 0,30$)			
Constante	0,79	0,16	< 0,001
Demi-squat (kg)	0,002	0,000	< 0,001

Masse maigre (g)	0,000	0,000	0,97
Variable dépendante : DMO HE ($r^2 = 0,33$)			
Constante	0,84	0,12	< 0,001
Demi-squat (kg)	0,001	0,000	0,002
Masse maigre (g)	0,000	0,000	0,77
Variable dépendante : DMO CF ($r^2 = 0,43$)			
Constante	0,81	0,14	< 0,001
Demi-squat (kg)	0,002	0,000	< 0,001
Masse maigre (g)	0,000	0,000	0,6

ES, erreur standard ; CMO, contenu minéral osseux ; SMO, surface minérale osseuse ; DMO, densité minérale osseuse ; CE, corps entier ; HE, hanche entière ; CF, col fémoral.

1c. Étude observationnelle sur l'impact du type d'activité physique sur la densité minérale osseuse, la géométrie osseuse de la hanche et le TBS chez des hommes adultes

Introduction: Le but de cette étude était de comparer la densité minérale osseuse (DMO), la géométrie osseuse de la hanche et le trabecular bone score (TBS) chez trois groupes de jeunes hommes adultes (sportifs et sédentaires).

Méthodes: Deux groupes de jeunes hommes pratiquant des activités physiques à impacts élevés (APIE), rugby et football/basketball (foot-basket), et un groupe de jeunes hommes sédentaires (niveau d'activité physique < 150 minutes par semaine) ont participé à l'étude. La population étudiée était composée de 32 hommes sains (9 joueurs de rugby, 12 joueurs de football et de basketball et 11 sédentaires) âgés en moyenne de 21 ans (18 à 27 ans). Les participants étaient tous des étudiants de l'Université de Balamand. La masse grasse, la masse maigre, la DMO et le contenu minéral osseux (CMO) du corps entier (CE), le trabecular bone score (TBS) du rachis lombaire (L1-L4), la DMO du rachis lombaire (L1-L4), la DMO de la hanche entière (HT), la DMO du col fémoral (CF) et les indices géométriques du col fémoral comme la surface de la section transversale (CSA), le moment d'inertie de la surface transversale (CSMI), le module de section (Z) et le buckling ratio (BR) ont été mesurés par absorptiométrie biphotonique à rayons-X (DXA).

Résultats: Les valeurs de DMO, de TBS (L1-L4) et des paramètres géométriques du col fémoral (CSA, CSMI et Z) étaient significativement plus élevées chez les deux groupes de jeunes hommes sportifs (APIE) que chez les sédentaires ($p < 0,05$). Les valeurs de TBS observées dans les trois groupes étaient les suivantes: $1,42 \pm 0,10$ chez le groupe de rugby, $1,40 \pm 0,07$ chez le groupe foot-basket et $1,33 \pm 0,06$ chez le groupe sédentaire. De plus, des différences significatives ($p < 0,05$) ont été retrouvées entre le groupe de rugby et le groupe de foot-basket au niveau de la DMO et des paramètres de géométrie osseuse du col fémoral (CSA et Z).

Conclusion: Cette étude observe que les valeurs de DMO, de TBS (L1-L4) et des paramètres géométriques du col fémoral (CSA, CSMI et Z) sont significativement plus élevées chez les deux groupes de jeunes hommes sportifs (rugby et foot-basket) que chez les sédentaires.

1. Introduction

L'ostéoporose est une maladie osseuse fréquente caractérisée par une densité minérale osseuse faible et par une détérioration micro-architecturale du tissu osseux (Bonjour, 2009 ; Fulton, 1999). L'organisation mondiale de la santé (OMS) a établi des critères définissant l'ostéopénie et l'ostéoporose chez les adultes à partir de leur T score. La perte osseuse du vieillissement, à la fois matricielle et minérale, aboutit à l'ostéoporose lorsqu'elle franchit un certain seuil inférieur à - 2,5 en T score en terme densitométrique (Bonjour, 2009 ; Fulton, 1999). Le pic de masse osseuse est atteint vers l'âge de 25 ans chez les hommes et les femmes (Bonjour, 2009). L'augmentation de la valeur atteinte par ce pic représente une importance capitale dans le domaine de la prévention de l'ostéoporose. En effet, il a été rapporté qu'une augmentation de 10 pour cent de ce pic peut retarder l'apparition de l'ostéoporose d'à peu près 13 ans (Bonjour, 2009). Il est connu actuellement que l'activité physique joue un rôle essentiel sur l'influence des propriétés mécaniques de l'os. Son rôle dépend du type engendré (Bonjour, 2009). La pratique régulière d'une activité physique caractérisée par des contraintes mécaniques importantes (compression, traction, flexion et torsion) stimule la formation osseuse et améliore la DMO au niveau des sites sollicités (Bonjour, 2009).

De nombreuses caractéristiques comme la durée, l'intensité de l'exercice physique et le type de contrainte mécanique engendré permettent de stimuler la formation osseuse et augmenter son pic. Un grand nombre d'études a pu démontrer cette différence significative au niveau de la DMO entre des sujets pratiquant des APIE et ceux pratiquant des activités physiques à impacts faibles ou sans impacts (Bonjour, 2009 ; Fulton, 1999). Cependant, peu d'études se sont intéressées à explorer l'influence du type d'activité physique sur les paramètres micro-architecturaux de l'os et sur les paramètres de géométrie osseuse. Le but de notre étude était d'explorer l'effet du type d'activité physique sur la densitéminérale osseuse, la géométrie osseuse de la hanche et le trabecular bone score (reflet de la microarchitecture osseuse trabéculaire) chez des jeunes hommes adultes.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Sujets

Trente-deux jeunes hommes Libanais (18 à 27 ans) sains et exempts de blessure ont volontairement participé à cette étude. Les participants étaient tous étudiants de l'Université de

Balamand. 21 joueurs confirmés de sports collectifs (rugby, basket et football) et 9 sujets sédentaires (niveau d'activité physique < 150 minutes par semaine) ont participé à l'étude. L'échantillon a été composé d'individus venant de 3 groupes : groupe rugby (n = 9), groupe foot-basket (n = 12) et groupe sédentaire (n = 11). Les sujets ne recevaient aucun traitement médicamenteux ou vitaminique susceptible de modifier leur statut osseux, n'avaient pas d'antécédent de maladie métabolique ou osseuse et n'avaient pas subi d'immobilisation prolongée. Le consentement éclairé a été obtenu des participants. Ce protocole a reçu l'approbation du comité d'éthique de l'Université de Balamand.

2.2. Mesures des caractéristiques anthropométriques et des paramètres osseux

Le poids et la taille ont été mesurés à l'aide d'une balance électronique (Taurus, précision = 0,1 kg) et d'une toise (Seca, précision = 0,1 cm). L'indice de masse corporelle (IMC) a été calculé comme le poids corporel divisé par la taille au carré (kg/m^2). Des mesures d'absorptiométrie biphotonique à rayons-X (GE-Lunar iDXA) ont été réalisées au niveau du corps entier (CE), du rachis lombaire (L1-L4), de la hanche entière (HE) et du col fémoral (CF). La masse maigre et la masse grasse ont aussi été déterminées par DXA. Les paramètres géométriques du col fémoral comme la surface de section transversale (CSA), le moment d'inertie de la surface transversale (CSMI), le module de section (Z) et le buckling ratio (BR) ont été mesurés par DXA. Toutes ces mesures ont été réalisées par le même technicien et sur la même machine dans le même centre hospitalier. Le technicien était en aveugle dans la mesure où il ne savait pas de quel groupe venaient les participants. Dans ce centre, le coefficient de variation pour les mesures de DMO était inférieur à 1 % (El Hage et coll. 2014).

2.3. Activité physique

Le volume hebdomadaire (heures/semaines) de pratique sportive a été évalué par un questionnaire validé (Deheeger et coll, 1997).

2.4. Statistiques

Les analyses statistiques ont été effectuées par le logiciel R©. Les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux sont exprimés en moyenne $\pm$ la déviation standard. Les différences entre les groupes ont été précisées par une analyse de variance à une voie (One-way-Anova). Les

corrélations ont été précisées par le test de Pearson. Les valeurs de DMO, des indices géométriques et de TBS ont été comparées après ajustement pour l'IMC, le poids et la masse maigre en utilisant des analyses de covariance (ANCOVA). Une valeur de $p < 0,05$ était exigée afin d'affirmer le caractère significatif des résultats.

3. Résultats

3.1. Différences au niveau des caractéristiques anthropométriques entre les trois groupes (rugby, foot-basket et sédentaires).

Toutes les variables cliniques étudiées (âge, poids, taille, IMC, masse maigre, masse grasse et activité physique) suivaient des distributions normales. Les joueurs de rugby avaient un poids, un IMC et une masse maigre significativement supérieurs par rapport aux joueurs de foot-basket. La masse maigre était supérieure chez les joueurs de rugby par rapport aux sédentaires. Les joueurs de foot-basket avaient un IMC significativement inférieur par rapport aux sédentaires (Tableau 21).

3.2. Différences entre les valeurs de la densité minérale osseuse et les indices géométriques entre les 3 groupes (rugby, foot-basket et sédentaire).

Toutes les variables osseuses étudiées (TBS, CMO CE, DMO CE, DMO L1-L4, DMO HE, DMO CF, CSA, CSMI, Z et BR) suivaient des distributions normales. Les valeurs de DMO (au niveau du corps entier, du rachis lombaire, de la hanche entière et du col fémoral) et les indices géométriques du col fémoral (CSA, CSMI et Z) étaient significativement supérieurs chez les joueurs de rugby par rapport aux joueurs de footbasketet aux sédentaires (Tableau 22 et Figures 32-36). Les valeurs de DMO HE (g/cm^2) observées dans les trois groupes étaient les suivantes : $1,29 \pm 0,13$ chez le groupe de rugby, $1,17 \pm 0,08$ chez le groupe de foot-basket et $1,02 \pm 0,10$ chez le groupe sédentaire. Les valeurs de Z (mm^3) observées dans les trois groupes étaient les suivantes : 1237 ± 224 chez le groupe de rugby, 947 ± 166 chez le groupe de foot-basket et 825 ± 135 chez le groupe sédentaire. Les joueurs de foot-basket avaient des valeurs de DMO (au niveau du corps entier, du rachis lombaire, de la hanche entière et du col fémoral) et des indices géométriques (CSA, CSMI et Z) significativement supérieurs par rapport aux sédentaires.

Le trabecular bone score au niveau du rachis lombaire (L1-L4) était significativement supérieur chez le groupe de rugby ($1,42 \pm 0,10$) et le groupe de foot-basket ($1,40 \pm 0,07$) par rapport au groupe sédentaire ($1,33 \pm 0,06$) (Tableau 22 et Figures 32-36).

3.3 Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux dans la population entière

Le poids, la masse maigre, la taille et le volume hebdomadaire d'activité physique étaient positivement corrélés à la DMO du CE, à la DMO de la HE, à la CSA du CF et au Z du col fémoral ($P < 0,05$).

3.4 Différences entre les 3 groupes après ajustement pour le poids, la masse maigre et l'IMC.

Après ajustement pour le poids corporel en utilisant une ANCOVA : Les valeurs de DMO (au niveau du corps entier, du rachis lombaire, de la hanche entière et du col fémoral), d'indices géométriques du col fémoral (CSA, CSMI et Z) et du TBS étaient supérieures chez le groupe rugby par rapport au groupe sédentaire ; Les valeurs de DMO (au niveau du corps entier, du rachis lombaire, de la hanche entière et du col fémoral) et d'indices géométriques du col fémoral (CSA et Z) étaient supérieures chez le groupe foot-basket par rapport au groupe sédentaire ;

- La DMO au niveau du corps entier était supérieure chez le groupe rugby par rapport au groupe foot-basket.

Après ajustement pour la masse maigre en utilisant une ANCOVA :

- Les valeurs de DMO (au niveau du corps entier, du rachis lombaire, de la hanche et du col fémoral), d'indices géométriques du col fémoral (CSA, CSMI et Z) et du TBS étaient supérieures chez le groupe rugby par rapport au groupe sédentaire ;

- Les valeurs de DMO (au niveau du rachis lombaire, de la hanche entière et du col fémoral) et d'indices géométriques du col fémoral (CSA et Z) étaient supérieures chez le groupe foot-basket par rapport au groupe sédentaire ;

- La DMO au niveau du corps entier était supérieure chez le groupe rugby par rapport au groupe foot-basket.

Après ajustement pour l'IMC en utilisant une ANCOVA :

- Les valeurs de DMO (au niveau du rachis lombaire, de la hanche entière et du col fémoral), d'indices géométriques du col fémoral (CSA, CSMI et Z) et du TBS étaient supérieures chez le groupe rugby par rapport au groupe sédentaire ;
- Les valeurs de DMO (au niveau du corps entier, du rachis lombaire, de la hanche entière et du col fémoral) et d'indices géométriques du col fémoral (CSA et Z) étaient supérieures chez le groupe foot-basket par rapport au groupe sédentaire ; La DMO (au niveau du corps entier) et les indices géométriques du col fémoral (CSMI et Z) étaient supérieurs chez le groupe rugby par rapport au groupe footbasket.

4. Discussion

Cette étude menée chez 32 jeunes adultes libanais suggère que les contraintes mécaniques exercent un rôle positif sur la DMO, la géométrie osseuse de la hanche et le TBS qui reflète en général la microarchitecture osseuse au niveau du rachis lombaire.

L'effet de l'activité physique sur la DMO est largement connu.

Notons que les activités physiques à impacts biomécaniques élevés sont plus ostéogéniques que celles sans impacts ou ayant des impacts faibles (El Hage et coll. 2014 ; Schipilow et coll. 2013 ; Ducher et coll. 2006). L'effet de l'activité physique sur le TBS reste peu élucidé. Les valeurs de DMO (au niveau du rachis lombaire et de la hanche) et des indices géométriques (CSA et Z) du col fémoral mesurés chez les sportifs pratiquant des APIE étaient significativement supérieures par rapport aux sédentaires même après ajustement pour le poids, l'IMC ou pour la masse maigre. Nous avons décidé d'ajuster pour ces variables car elles sont considérées comme des déterminants positifs de la DMO, de la géométrie osseuse et du TBS. Les résultats obtenus dans notre étude sont en accord avec ceux de nombreuses études qui ont montré que la pratique régulière d'une APIE est très ostéogénique au niveau des sites sollicités. Le trabecular bone score du rachis lombaires était significativement supérieur chez les sportifs pratiquant des APIE par rapport aux sédentaires. Nos résultats confirment ceux de Schipilow et coll. (2013) qui ont trouvé que la qualité osseuse au niveau du tibia et du radius est meilleure chez les athlètes pratiquant des APIE en comparaison avec des athlètes pratiquant des activités physiques à impacts faibles ou sans impacts (Schipilow et coll. 2013).

Après ajustement pour le poids, pour la masse maigre ou l'IMC, le TBS restait significativement supérieur chez les joueurs de rugby par rapport aux sédentaires.

A notre connaissance, c'est la première étude qui observe un tel résultat.

Cependant, après ajustement pour le poids, la masse maigre ou l'IMC, il n'y avait pas de différences significatives au niveau du TBS entre les joueurs de foot-basket et les sédentaires ou entre les joueurs de rugby et les joueurs de foot-basket. Des différences significatives ont été retrouvées entre les deux groupes sportifs (rugby et foot-basket) au niveau de la DMO (au niveau du corps entier, du rachis lombaire, de la hanche entière et du col fémoral) et des indices géométriques (CSA et Z) du col fémoral. Ces différences ont disparu après ajustement pour le poids ou la masse maigre à l'exception de la DMO du corps entier qui restait supérieure chez les joueurs de rugby par rapport aux joueurs de foot-basket. En outre, Nevill et coll. (2014) ont trouvé dans leur étude que la DMO mesurée chez les joueurs de rugby était plus élevée par rapport aux sportifs pratiquant d'autres activités physiques et aux sujets témoins. Notre étude présente plusieurs limites. En premier lieu, la nature observationnelle de l'étude est une limite car elle ne permet pas d'affirmer une relation de causalité entre le type d'activité physique et les paramètres osseux étudiés. En deuxième lieu, le faible nombre des sujets pourrait influencer le caractère significatif de certains résultats. En troisième lieu, les études observationnelles ne se font pas en « double aveugle ». En quatrième lieu, nous avons décidé d'ajuster sur des critères particuliers dans les analyses de covariance utilisées. En cinquième lieu, la mesure de la seule DMO ne renseigne qu'imparfaitement sur la solidité des os (Ducher et coll. 2006 ; Briot et coll. 2013). En sixième lieu, pour des raisons évidentes de résolution spatiale et de lois d'absorption du rayonnement X, le TBS est corrélé à la microarchitecture osseuse, mais ne peut la mesurer directement pour plusieurs raisons techniques qui ont été abordées de manière détaillée dans deux publications précédentes (Bousson et coll. 2011 ; Briot et coll. 2013). Finalement, la comparaison entre deux types d'activités physiques à impacts élevés constitue aussi une limite méthodologique d'où l'importance de la diversité de comparaison entre plusieurs types d'APIE et qui aura lieu dans notre prochaine étude. Notre étude est l'une des rares études qui a permis d'observer des différences significatives au niveau de la géométrie osseuse et du TBS entre joueurs de rugby, joueurs de foot-basket et sédentaires.

5. Conclusion

Dans cette étude, nous observons que les valeurs de DMO, de TBS (L1-L4) et des paramètres géométriques du col fémoral (CSA, CSMI et Z) sont significativement plus élevées chez les deux

groupes de jeunes hommes sportifs (rugby et foot-basket) que chez les sédentaires. La pratique des sports collectifs à impacts biomécaniques élevés comme le football, le basketball et le rugby qui impliquent un nombre important de sauts, d'atterrissages, de changements de direction, de démarrages et d'arrêts, pourrait influencer positivement la masse osseuse, la géométrie osseuse et la microarchitecture osseuse. En particulier, le sport de rugby semble avoir des actions (contact, conflit, soulevé de terre, taclé) susceptibles d'exercer des effets positifs sur la masse osseuse et la qualité osseuse du rachis lombaire. Notre étude est l'une des rares études qui a permis d'observer des valeurs élevées de TBS chez des joueurs du rugby. Des études contrôlées randomisées couplées à d'autres études ayant des méthodologies plus fortes seraient nécessaires pour affirmer nos observations.

Tableau 21: Caractéristiques cliniques de la population étudiée

	Groupe rugby (n = 9)	Groupe foot-basket (n = 12)	Groupe sédentaire (n = 11)
Age (ans)	21,5 ± 1,2	21,4 ± 3,1	22,1 ± 2,7
Poids (kg)	89,8 ± 10,7 ^{aa}	70,6 ± 12,3	80,7 ± 13
Taille (m)	1,70 ± 0,07	1,73 ± 0,1	1,73 ± 0,06
IMC (kg/m ²)	28,5 ± 2,3 ^{aa}	23,5 ± 3,7	26,8 ± 3,3 ^b
Masse grasse (kg)	24,6 ± 3,9	21,8 ± 5,9	27,3 ± 6,7
Masse maigre (kg)	64,3 ± 6,9 ^{aa}	51,8 ± 9,3	55,0 ± 6,0 ^{bb}
AP (h/semaine)	11,4 ± 4,7	11,2 ± 8,3 ^{ccc}	1,6 ± 0,8 ^{bbb}

Les valeurs sont exprimées en moyenne ± déviation-standard ; IMC, indice de masse corporelle ; AP, activité physique ; ^{aa}, différences significatives entre le groupe de rugby et le groupe de

foot-basket $P < 0,01$; ^{bbb}, différences significatives entre le groupe de rugby et le groupe sédentaire $P < 0,001$; ^{bb}, différences significatives entre le groupe de rugby et le groupe sédentaire $P < 0,01$; ^b, différences significatives entre le groupe de rugby et le groupe sédentaire $P < 0,05$; ^{ccc}, différences significatives entre le groupe de foot-basket et le groupe sédentaire $P < 0,001$.

Tableau 22 : Paramètres osseux de la population étudiée

	Groupe Rugby (n = 9)	Groupe foot-basket (n = 12)	Groupe sédentaire (n = 11)
TBS L1-L4	$1,42 \pm 0,10$	$1,40 \pm 0,07^c$	$1,33 \pm 0,06^b$
CMO CE (g)	3592 ± 416^{aa}	2907 ± 393	2779 ± 251^{bbb}
DMO CE (g/cm ²)	$1,38 \pm 0,11^{aaa}$	$1,18 \pm 0,07^c$	$1,13 \pm 0,07^{bbb}$
DMO L1-L4 (g/cm ²)	$1,41 \pm 0,17^{aa}$	$1,22 \pm 0,07^c$	$1,11 \pm 0,13^{bbb}$
DMO HE (g/cm ²)	$1,29 \pm 0,13^a$	$1,17 \pm 0,08^{cc}$	$1,02 \pm 0,10^{bbb}$
DMO CF (g/cm ²)	$1,30 \pm 0,15^a$	$1,17 \pm 0,10^{cc}$	$1,02 \pm 0,1^{bbb}$
CSA (mm ²)	236 ± 30^{aa}	197 ± 23^{cc}	171 ± 18^{bbb}
CSMI (mm ²) ²	23232 ± 5149^{aa}	16608 ± 4207^c	15136 ± 3235^{bbb}

Z (mm ³)	1237 ± 224 ^{aa}	947 ± 166 ^c	825 ± 135 ^{bbb}
BR	4,26 ± 1,98	4,67 ± 1,37 ^{cc}	7,13 ± 2,22 ^{bb}

Les valeurs sont exprimées en moyenne ± déviation-standard ; TBS, trabecular bone score ; CMO, contenu minéral osseux ; DMO, densité minérale osseuse; CE, corps entier ; HE, hanche entière ; CF, col fémoral ; CSA, surface de la section transversale ; CSMI, moment d'inertie de la surface transversale ; Z, module de section ; BR, Buckling Ratio ; ^{aaa}, différences significatives entre le groupe de rugby et le groupe de foot-basket P < 0,001 ; ^{aa}, différences significatives entre le groupe de rugby et le groupe de foot-basket P < 0,01 ; ^a, différences significatives entre le groupe de rugby et le groupe de foot-basket P < 0,05 ; ^{bbb}, différences significatives entre le groupe de rugby et le groupe sédentaire P < 0,001 ; ^{bb}, différences significatives entre le groupe de rugby et le groupe sédentaire P < 0,01 ; ^b, différences significatives entre le groupe de rugby et le groupe sédentaire P < 0,05 ; ^{cc}, différences significatives entre le groupe de foot-basket et le groupe sédentaire P < 0,01 ; ^c, différences significatives entre le groupe de foot-basket et le groupe sédentaire P < 0,05.

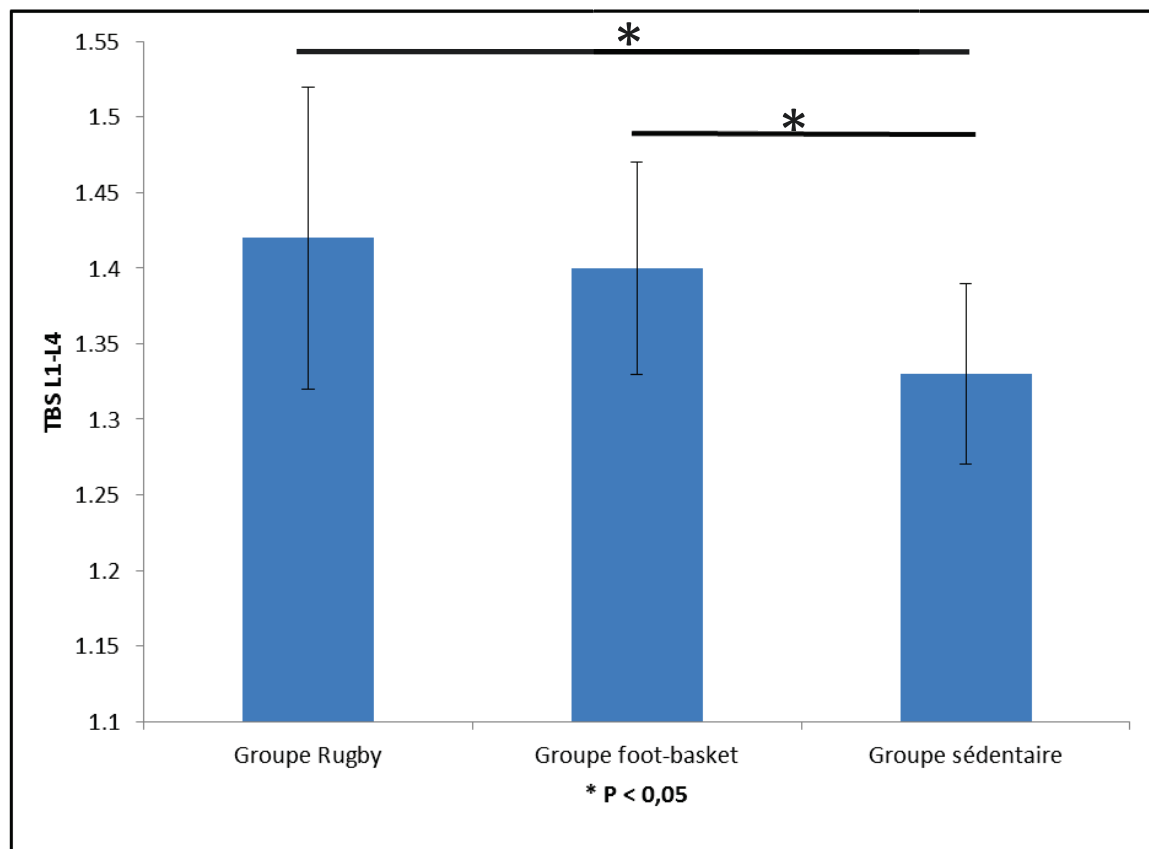


Figure 32 : Trabecular Bone Score dans les trois groupes (Moyennes $\pm$ déviations standards)

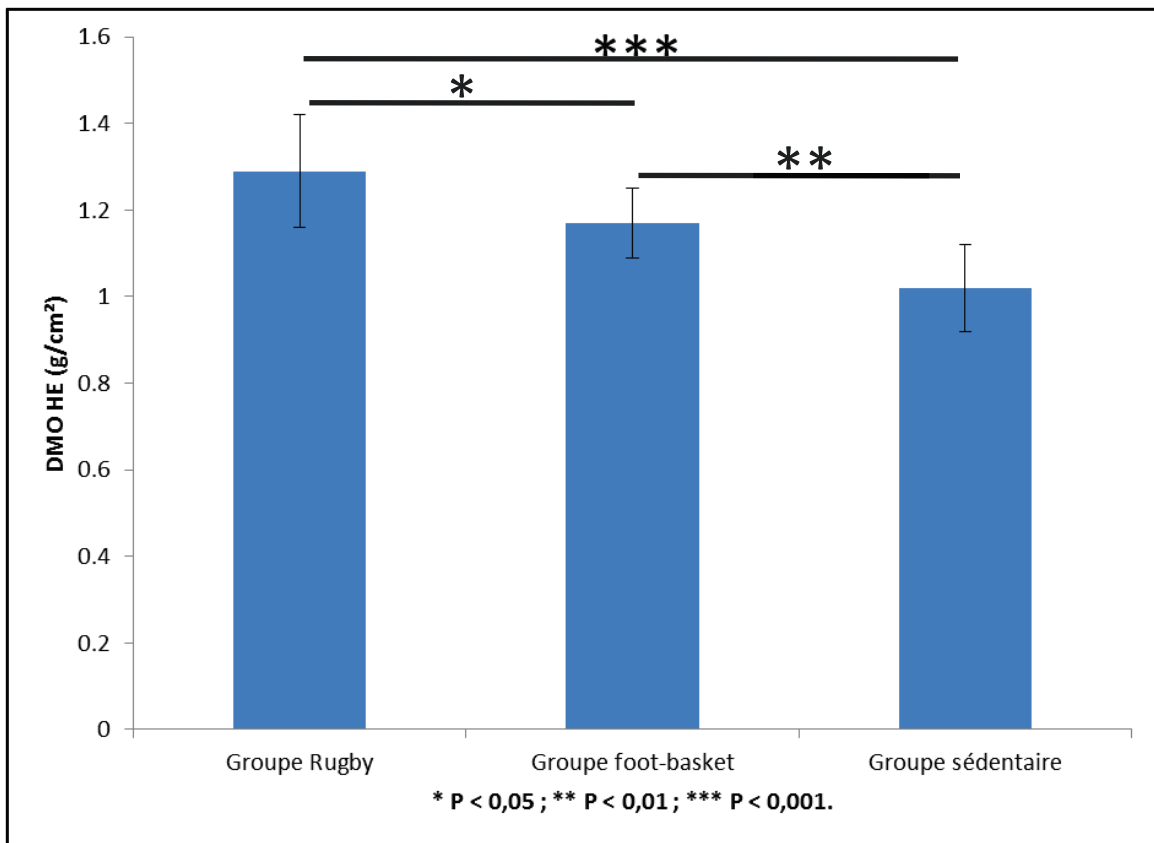


Figure 33 : Densité minérale osseuse de la hanche entière dans les trois groupes (Moyennes $\pm$ déviations standards)

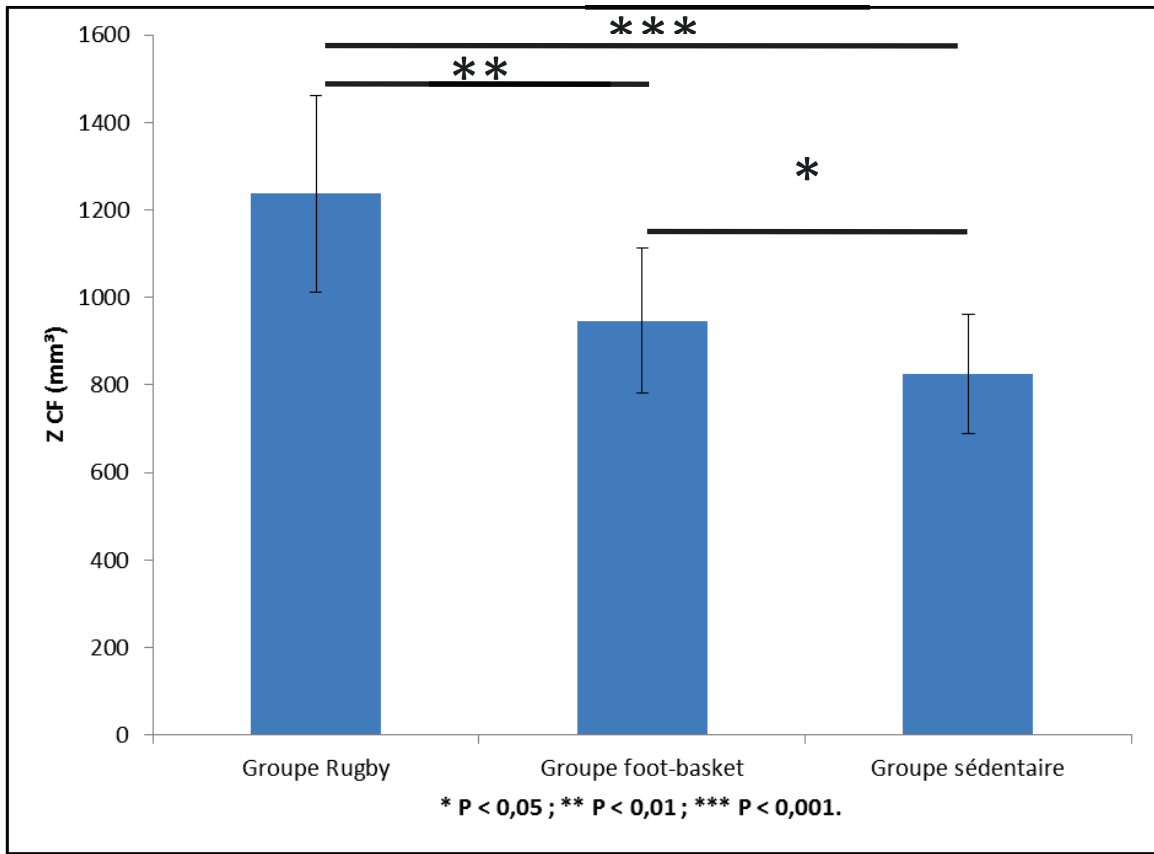


Figure 34 : Module de section du col fémoral dans les trois groupes (Moyennes $\pm$ déviations standards)

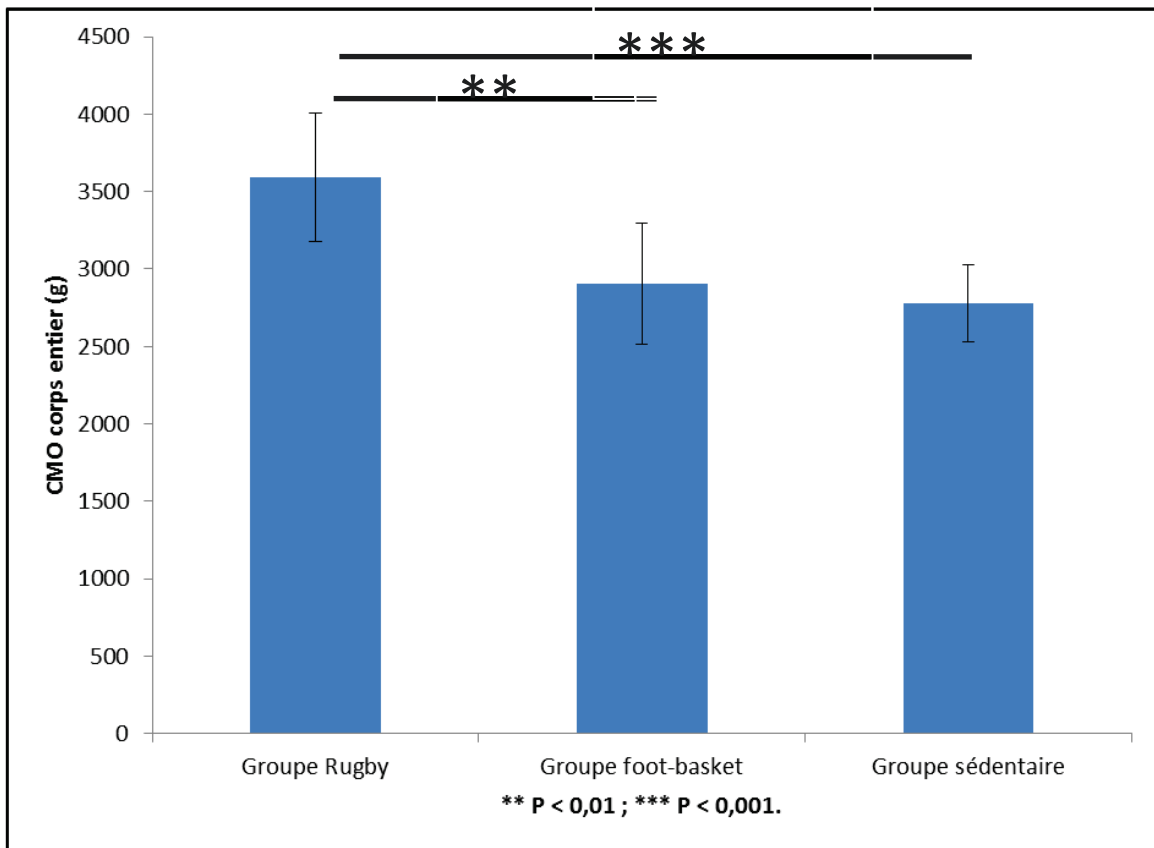


Figure 35 : Contenu minéral osseux du corps entier dans les trois groupes (Moyennes $\pm$ déviations standards)

Discussion

Ces trois études préliminaires ont permis de mettre plusieurs points en évidence. Premièrement, concernant les caractéristiques anthropométriques, le poids et la masse maigre étaient positivement corrélés aux valeurs de CMO et de DMO chez les adultes Libanais. Ainsi, ces deux variables semblent être des déterminants positifs de la DMO chez les jeunes adultes. D'autre part, le poids, l'IMC, la masse grasse, le tour de taille et le tour de hanche étaient positivement corrélés à la BUA mesurée au niveau du calcanéum chez les jeunes femmes mais pas chez les jeunes hommes. Par conséquent, l'association entre l'adiposité et les paramètres osseux semblent être influencée par le genre; cette relation semble être plus forte chez les femmes que chez les hommes. De plus, la relation entre l'adiposité et les paramètres osseux semble être influencée par le niveau d'activité physique; cette relation semble être plus forte chez les sujets ayant un niveau faible d'activité physique. Enfin, la relation entre l'adiposité et les paramètres osseux semble être influencée par le statut pondéral de la population étudiée; la relation entre la masse grasse et la DMO n'est pas linéaire et peut à partir d'un certain seuil d'IMC (à définir) se stabiliser ou même diminuer.

Deuxièmement, concernant les relations entre les paramètres de performance physique et les paramètres osseux, il apparaît que la force maximale en demi-squat et la puissance maximale absolue (watts) des membres inférieurs calculée à partir du test de Sargent sont des déterminants positifs de la DMO dans les deux sexes. Nos travaux ont donc défini de nouveaux déterminants de la DMO. Ainsi l'optimisation de la force maximale pourrait avoir des bénéfices sur le plan de la prévention de l'ostéoporose. D'autre part, le volume hebdomadaire d'activité physique était positivement corrélé à la DMO dans les études 1b et 1c mais pas à la BUA dans l'étude 1a. Cette corrélation n'est pas toujours retrouvée car elle est influencée par le niveau et le type de pratique physique de la population étudiée.

Enfin, concernant l'influence du type d'activité physique sur les paramètres osseux, la pratique des sports à impacts a des effets positifs sur les paramètres osseux. Plus particulièrement, la pratique du rugby est associée à une augmentation des valeurs de TBS. L'étude 1c est l'une des rares études à démontrer l'influence du type de pratique physique sur le TBS. Ces différentes études ont des applications pratiques dans le domaine de la prévention de l'ostéoporose.

Etudes antérieures sur l'influence du statut pondéral sur les paramètres osseux chez de jeunes adultes Libanais

2a. Le Trabecular Bone Score chez des jeunes femmes en surcharge pondérale et normo-pondérées

Introduction: Le but de cette étude était de comparer le trabecular bone score (TBS) chez des femmes adultes en surcharge pondérale et des femmes adultes normo-pondérées.

Matériel et méthodes: 14 femmes en surcharge pondérale ($IMC > 25 \text{ kg/m}^2$) et 42 femmes normo-pondérées ($IMC < 25 \text{ kg/m}^2$) âgées entre 18 et 32 ans ont participé à cette étude. La composition corporelle, le contenu minéral osseux (CMO), la densité minérale osseuse (DMO) et le TBS ont été mesurés par DXA. Les mesures DXA ont été réalisées au niveau du corps entier (CE), du rachis lombaire (L1-L4), de la hanche entière (HE) et du col fémoral (CF). L'activité physique, la consommation calcique journalière, la consommation protéique journalière et la qualité du sommeil étaient évaluées par des questionnaires validés. La consommation maximale d'oxygène $VO_2 \text{ max}$ (L/min) était directement mesurée par un système de mesure spécifique lors d'un effort maximal sur bicyclette ergométrique.

Résultats: Le poids, la taille, l'IMC, la masse maigre, la masse grasse, le CMO CE, la DMO CE, la DMO HE et la DMO CF étaient significativement plus élevées chez les femmes en surcharge pondérale par rapport aux femmes normo-pondérées. Le TBS n'était pas significativement différent entre les deux groupes (en surcharge pondérale et normo-pondéré). Dans la population entière ($n = 56$), le poids, la taille, l'IMC, la masse maigre et la masse grasse étaient positivement corrélés aux valeurs de CMO et de DMO mais pas aux valeurs de TBS. La $VO_2 \text{ max}$ (L/min) était positivement corrélée aux valeurs de CMO, de DMO et de TBS ($p < 0,05$).

Conclusion: Cette étude suggère que le fait d'être en surcharge pondérale n'est pas associé à des valeurs de TBS plus élevées chez les jeunes femmes.

1. Titre de l'étude

Le Trabecular Bone Score chez des jeunes femmes en surcharge pondérale et de poids normal.

2. Objectif

L'objectif de cette étude est de comparer les valeurs de trabecular bone score (TBS) chez des jeunes femmes en surcharge pondérale et normo-pondérées.

3. Matériel et méthodes

3.1. Sujets et design de l'étude

56 jeunes femmes (âgées de 18 à 30 ans) réglées et de nationalité Libanaise ont participé à cette étude. Les femmes ont été recrutées dans deux Universités privées situées dans la région Nord du Liban. Les femmes étaient tous non-fumeuses et n'avaient reçu aucun traitement hormonal ni vitaminique susceptible de modifier leur statut osseux. Elles n'avaient pas non plus d'antécédent de maladie métabolique ou osseuse et n'avaient jamais subi d'immobilisation prolongée. Les sujets ont été répartis en deux groupes : groupe en surcharge pondérale ($IMC > 25 \text{ kg/m}^2$; $n = 14$) et groupe normo-pondéré ($IMC < 25 \text{ kg/m}^2$; $n = 42$) en fonction de l'indice de masse corporelle. Le consentement éclairé des participantes a été obtenu. Ce protocole a reçu l'approbation du comité d'éthique de l'Université de Balamand.

3.2. Mesures anthropométriques

Le poids et la taille ont été mesurés, et l'indice de masse corporelle (IMC) a été calculé. La composition corporelle a été évaluée par DXA (GE-Lunar, iDXA).

3.3. Mesures osseuses

Le contenu minéral osseux (CMO), la densité minérale osseuse (DMO) et le TBS (Trabecular Bone Score) au niveau du rachis lombaire (L1-L4) ont été mesurés par DXA (GE-Lunar, iDXA).

La DMO a été mesurée au niveau du corps entier (CE), du rachis lombaire (L1-L4), de la hanche entière (HE) et du col fémoral (CF). Les coefficients de variation des mesures de composition corporelle (masse maigre et masse grasse) et de DMO sont inférieurs à 1 % dans notre centre.

3.4. Mesure de la consommation maximale d'oxygène

Nous avons mesuré directement la consommation maximale d'oxygène (VO_2 max en L/min) en utilisant un système spécialisé (Cosmed Fitmate, version 2.20) lors d'un test triangulaire sur bicyclette ergométrique (Siemens-Elema RE 820; RodbyElektronik AB, Enhorna, Sweden).

3.5. Questionnaires

Le volume hebdomadaire d'activité physique, la consommation calcique journalière (CCJ), la consommation protéique journalière et l'indice de qualité de sommeil de Pittsburgh (PSQI) ont été évalués par des questionnaires validés.

3.6. Analyse statistique

Les données sont exprimées en moyenne $\pm$ la déviation standard (DS). La significativité et l'existence d'éventuelles corrélations ont été précisées par une analyse en régression linéaire simple (mesure du coefficient de corrélation de Pearson). Les différences entre les deux groupes (en surcharge pondérale et normo-pondéré) ont été précisées par le test-t de Student. Une analyse de covariance (ANCOVA) a été utilisée afin de comparer les paramètres osseux entre les deux groupes après ajustement pour l'IMC. Les analyses statistiques ont été effectuées par le logiciel Number Cruncher Statistical System (NCSS, 2001). Une valeur de $p < 0,05$ était exigée afin d'affirmer le caractère significatif des résultats.

4. Résultats

4.1. Caractéristiques de la population étudiée

L'âge, la taille, la consommation calcique journalière, la consommation protéique journalière, le volume hebdomadaire d'activité physique, la VO_2 max (L/min) et le PSQI n'étaient pas significativement différents entre les deux groupes (en surcharge pondérale et normo-pondéré). Le TBS n'était pas significativement différent entre les deux groupes (Tableau 24). Le poids, l'IMC, la masse maigre, la masse grasse, le CMO CE, la DMO CE, la DMO HE et la DMO CF étaient significativement supérieurs chez le groupe SUR par rapport au groupe NOR.

Tableau 23 : Caractéristiques de la population étudiée

	Groupe SUR (n = 14)	Groupe NOR (n = 42)
Age (ans)	23,6 ± 4,9	22,0 ± 2,4
Poids corporel (kg)	78,2 ± 15,8 ***	54,1 ± 5,7
Taille (cm)	158,9 ± 7,1	159,7 ± 5,9
IMC (kg/m ²)	30,8 ± 4,8 ***	21,3 ± 2,1
Masse maigre (kg)	41,512 ± 6,228 ***	34,958 ± 3,855
Masse grasse (kg)	34,525 ± 10,331 ***	17,165 ± 3,842
Masse grasse (%)	44,1 ± 5,0 ***	31,5 ± 4,9
CCJ (mg/j)	520 ± 173	651 ± 174
CPJ (g/j)	62,6 ± 19,2	52,8 ± 19,1
Activité physique (h/semaine)	3,7 ± 4,3	3,0 ± 3,0
VO_2 max (L/min)	1,91 ± 0,38	1,75 ± 0,42
VO_2 max (ml/mn/kg)	24,38 ± 1,96 **	31,7 ± 6,2
PSQI	4,2 ± 2,1	4,7 ± 2,5
CMO CE (g/cm ²)	2277 ± 360 *	2097 ± 282
DMO CE (g/cm ²)	1,11 ± 0,11 *	1,04 ± 0,09
DMO L1-L4 (g/cm ²)	1,16 ± 0,16	1,12 ± 0,14

TBS L1-L4	1,38 ± 0,12	1,43 ± 0,08
DMO HE (g/cm ²)	1,04 ± 0,15 *	0,955 ± 0,119
DMO CF (g/cm ²)	1,02 ± 0,18 *	0,935 ± 0,129

SUR : Groupe en surcharge pondérale ; NOR : Groupe normo-pondéré ; IMC : Indice de Masse Corporelle ; CCJ : Consommation Calcique Journalière ; CPJ : Consommation Protéique Journalière ; VO₂ max : Consommation maximale d'oxygène ; PSQI : Indice de qualité de sommeil de Pittsburgh ; CMO : Contenu Minéral Osseux ; CE : Corps Entier ; DMO : Densité Minérale Osseuse ; TBS : Trabecular Bone Score ou Score Trabéculaire Osseux ; HE : Hanche Entière ; CF : Col Fémoral ; * p < 0,05 ; *** p < 0,001.

4.2. Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux

Dans la population entière (n = 56), le poids, la taille, l'IMC, la masse maigre et la masse grasse étaient positivement corrélés aux valeurs de CMO et de DMO mais pas aux valeurs de TBS. La VO₂ max (L/min) était positivement corrélée aux valeurs de CMO, de DMO et de TBS (p < 0,05). La VO₂ max (ml/min/kg) était positivement corrélé au TBS (r = 0,42 ; p < 0,05). Le pourcentage de masse grasse n'était pas corrélé aux paramètres osseux.

4.3. Corrélation entre le TBS et la DMO

Le TBS était positivement corrélée au CMO CE (r = 0,47 ; p < 0,001), à la DMO CE (r = 0,45 ; p < 0,001), à la DMO L1-L4 (r = 0,59 ; p < 0,001), à la DMO HE (r = 0,51 ; p < 0,001) et à la DMO CF (r = 0,52 ; p < 0,001).

Tableau 24: Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux

	CMO CE	DMO CE	DMO L1-L4	DMO HE	DMO CF	TBS
Age (ans)	0,21	0,27*	0,35 ***	0,12	0,14	0,03
Poids (kg)	0,60 ***	0,64 ***	0,43 ***	0,59 ***	0,59 ***	0,08
Taille (cm)	0,65 ***	0,41 **	0,42 **	0,33*	0,43 ***	0,24
IMC (kg/m ²)	0,40 ***	0,51 ***	0,28 *	0,49 ***	0,46 ***	- 0,01
Masse maigre (kg)	0,77 ***	0,71 ***	0,58 ***	0,66 ***	0,67 ***	0,15
Masse grasse (kg)	0,41	0,49 ***	0,26 *	0,46 ***	0,45 ***	- 0,08

CCJ (mg/j)	0,12	- 0,13	0,13	- 0,06	- 0,01	- 0,12
CPJ (g/j)	0,24	0,09	0,45 *	0,03	0,02	0,32
Activité physique (h/semaine)	0,31	0,19	0,46 *	0,14	0,07	0,09
VO ₂ max (L/min)	0,67 ***	0,68 ***	0,61 ***	0,67 ***	0,70 ***	0,36 *
VO ₂ max (ml/min/kg)	0,19	0,23	0,26	0,24	0,23	0,42 *
PSQI	- 0,08	0,05	-0,09	- 0,01	-0,06	- 0,00

IMC : Indice de Masse Corporelle ; CCJ : Consommation Calcique Journalière ; CPJ : Consommation Protéique Journalière ; VO₂ max : Consommation maximale d'oxygène ; PSQI : Indice de qualité de sommeil de Pittsburgh; CMO: Contenu Minéral Osseux; CE: Corps Entier ; DMO : Densité Minérale Osseuse ; TBS : Trabecular Bone Score ou Score Trabéculaire Osseux ; HE : Hanche Entière ; CF : Col Fémoral ; * p < 0,05 ; ** p < 0,01 ; *** p < 0,001.

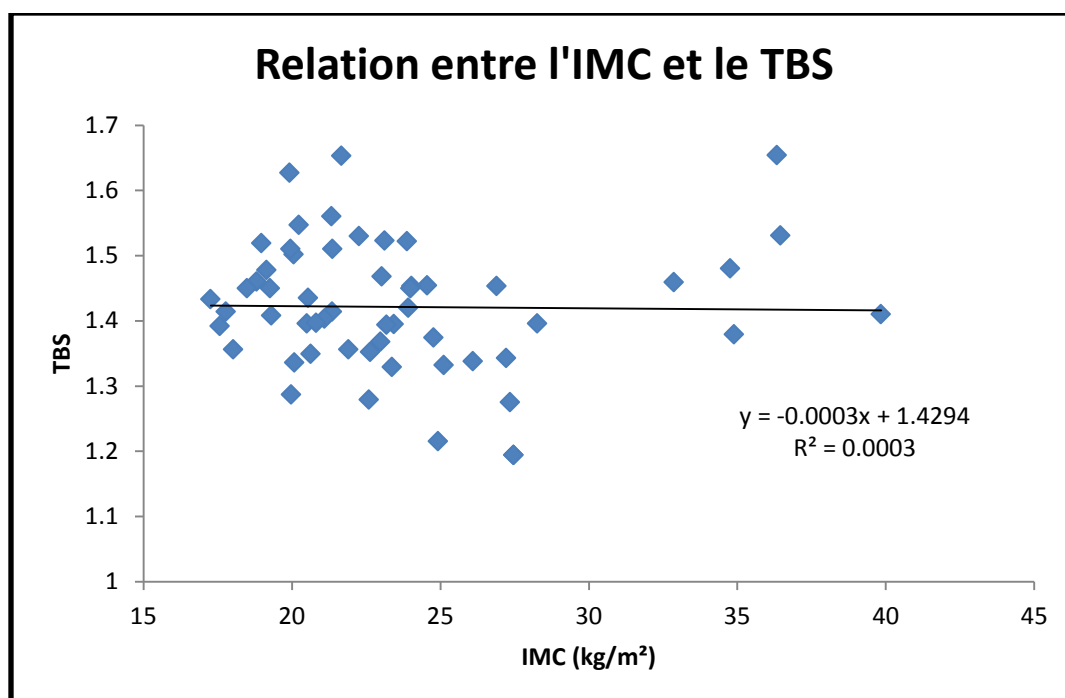


Figure 36 : Relation entre l'indice de masse corporelle et le TBS ($p > 0,05$)

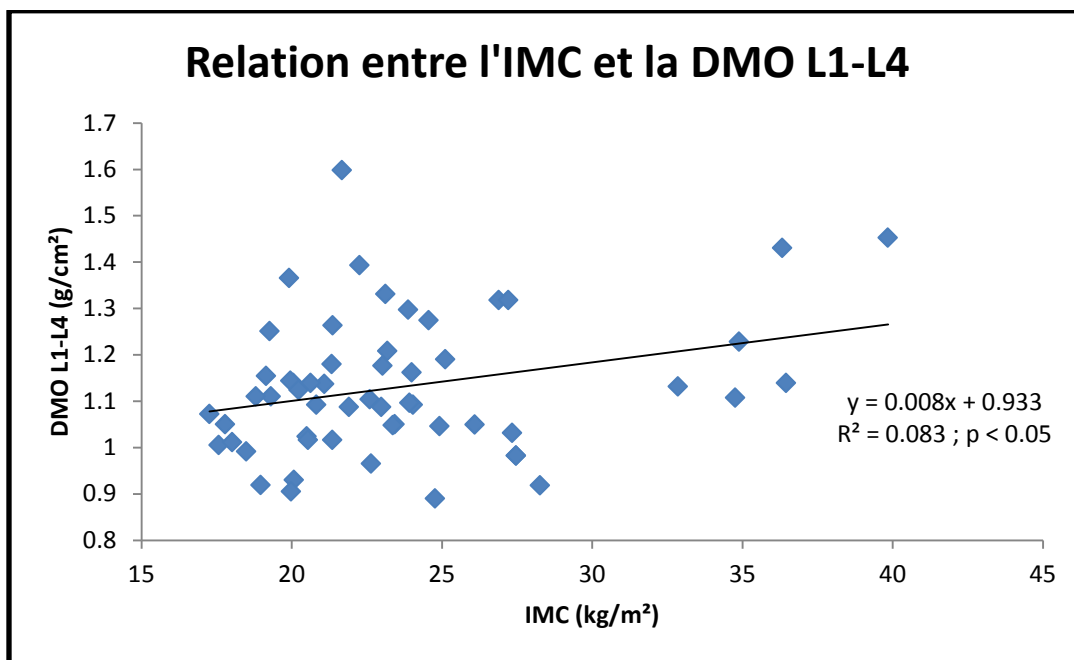


Figure 37 : Relation entre l'indice de masse corporelle et la DMO du rachis lombaire

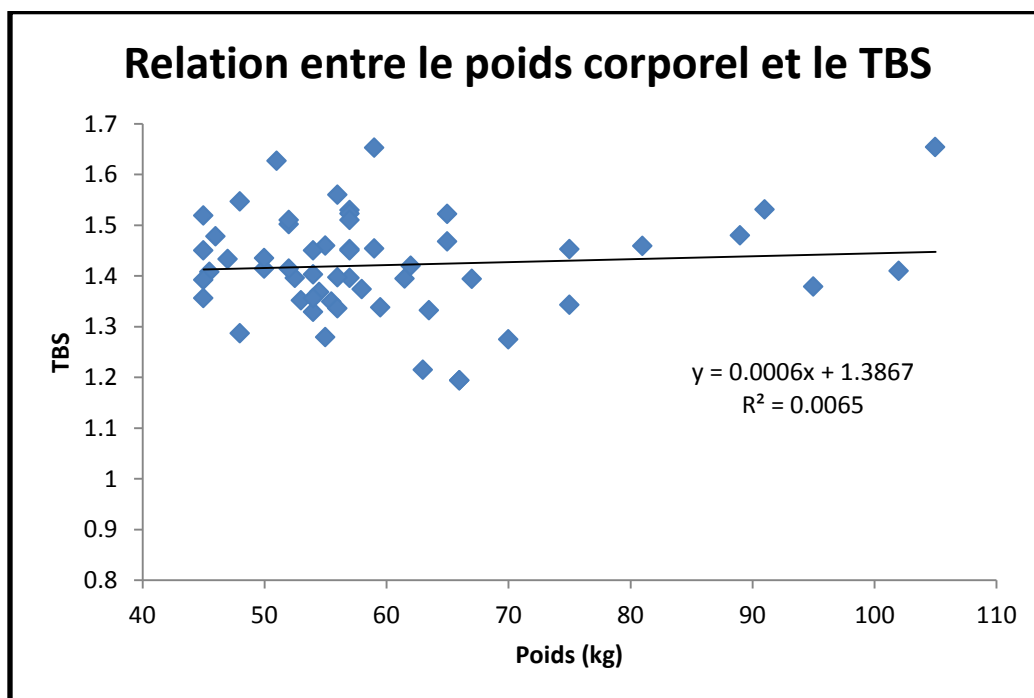


Figure 38 : Relation entre le poids corporel et le TBS ($p > 0,05$)

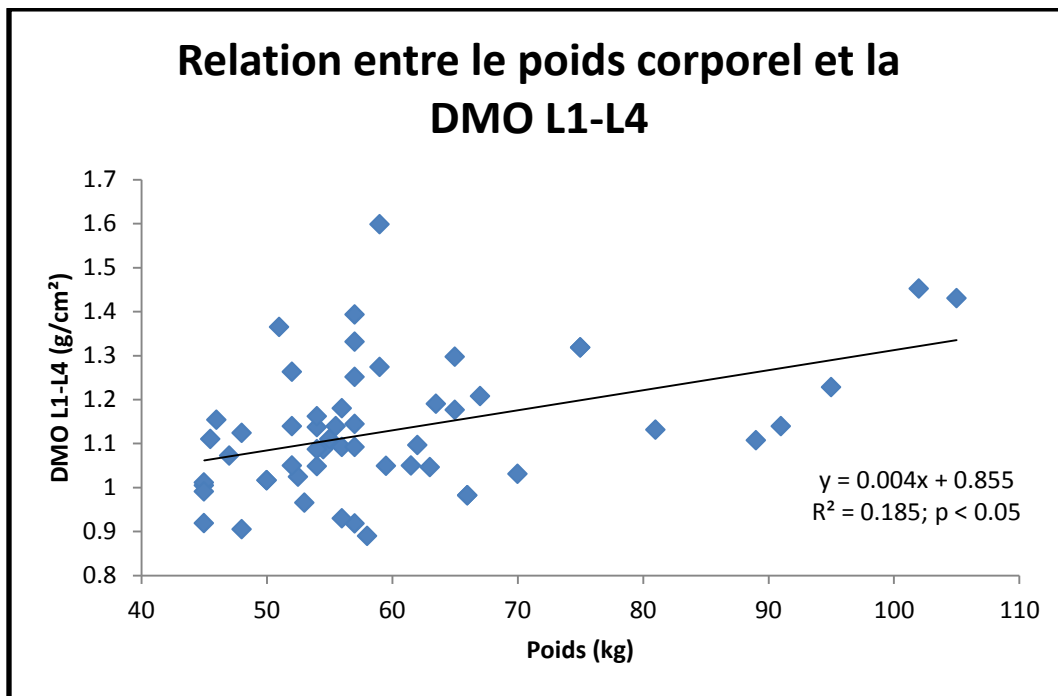


Figure 39 : Relation entre le poids corporel et la DMO L1-L4

4.4. Paramètres osseux ajustés pour l'IMC

Le CMO CE, la DMO CE, la DMO L1-L4, la DMO HE et la DMO CF n'étaient pas significativement différents après ajustement pour l'IMC. Le TBS était significativement supérieur ($p < 0,05$) chez les filles de poids normal par rapport aux filles en surcharge pondérale après ajustement pour l'IMC.

5. Discussion

Cette étude menée sur un groupe de jeunes femmes libanaises montre principalement que le surpoids n'est pas associé à des valeurs plus élevées du TBS, et que le poids corporel et l'indice de masse corporel ne sont pas des déterminants positifs du TBS. A notre connaissance, cette étude est la première à comparer le score trabéculaire osseux chez des femmes en surpoids et en

poids normal. De plus, cette étude est la première à explorer les relations entre de nombreux déterminants de la masse osseuse (poids, masse maigre, IMC, apport quotidien de calcium et l'activité physique) et le TBS chez les jeunes femmes.

Le CMO CE, la DMO CE, la DMO HE et la DMO CF étaient plus élevés chez les femmes en surpoids par rapport aux femmes de poids normal. Ce résultat est en accord avec ceux d'une étude précédente (El Hage et coll. 2014).

Les valeurs de TBS ne sont pas significativement différentes entre les deux groupes. En ce qui concerne les corrélations, le poids, la masse maigre, la masse grasse et l'IMC ont été positivement corrélés aux valeurs de CMO et de DMO mais pas aux valeurs du TBS. En outre, le TBS était faiblement corrélé à la DMO (valeurs de r comprises entre 0,45 et 0,59), suggérant que la DMO et le TBS peuvent refléter des propriétés osseuses différentes.

Ainsi, le TBS et la DMO ne semblent pas avoir les mêmes déterminants positifs. Une étude récente menée sur les adolescentes souffrant d'anorexie mentale a montré que les valeurs de TBS étaient faibles et que le TBS a montré une détérioration de la microarchitecture osseuse dans plus de 40% de l'échantillon de l'étude (Donaldson et coll. 2015). Donaldson et coll. (2015) ont également révélé que le poids, la masse maigre, la masse grasse et l'IMC étaient positivement corrélés au TBS chez les adolescentes souffrant d'anorexie mentale. Ce résultat est en désaccord avec nos résultats. En conséquence, il semble que les forces d'associations entre les caractéristiques morphologiques (poids, la masse maigre, la masse grasse et l'IMC) et le TBS sont influencées par le statut pondéral de la population étudiée. Sur cette base, la relation entre l'IMC et le TBS n'est certainement pas linéaire chez les femmes.

L'activité physique (h/semaine) était positivement corrélée au CMO CE et à la DMO L1-L4. La VO_2 max (L/min) était positivement corrélée à toutes les variables de l'os, y compris le TBS. Notre étude confirme les résultats d'études précédentes dans lesquelles il est montré des associations positives entre la VO_2 max (L/min) et les variables osseuses (Afghani et coll. 2004 ; Bevier et coll. 1989 ; Vicente-Rodriguez et coll. 2004). En fait, la VO_2 max (L/min) était le meilleur déterminant du rachis lombaire et de la DMO de la hanche dans notre étude. Basé sur nos résultats, il semble que la maximisation de la VO_2 max (L/min) pendant la croissance et l'âge adulte peut aider à prévenir l'ostéoporose plus tard dans la vie.

La CPJ était positivement corrélée à la DMO L1-L4 dans notre étude. Les mécanismes par lesquels l'apport protéique influence la masse osseuse ont été précédemment décrits (Bonjour et coll. 2007 ; Bonjour et coll. 2009).

Dans cette étude, nous n'avons pas retrouvé une relation claire entre la qualité du sommeil et les variables osseuses. Les mécanismes par lesquels les variables osseuses sont influencées par la qualité du sommeil ont été décrites précédemment (Zakheim et coll. 2014 ; Albayrak et coll. 2015). Cependant, d'autres études seront nécessaires pour comprendre complètement la relation entre le sommeil et la résistance osseuse.

Notre étude a plusieurs limites. La première limite est la nature transversale de cette étude. La deuxième limite est le faible nombre de sujets dans chaque groupe (surpoids et normo-pondéré). La troisième limitation est la nature deux dimensions de DXA (Bousson et coll. 2012 ; Fonseca et coll. 2014). Enfin, l'utilisation de questionnaires auto déclarés pour évaluer les apports alimentaires et le sommeil peuvent être considérés comme une limitation. Cependant, à notre connaissance, c'est la première étude à examiner l'influence du statut de poids sur le score osseux trabéculaire chez les jeunes femmes. Identifier les déterminants du TBS chez les jeunes femmes serait utile pour la prévention des fractures ostéoporotiques plus tard dans la vie.

6. Conclusion

Cette étude suggère que le fait d'être en surpoids n'est pas associé à des valeurs de TBS plus élevées chez les jeunes femmes.

2b. Le Trabecular Bone Score chez des jeunes hommes obèses, en surpoids et normo-pondérés

Objectif: L'objectif de cette étude est de comparer les valeurs de Trabecular Bone Score (TBS) chez des jeunes hommes obèses, en surpoids et normo-pondérés.

Méthodes: Au total, 67 jeunes hommes (âgés de 18 à 30 ans) de nationalité libanaise ont participé à cette étude (12 obèses, 32 en surpoids et 23 normo-pondérés). Le poids et la taille ont été mesurés et l'indice de masse corporelle (IMC) a été calculé. La composition corporelle, le contenu minéral osseux (CMO), la densité minérale osseuse (DMO) et le TBS au niveau du rachis lombaire (L1-L4) ont été mesurés par DXA. Le volume hebdomadaire d'activité physique, la consommation calcique journalière et la qualité du sommeil étaient évalués par des questionnaires validés. La consommation maximale d'oxygène (VO_2 max en L/min) était directement mesurée par un système de mesure spécifique lors d'un effort maximal sur bicyclette ergométrique.

Résultats: Le poids, la masse maigre, la masse grasse, l'IMC, le CMO du corps entier (CE) et la DMO CE étaient significativement différents entre les trois groupes (obèse, en surpoids et normo-pondéré). Le TBS n'était pas significativement différent entre les trois groupes (obèse, en surpoids et normo-pondéré). Dans la population entière, le poids, la masse maigre, l'IMC et la VO_2 max (L/min) étaient positivement corrélés aux valeurs de CMO et de DMO mais pas aux valeurs de TBS.

Conclusion: Cette étude suggère que l'obésité et le surpoids n'influencent pas les valeurs de TBS chez les jeunes hommes. L'indice de masse corporelle n'est pas un déterminant du TBS chez les jeunes hommes.

1. Titre de l'étude

Le Trabecular Bone Score chez des jeunes hommes obèses, en surpoids et de poids normal.

2. Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est de comparer les valeurs de trabecular bone score (TBS) chez des jeunes hommes obèses, en surpoids et de poids normal.

3. Introduction

Si l'ostéoporose est bien connue pour toucher essentiellement les femmes ménopausées, la perte osseuse avec l'âge est aussi bien démontrée chez l'homme (El Hage et coll. 2012 ; Pande et coll. 2001). La résistance mécanique de l'os est influencée par de nombreux facteurs comme la densité minérale osseuse (DMO), la géométrie osseuse, la porosité corticale et la microarchitecture osseuse (Beck et coll. 2003). La microarchitecture osseuse est l'un des facteurs qui influencent directement le risque fracturaire (NIH et coll. 2001). Actuellement, il existe différentes méthodes pour évaluer la microarchitecture osseuse mais certaines d'entre elles sont très coûteuses et irradiantes et ne peuvent donc pas être utilisées couramment en pratique clinique (El Hage et coll. 2012 ; Pande et coll. 2001). Le TBS (ou Trabecular Bone Score) est un paramètre de texture qui évalue les niveaux de gris des images d'ostéodensitométrie (DXA) du rachis lombaire (Hans et coll. 2011). En effet, le TBS est un paramètre de texture qui pourrait refléter la microarchitecture osseuse (Hans et coll. 2011). Des études récentes ont démontré que le TBS est un déterminant du risque fracturaire chez les femmes âgées (Hans et coll. 2011 ; Lamy et coll. 2011). Il a été déjà démontré que l'obésité et le surpoids sont associés à une augmentation des valeurs de DMO au niveau du rachis lombaire et de la hanche (Beck et coll. 2009 ; Reid, 2002 ; Reid, 2008). En revanche, une étude a aussi démontré que la corrélation entre la DMO et le TBS est faible suggérant que ces deux variables reflètent des propriétés osseuses différentes (Leslie et coll. 2013). De plus, il existe très peu de données sur les influences des caractéristiques morphologiques sur le TBS chez les jeunes adultes. Etant donné les faibles corrélations retrouvées entre la DMO et le TBS dans deux études antérieures (El Hage et coll. 2014 ; Leslie et coll. 2013), notre hypothèse serait que les influences de l'obésité et du surpoids sur le TBS seraient différentes de celles sur la DMO.

4. Matériel et méthodes

4.1. Sujets et design de l'étude

67 jeunes hommes (âgés de 18 à 30 ans) de nationalité Libanaise ont participé à cette étude. Les sujets ont été recrutés de deux Universités privées situées dans la région Nord du Liban. Les sujets étaient tous non-fumeurs et n'avaient reçu aucun traitement hormonal ni vitaminique susceptible de modifier leur statut osseux. Ils n'avaient pas non plus d'antécédent de maladie métabolique ou osseuse et n'avaient jamais subi d'immobilisation prolongée. Les sujets ont été répartis en trois groupes (groupe obèse ($n = 12$), groupe en surpoids ($n = 32$) et groupe normopondéré ($n = 23$) en fonction de l'indice de masse corporelle (WHO, 2000). Le consentement éclairé des participants a été obtenu. Ce protocole a reçu l'approbation du comité d'éthique de l'Université de Balamand.

4.2. Mesures

Le poids et la taille ont été mesurés, et l'indice de masse corporelle (IMC) a été calculé. La composition corporelle, le contenu minéral osseux (CMO), la densité minérale osseuse (DMO) et le TBS (Trabecular Bone Score) au niveau du rachis lombaire (L1-L4) ont été mesurés par DXA (GE-Lunar, iDXA). La DMO a été mesurée au niveau du corps entier (CE), du rachis lombaire (L1-L4), de la hanche entière (HE) et du col fémoral (CF). Les coefficients de variation des mesures de composition corporelle (masse maigre et masse grasse) et de DMO sont inférieurs à 1 % dans notre centre. Nous avons mesuré directement la consommation maximale d'oxygène (VO_2 max en L/min) en utilisant un système spécialisé (Cosmed Fitmate, version 2.20) lors d'un test triangulaire sur bicyclette ergométrique (Siemens-Elema RE 820; RodbyElektronik AB, Enhorna, Sweden).

4.3. Questionnaires

Le volume hebdomadaire d'activité physique, la consommation calcique journalière (CCJ) et l'indice de qualité de sommeil de Pittsburgh (PSQI) ont été évalués par des questionnaires validés.

4.4. Analyse statistique

Les données sont exprimées en moyenne $\pm$ la déviation standard (DS). La significativité et l'existence d'éventuelles corrélations ont été précisées par une analyse en régression linéaire simple (mesure du coefficient de corrélation de de Pearson) pour les distributions normales et par une autre analyse en régression linéaire simple (mesure du coefficient de corrélation de Spearman) pour les distributions non normales. Les différences entre les groupes (obèse, en surpoids et normo-pondéré) ont été précisées par une analyse de variance à une voie (One way Anova) suivie d'un test de Fischer LSD posthoc pour les distributions normales et par un test de rang (Kruskal–Wallis) pour les distributions non normales. Une analyse de covariance (ANCOVA) a été utilisée afin de comparer les paramètres osseux entre les trois groupes après ajustement pour l'IMC. Les analyses statistiques ont été effectuées par le logiciel Number Cruncher Statistical System (NCSS, 2001). Une valeur de $P < 0,05$ était exigée afin d'affirmer le caractère significatif des résultats.

5. Résultats

5.1. Caractéristiques de la population étudiée

L'âge, la taille, la consommation calcique journalière, le volume hebdomadaire d'activité physique et le PSQI n'étaient pas significativement différents entre les trois groupes (obèse, en surpoids et normo-pondéré). Le TBS n'était pas significativement différent entre les trois groupes (Tableau 26).

Tableau 25: Caractéristiques cliniques et paramètres osseux chez les hommes obèses, en surpoids et normo-pondérés

	Obèse (n = 12)	Surpoids (n = 32)	Poids normal (n = 23)
Age (ans)	22,0 ± 1,9	22,7 ± 3,1	22,2 ± 2,8
Poids (kg)	103,2 ± 14,1 *	84,0 ± 8,8 @	67,4 ± 8,3 \$
Taille (cm)	176,5 ± 8,2	176,3 ± 7,0	174,0 ± 7,9
IMC (kg/m ²)	33,0 ± 3,4 *	26,9 ± 1,4 @	22,2 ± 2,7 \$
Masse maigre (kg)	65,965 ± 7,797 *	60,068 ± 6,376 @	50,872 ± 6,784 \$
Masse grasse (kg)	33,753 ± 11,042 *	20,880 ± 5,761 @	13,707 ± 4,224 \$
Masse grasse (%)	32,6 ± 7,3 *	24,6 ± 5,4 @	20,3 ± 4,6 \$
CMO CE (g)	3349 ± 462 *	3078 ± 417 @	2811 ± 327 \$
DMO CE (g/cm ²)	1,317 ± 0,154 *	1,233 ± 0,096 @	1,158 ± 0,093 \$
DMO L1-L4 (g/cm ²)	1,281 ± 0,237	1,249 ± 0,143	1,194 ± 0,144
TBS L1-L4	1,367 ± 0,112	1,348 ± 0,080	1,401 ± 0,084
DMO HE (g/cm ²)	1,198 ± 0,185	1,136 ± 0,127	1,102 ± 0,136
DMO CF (g/cm ²)	1,208 ± 0,112	1,139 ± 0,122	1,094 ± 0,171
CCJ (mg/j)	1313 ± 581	1137 ± 497	1012 ± 369
CPJ (g/j)	107,4 ± 71,0	96,9 ± 33,9	82,9 ± 36,0
AP (h/sem)	10,5 ± 6,3	8,5 ± 5,8	12,0 ± 10,3
VO ₂ max (L/min)	3,605 ± 0,522 *	3,442 ± 0,686	2,668 ± 0,403 \$
VO ₂ max (ml/min/kg)	36,7 ± 5,8	40,3 ± 5,5	41,5 ± 6,1
PSQI	5,7 ± 1,7	4,5 ± 2,2	5,6 ± 2,1

IMC : Indice de Masse Corporelle ; CE : Corps Entier ; CMO : Contenu Minéral Osseux ; DMO : Densité Minérale Osseuse ; TBS : Trabecular Bone Score; HE : Hanche Entière ; CF : Col Fémoral ; CCJ : Consommation Calcique Journalière ; CPJ : Consommation Protéique Journalière ; AP : Activité Physique ; VO₂ max : Consommation maximale d'oxygène ; PSQI :

Pittsburgh Sleep Quality Index (Indice de qualité de sommeil de Pittsburgh) ; * Différences significatives entre le groupe obèse et le groupe normo-pondéré, $P < 0,05$; @ Différences significatives entre le groupe obèse et le groupe en surpoids, $p < 0,05$; \$ Différences significatives entre le groupe normo-pondéré et le groupe en surpoids, $p < 0,05$.

5.2. Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux

Le poids, la masse maigre, l'IMC, la VO_2 max (L/min), la CCJ et la CPJ étaient positivement corrélés aux valeurs de CMO et de DMO mais pas aux valeurs de TBS. Le poids la taille et le pourcentage de masse grasse étaient négativement corrélés au TBS (Tableau 15).

Tableau 26: Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux

	CMO CE (g)	DMO CE (g/cm ²)	DMO L1-L4 (g/cm ²)	DMO HE (g/cm ²)	DMO CF (g/cm ²)	TBS
Age (ans)	0,04	0,05	0,03	-0,09	-0,08	-0,14
Poids (kg)	0,66 ***	0,55 ***	0,35 **	0,35 **	0,33 **	-0,29 *
Taille (cm)	0,56 ***	0,22	0,23	0,13	0,12	-0,29 *
IMC (kg/m ²)	0,49 ***	0,55 ***	0,29 *	0,36 *	0,33 **	-0,20
Masse maigre (kg)	0,74 ***	0,54 ***	0,39 **	0,35 **	0,38 **	-0,14
Masse grasse (kg)	0,05	0,11	0,03	0,04	-0,01	-0,21
Masse grasse (%)	0,18	0,25 *	0,06	0,12	0,07	-0,38 **
CCJ (mg/j)	0,52 ***	0,46 **	0,35 *	0,47 **	0,42 **	0,20

CPJ (g/j)	0,44 **	0,37 **	0,34 *	0,37 *	0,33 *	0,21
AP (h/sem)	0,11	0,13	0,12	0,27	0,17	0,13
VO ₂ max (L/min)	0,74 ***	0,65 ***	0,58 ***	0,52 ***	0,50 ***	-0,03
VO ₂ max (ml/min/kg)	0,11	0,11	0,35 *	0,21	0,19	0,20
PSQI	0,01	0,02	0,04	0,17	0,13	0,29

IMC : Indice de Masse Corporelle ; CE : Corps Entier ; CMO : Contenu Minéral Osseux ; DMO : Densité Minérale Osseuse ; TBS : Trabecular Bone Score ; HE : Hanche Entière ; CF : Col Fémoral ; CCJ : Consommation Calcique Journalière ; CPJ : Consommation Protéique Journalière ; AP : Activité Physique ; VO₂ max: Consommation maximale d'oxygène ; PSQI : Pittsburgh Sleep Quality Index (Indice de qualité de sommeil de Pittsburgh) ; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

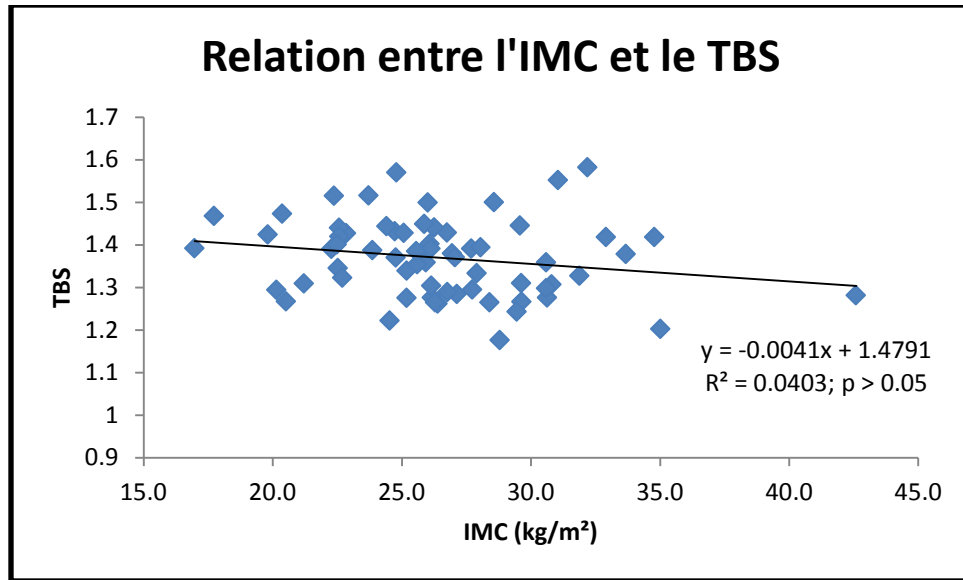


Figure 40 : Relation entre l'indice de masse corporelle et le trabecular bone score

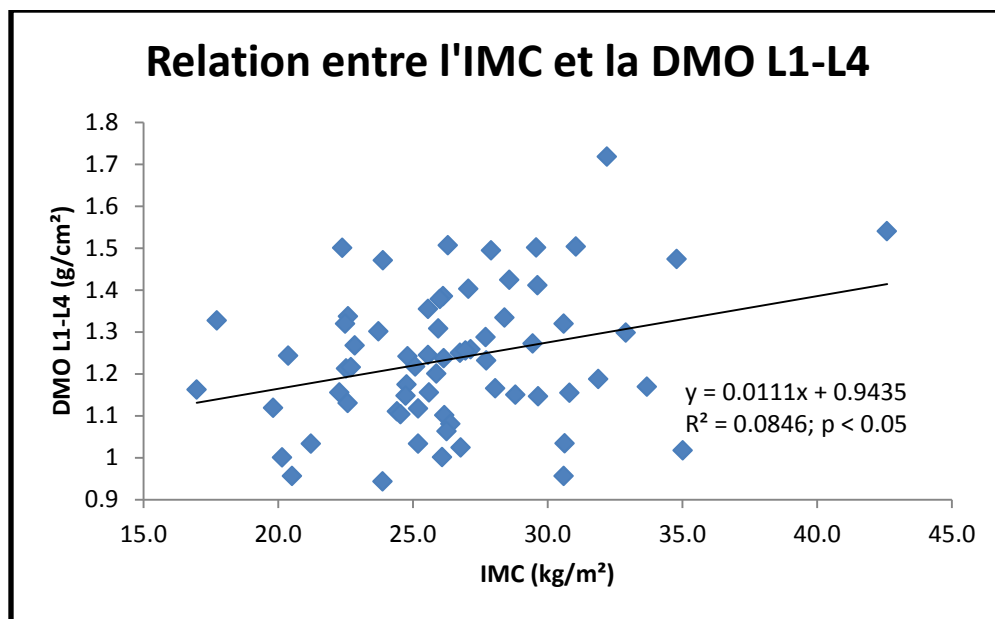


Figure 41 : Relation entre l'indice de masse corporelle et la DMO du rachis lombaire (L1-L4)

5.3. Corrélation entre le TBS et la DMO

Le TBS était positivement corrélée à la DMO CE ($r = 0,35$; $p < 0,01$), à la DMO L1-L4 ($r = 0,42$; $p < 0,001$), à la DMO HE ($r = 0,46$; $p < 0,001$) et à la DMO CF ($r = 0,48$; $p < 0,001$).

5.4. Paramètres osseux ajustés pour l'IMC

Après ajustement pour l'IMC, le CMO CE, la DMO CE, la DMO L1-L4, la DMO HE, la DMO CF et le TBS n'étaient pas significativement différents entre les trois groupes.

6. Discussion et conclusion

Cette étude menée sur un groupe de jeunes hommes Libanais montre principalement que l'obésité et le surpoids ne sont pas associés avec des valeurs plus élevées du TBS et que le poids corporel et l'indice de la masse corporelle ne sont pas déterminants positifs du TBS. A notre connaissance, c'est la première étude à comparer le score trabéculaire osseux (TBS) chez des hommes obèses, en surpoids et en poids normal.

A notre connaissance, notre étude est la première à explorer les relations entre plusieurs déterminants traditionnels (poids, masse maigre, IMC, CCJ) de la masse osseuse et le TBS chez les jeunes hommes. De plus, c'est la première étude qui a exploré l'influence du statut pondéral sur le TBS chez les jeunes hommes. Dans notre étude, le poids, la masse maigre, l'IMC et la VO_2 max (L/min) étaient positivement corrélés aux valeurs de CMO et de DMO mais pas à celles de TBS. Par conséquent, le TBS et la DMO semblent ne pas avoir les mêmes déterminants positifs. En effet, le poids et la taille étaient négativement corrélés au TBS dans notre étude.

Le CMO CE et la DMO CE étaient plus élevés chez les hommes obèses et en surpoids par rapport aux hommes dont le poids est normal. Ce résultat est en accord avec ceux de nos études précédentes (El Hage et coll. 2014). Les valeurs de TBS n'étaient pas significativement différents entre les trois groupes. Le poids, la masse maigre et l'IMC étaient positivement corrélées aux valeurs de CMO et DMO mais pas aux valeurs du TBS. En outre, le TBS n'était pas corrélée au CMO CE et était faiblement corrélée à la DMO suggérant que la DMO et le TBS

reflète différentes propriétés des os. Par conséquent, le TBS et la DMO semblent ne pas avoir le même déterminant positif. En effet, le poids et la taille sont négativement corrélés au TBS dans notre étude. Une étude récente menée sur les adolescentes ayant une anorexie mentale a montré que les valeurs du TBS étaient faibles et que le TBS a montré que la microarchitecture est dégradée dans plus de 40% de l'échantillon de l'étude (Donaldson et coll. 2015). Donaldson et coll. (2015) ont également révélé que le poids, la masse maigre et l'IMC étaient positivement corrélés au TBS chez les adolescentes souffrant d'anorexie mentale. Leur résultat est en contraste avec nos résultats.

En conséquence, il semble que les corrélations entre les caractéristiques morphologiques (poids, masse maigre et l'IMC) et les valeurs du TBS sont influencés par le statut pondéral de la population étudiée. Sur cette base, la relation entre l'IMC et le TBS n'est certainement pas linéaire chez l'homme.

Notre étude confirme les résultats d'études antérieures dans lesquelles il est montré une association positive entre la $VO_2\text{max}$ (L/min) et les variables osseuses (Afghani et coll. 2004 ; Bevier et coll. 1989 ; El Hage et coll. 2014 ; Vicente-Rodriguez et coll. 2004 ; Zakhem et coll. 2015). En effet, la $VO_2\text{ max}$ (L/mn) était le meilleur déterminant du CMO et de la DMO dans notre étude. Sur la base de nos résultats, il semble que l'augmentation de la $VO_2\text{ max}$ (L/min) pendant la croissance et l'âge adulte peut aider à prévenir l'ostéopénie et l'ostéoporose plus tard dans la vie.

La CCJ et la CPJ étaient positivement corrélées aux variables osseuses dans notre étude. Les mécanismes par lesquels le calcium et les protéines influencent la masse osseuse ont été décrits précédemment (Bonjour et coll. 2007 ; Bonjour et coll. 2009).

Dans notre étude, nous n'avons pas trouvé une relation claire entre la qualité du sommeil et les variables osseuses. Les mécanismes par lesquels la qualité de sommeil influence les variables osseuses ont été décrites précédemment (Albayrak et coll. 2015). Cependant, d'autres études seront nécessaires pour comprendre complètement la relation entre le sommeil et la résistance osseuse.

Notre étude a plusieurs limites. La première limite est la nature transversale de l'étude. La deuxième limite est le faible nombre de sujets dans chaque groupe (obèse, en surpoids et de

poids normal). La troisième limite est la nature 2- dimensionnelle de la DXA (Bousson et coll. 2012 ; Fonseca et coll. 2014). Enfin, l'utilisation des questionnaires d'auto-déclarées pour évaluer les apports alimentaires et de sommeil peut être considéré comme une limitation. Cependant, à notre connaissance, c'est la première étude à examiner l'influence du poids sur le score trabéculaire osseux chez les jeunes hommes.

En conclusion, cette étude suggère que l'obésité et le surpoids n'influencent pas positivement les valeurs de TBS chez les jeunes hommes. Le poids et l'IMC ne sont pas des déterminants positifs du TBS dans la population étudiée. De futures études seront nécessaires afin de définir les déterminants positifs du TBS chez les jeunes adultes. L'identification de ces déterminants chez les jeunes adultes pourrait aider à prévenir de manière précoce les fractures ostéoporotiques.

Discussion

Il ressort de ces deux études plusieurs points d'évidence. Premièrement, la VO_2 max (L/min) est un déterminant positif du CMO et de la DMO. Ainsi, l'augmentation de la VO_2 max (L/min) serait une stratégie intéressante dans le domaine de la prévention précoce de l'ostéoporose.

Deuxièmement, la VO_2 max (ml/mn/kg) était positivement corrélée au TBS chez les femmes. L'étude 2a a donc identifié un nouveau déterminant du TBS chez les jeunes femmes.

Troisièmement, concernant l'influence de l'obésité et du surpoids sur les paramètres osseux, le CMO et la DMO étaient supérieurs chez les sujets obèses ou en surpoids par rapport aux sujets normo-pondérés. Le poids, la masse maigre, l'IMC et la masse grasse étaient positivement corrélés au CMO et à la DMO pour les deux sexes. L'obésité et le surpoids sont donc associés à des valeurs plus élevées de CMO et de DMO.

Quatrièmement, le poids et le pourcentage de masse grasse étaient négativement corrélés au TBS chez les hommes. Ainsi, l'obésité et le surpoids n'influencent pas positivement les valeurs de TBS.

Enfin, le TBS était positivement corrélé à la DMO pour les deux sexes. Cependant, ces corrélations étaient relativement moyennes suggérant que la DMO et le TBS reflèteraient des propriétés osseuses différentes.

En conclusion, cette série d'études a identifié l'influence du statut pondéral sur les paramètres osseux chez les jeunes adultes et a pu définir plusieurs déterminants positifs de la DMO.

Troisième série d'études : Activité physique, performance physique et paramètres osseux chez des jeunes hommes en surpoids et obèses

3a. Influence du niveau d'activité physique sur les paramètres osseux chez des jeunes hommes en surcharge pondérale

Résumé

Introduction: La pratique d'activités physiques a des effets bénéfiques sur la densité minérale osseuse chez les sujets normo-pondérés. Cependant, la relation entre le niveau d'activité physique et les paramètres osseux chez les sujets en surcharge pondérale reste à éclaircir. Le but de cette étude était de comparer les paramètres osseux chez des hommes sportifs en surcharge pondérale à des hommes sédentaires en surcharge pondérale.

Méthodes: 40 jeunes hommes (18 à 32 ans) en surcharge pondérale (indice de masse corporelle $> 25 \text{ kg/m}^2$) ont participé à cette étude. La population a été divisée en deux groupes : hommes sportifs en surcharge pondérale ($n = 20$) et hommes sédentaires en surcharge pondérale ($n = 20$). Le poids et la taille des sujets ont été mesurés, et l'indice de masse corporelle (IMC) a été calculé. La composition corporelle, le contenu minéral osseux (CMO), la densité minérale osseuse (DMO) et la section transversale du col fémoral (CSA CF) ont été mesurés par absorptiométrie biphotonique à rayons X (DXA). Le volume hebdomadaire d'activité physique a été évalué par un questionnaire validé.

Résultats: Le CMO du corps entier (CE), la DMO CE, la DMO du rachis lombaire (L1-L4), la DMO CF et la CSA CF étaient significativement supérieurs dans le groupe de sportifs par rapport au groupe de sédentaires. Ces différences ont disparu après ajustement pour le volume hebdomadaire d'activité physique en utilisant une analyse de covariance. Enfin, dans l'ensemble

de l'échantillon, le volume hebdomadaire d'activité physique était positivement corrélé au CMO CE, à la DMO CE, à la DMO L1-L4, à la DMO HE, à la DMO CF et à la CSA CF.

Conclusion: Cette étude suggère que la pratique d'activités physiques a un effet positif sur le CMO, la DMO et la section transversale du col fémoral chez les hommes en surcharge pondérale.

1. Introduction

Les contraintes mécaniques ont des effets positifs sur le contenu minéral osseux (CMO) et la densité minérale osseuse (DMO) (Maimoun et coll. 2016; El Hage et coll. 2014a). Ainsi, chez les personnes sédentaires, le fait d'être en surpoids pourrait être bénéfique pour la santé osseuse (Maimoun et coll. 2016). De la même manière, le fait de pratiquer des activités physiques à impacts est associé à des valeurs de DMO plus élevées (Maimoun et coll. 2016; MacKelvie et coll. 2002). Cependant, les effets de la combinaison de ces deux facteurs, entraînement physique et surcharge pondérale restent à élucider (El Hage et coll. 2014c; MacKelvie et coll. 2002). En effet, si une étude menée chez les enfants en surpoids a montré que la réponse ostéogénique à l'entraînement pliométrique est atténuée chez les enfants ayant un IMC élevé (MacKelvie et coll. 2002), une autre étude montre que, suite à un entraînement en endurance, la DMO augmente de manière significative chez les filles de poids normal, en surpoids et obèses mais que le CMO sous total (CMO corps entier - CMO tête) n'augmente que chez les filles en surpoids et obèses (El Hage et coll. 2009b). Le but de cette étude était alors de comparer les paramètres osseux (CMO, DMO, indices géométriques du col fémoral et trabecular bone score) chez des hommes adultes sportifs en surcharge pondérale et des hommes adultes sédentaires en surcharge pondérale. Les paramètres osseux cités ci-dessus sont représentatifs d'une bonne santé osseuse

(El Hage et coll. 2014c; El Hage et coll. 2014d). Cette étude devrait permettre d'éclaircir la relation entre le niveau d'activité physique et les paramètres osseux chez les hommes adultes en surcharge pondérale.

2. Méthodes

2.1. Sujets

Quarante hommes adultes (18-32 ans) en surcharge pondérale (indice de masse corporelle $> 25 \text{ kg/m}^2$) ont participé à cette étude: 20 hommes ayant une pratique sportive régulière (pratique de sports collectifs (rugby, basket et football) supérieure à quatre heures par semaine) depuis plus de cinq ans et 20 hommes sédentaires (ne pratiquant pas régulièrement de sports à impacts). Leur recrutement a eu lieu à l'Université de Balamand, Liban. Les deux groupes (hommes sportifs en surcharge pondérale et hommes sédentaires en surcharge pondérale) étaient appariés pour l'âge et l'IMC. Les participants n'avaient pas d'antécédent de maladie métabolique ou osseuse et n'avaient jamais subi d'immobilisation prolongée. Le consentement éclairé a été obtenu des participants. L'étude a été approuvée par le comité d'éthique de l'Université de Balamand.

2.2. Mesures anthropométriques

Les mesures du poids et de la taille des sujets ont été réalisées par l'intermédiaire d'une balance électronique (Taurus, précision : 0,1 kg) et d'une toise (Seca, précision: 0,1 cm).

2.3. Mesures densitométriques

Des mesures d'absorptiométrie biphotonique à rayons- X (DXA (GE Healthcare, Madison, WI) ont été réalisées au niveau du corps entier (CE), du rachis lombaire (L1-L4), de la hanche entière (HE) et du col fémoral (CF). La composition corporelle, la surface de la section transversale du

col fémoral (CSA CF), le module de section du col fémoral (Z CF) et le TBS (trabecular bone score) au niveau du rachis lombaire ont été également évalués par DXA. Toutes ces mesures ont été réalisées par le même technicien et sur la même machine dans le même centre hospitalier. Le caractère aveugle (par rapport au groupe d'appartenance des sujets: sédentaire ou sportif) du technicien réalisant les mesures était respecté. Dans ce centre, le coefficient de variation pour les mesures de DMO de la hanche entière était inférieur à 1% (El Hage et coll. 2014c ; El Khoury et coll. 2016a).

2.4. Consommation calcique journalière (CCJ)

Les sujets ont tous rempli un questionnaire fréquentiel d'évaluation de la consommation calcique journalière préalablement validé (questionnaire de Fardellone) (Fardellone et coll. 1991). Ce questionnaire comporte 30 items: produits laitiers, viandes, poissons, œufs, diverses céréales, légumes secs, légumes verts, fruits, desserts, eau (minérale et du robinet), jus de fruits et boissons alcoolisées (vin, bière et cidre), etc. Aucun sujet ne recevait de suppléments calciques durant cette étude.

2.5. Consommation protéique journalière (CPJ)

La CPJ a été évaluée par un questionnaire fréquentiel préalablement validé (questionnaire de Morin) (Morin et coll. 2005). Ce questionnaire comporte 20 items: produits laitiers, fromages, viandes, poissons, œufs, pommes de terre, haricots, lentilles, légumes secs, pains, pizzas, crèmes glacées, etc. Aucun jeune homme ne recevait de suppléments protéiques dans cette étude.

2.6. Activité physique

Le volume hebdomadaire d'activité physique a été évalué à l'aide d'un questionnaire validé (questionnaire de Deheeger) (Buysse et coll. 1989).

2.7. Mesures sanguines

Un prélèvement sanguin a permis de mesurer les concentrations sériques en parathormone (PTH) et en 25- hydroxy-vitamine D (El Hage et coll. 2014c; El Khoury et coll. 2016a).

2.8. Traitement statistique

Les données sont exprimées en moyenne $\pm$ la déviation standard ou l'erreur standard. Les différences entre les deux groupes (hommes sportifs en surcharge pondérale et hommes sédentaires en surcharge pondérale) ont été évaluées par le test-t de Student. Les corrélations ont été précisées par le test de Pearson. Les différences entre les deux groupes (hommes sportifs en surcharge pondérale et hommes sédentaires en surcharge pondérale) ont été évaluées après ajustement pour le niveau d'activité physique (h/sem) en utilisant une analyse de covariance (ANCOVA). Le caractère aveugle (par rapport au groupe d'appartenance des sujets: sédentaire ou sportif) de la personne réalisant les données statistiques était respecté. Les analyses statistiques ont été effectuées par le logiciel Number Cruncher Statistical System (NCSS, 2001). Une valeur de $p < 0,05$ était exigée pour affirmer le caractère significatif des différences.

3. Résultats

3.1. Paramètres osseux de la population étudiée

Le contenu minéral osseux du corps entier (CMO CE), la densité minérale osseuse du corps entier (DMO CE), la DMO du rachis lombaire (L1-L4), la DMO du col fémoral (CF), la surface de la section transversale du col fémoral (CSA CF) et la concentration sérique en vitamine D

étaient significativement supérieurs ($p < 0,05$) chez les hommes sportifs en surcharge pondérale par rapport aux hommes sédentaires en surcharge pondérale (Tableau 27). Le TBS, la DMO HE et le Z CF n'étaient pas significativement différents entre les deux groupes (Tableau 27).

Tableau 27: Caractéristiques de la population étudiée

	Hommes sportifs en surcharge pondérale (n = 20)	Hommes sédentaires en surcharge pondérale (n = 20)
	Moyenne $\pm$ déviation standard	Moyenne $\pm$ déviation standard
Age (ans)	24,7 $\pm$ 4,6	25,1 $\pm$ 5,2
Poids (kg)	95,0 $\pm$ 9,5	100,6 $\pm$ 10,8
Taille (cm)	177,2 $\pm$ 7,0	178,0 $\pm$ 8,3
IMC (kg/m ²)	30,2 $\pm$ 2,8	31,7 $\pm$ 2,1
Masse maigre (kg)	65,290 $\pm$ 5,758	62,827 $\pm$ 7,334
Masse grasse (kg)	25,600 $\pm$ 16,720 *	34,121 $\pm$ 7,994
Masse grasse (%)	27,1 $\pm$ 5,4 **	34,0 $\pm$ 4,1
CMO CE (g)	3423 $\pm$ 365 *	3155 $\pm$ 317
DMO CE (g/cm ²)	1,329 $\pm$ 0,119 *	1,251 $\pm$ 0,078
DMO L1-L4 (g/cm ²)	1,321 $\pm$ 0,164 **	1,196 $\pm$ 0,107
TBS L1-L4	1,370 $\pm$ 0,113	1,338 $\pm$ 0,125
DMO HE (g/cm ²)	1,233 $\pm$ 0,139	1,141 $\pm$ 0,152
DMO CF (g/cm ²)	1,233 $\pm$ 0,141 *	1,138 $\pm$ 0,133
CSA CF (mm ²)	217,4 $\pm$ 28,1 *	196,3 $\pm$ 20,7
Z CF (mm ³)	1082 $\pm$ 248	960 $\pm$ 189
Vitamine D (ng/ml)	28,6 $\pm$ 8,4 ***	19,8 $\pm$ 6,8
PTH (pg/ml)	38,0 $\pm$ 10,1	42,6 $\pm$ 12,6

AP (h/sem)	11,4 ± 4,1 ***	2,4 ± 1,9
CCJ (mg/j)	1391 ± 590	1220 ± 277
CPJ (g/j)	141 ± 54	147 ± 46

IMC: Indice de Masse Corporelle; CMO CE: Contenu Minéral Osseux; CE: Corps Entier; DMO: Densité Minérale Osseuse; HE: Hanche Entière; CF: Col Fémoral; CSA: Surface de la Section Transversale; Z: Module de section; PTH: Parathormone; AP: Activité Physique; CCJ: Consommation Calcique Journalière; CPJ: Consommation Protéique Journalière; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

3.2. Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux

Le volume hebdomadaire d'activité physique était positivement corrélé au CMO CE ($r = 0,37$; $p < 0,05$), à la DMO CE ($r = 0,47$; $p < 0,01$), à la DMO L1-L4 ($r = 0,39$; $p < 0,05$), à la DMO HE ($r = 0,35$; $p < 0,05$), à la DMO CF ($r = 0,39$; $p < 0,05$) et à la CSA CF ($r = 0,40$; $p < 0,05$). La masse maigre était positivement corrélée au CMO CE ($r = 0,70$; $p < 0,001$), à la CSA CF ($r = 0,49$; $p < 0,001$) et au Z CF ($r = 0,61$; $p < 0,001$). Le pourcentage de masse grasse était négativement corrélé au CMO CE ($-0,36$; $p < 0,05$) et à la CSA CF ($r = -0,38$; $p < 0,05$). La CCJ était positivement corrélée au CMO CE ($r = 0,44$; $p < 0,05$), à la CSA CF ($r = 0,40$; $p < 0,05$) et au Z CF ($r = 0,33$; $p < 0,05$). La concentration sérique en vitamine D était positivement corrélée au CMO CE ($r = 0,40$; $p < 0,01$) et à la DMO L1-L4 ($r = 0,38$; $p < 0,05$) (Tableau 28).

Tableau 28: Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux

	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 CF (mm ²)	Z CF (mm ³)	TBS
Age (ans)	-0,05	0,00	0,06	-0,12	-0,15	-0,23	-0,29	-0,37 *
Poids (kg)	0,44 **	0,15	0,05	0,17	0,02	0,01	0,37 *	-0,07
Taille (cm)	0,48 **	0,04	0,07	-0,00	-0,08	0,20	0,45 **	-0,41 **
IMC (kg/m ²)	0,05	0,15	-0,00	0,21	0,12	0,01	0,01	0,33 *
Masse maigre (kg)	0,70 ***	0,29	0,26	0,25	0,16	0,49 ***	0,61 ***	-0,00
Masse grasse (kg)	-0,19	-0,17	-0,17	-0,18	-0,21	-0,27	-0,15	-0,06
Masse grasse (%)	-0,36 *	-0,22	-0,29	-0,15	-0,18	-0,38 *	-0,28	-0,12
Vit D (ng/ml)	0,40 **	0,27	0,38 *	0,24	0,27	0,30	0,23	0,04
PTH (pg/ml)	-0,19	-0,16	-0,23	-0,17	-0,22	-0,28	-0,13	0,07
CCJ (mg/j)	0,44 *	0,29	0,24	0,25	0,24	0,40 *	0,33 *	-0,04
CPJ (g/j)	0,24	0,04	0,10	-0,02	-0,08	0,20	0,19	0,21

AP (h/sem)	0,37 *	0,47 **	0,39 *	0,35 *	0,39 *	0,40 *	0,16	0,21
------------	--------	---------	--------	--------	--------	--------	------	------

IMC: Indice de Masse Corporelle; CMO CE: Contenu Minéral Osseux; CE: Corps Entier; DMO: Densité Minérale Osseuse; HE:

Hanche Entière; CF: Col Fémoral; CSA: Surface de la Section Transversale; Z: Module de section; PTH : Parathormone; AP : Activité

Physique; CCJ: Consommation Calcique Journalière; CPJ: Consommation Protéique Journalière; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

3.3. Paramètres osseux ajustés pour le volume hebdomadaire d'activité physique

Après ajustement pour le volume hebdomadaire d'activité physique en utilisant une analyse de covariance, il n'y avait aucune différence significative entre les deux groupes (hommes sportifs en surcharge pondérale et hommes sédentaires en surcharge pondérale) au niveau de tous les paramètres osseux mesurés (Tableau 29).

Tableau 29 : Paramètres osseux ajustés pour le volume hebdomadaire d'activité physique

	Hommes sportifs en surcharge pondérale (n = 20)	Hommes sédentaires en surcharge pondérale (n = 20)
	Moyenne $\pm$ erreur standard	Moyenne $\pm$ erreur standard
CMO CE (g)	3365 $\pm$ 77	3212 $\pm$ 77
DMO CE (g/cm ²)	1,285 $\pm$ 0,021	1,294 $\pm$ 0,021
DMO L1-L4 (g/cm ²)	1,301 $\pm$ 0,031	1,251 $\pm$ 0,031
TBS L1-L4	1,341 $\pm$ 0,026	1,367 $\pm$ 0,027
DMO HE (g/cm ²)	1,194 $\pm$ 0,032	1,179 $\pm$ 0,032
DMO CF (g/cm ²)	1,191 $\pm$ 0,030	1,179 $\pm$ 0,030
CSA CF (mm ²)	212,6 $\pm$ 5,5	201,0 $\pm$ 5,5
Z CF (mm ³)	1114,4 $\pm$ 49,8	928,1 $\pm$ 49,8

CMO CE: Contenu Minéral Osseux; CE: Corps Entier; DMO: Densité Minérale Osseuse; HE: Hanche Entière; CF: Col Fémoral; CSA: Surface de la Section Transversale; Z: Module de section.

4. Discussion

Cette étude menée chez des jeunes adultes en surcharge pondérale montre essentiellement que le niveau d'activité physique est positivement corrélé aux paramètres osseux (contenu minéral osseux, densité minérale osseuse et surface de la section transversale du col fémoral). Ceci suggère que la pratique d'activité physique a un effet ostéogénique chez les hommes en surcharge pondérale.

Dans notre étude, les deux groupes (sportifs et sédentaires) étaient appariés pour l'IMC et l'âge. Cependant, le CMO CE, la DMO CE, la DMO L1-L4, la DMO CF et la CSA CF étaient significativement supérieurs chez les hommes sportifs en surcharge pondérale par rapport aux hommes sédentaires en surcharge pondérale. En parallèle, dans la population entière ($n = 40$), le volume hebdomadaire d'activité physique était positivement corrélé à la plupart des paramètres osseux mesurés dans cette étude (CMO CE, DMO CE, DMO L1-L4, DMO HE, DMO CF et CSA CF). Ces résultats suggèrent donc une influence positive de la pratique d'activité physique sur les paramètres osseux des hommes en surcharge pondérale. Après ajustement pour le volume hebdomadaire d'activité physique (analyse de covariance), les différences significatives disparaissent entre les deux groupes au niveau de tous les paramètres osseux. Ces résultats renforcent l'hypothèse de causalité entre la pratique d'activités physiques et l'augmentation de la DMO chez les hommes en surcharge pondérale. De plus, nos résultats sont en accord avec ceux de deux études longitudinales montrant des effets bénéfiques de l'entraînement physique sur la minéralisation osseuse des sujets obèses (Deheeger et coll. 1997; Shah et coll. 2011).

Plusieurs corrélations significatives ont été retrouvées entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux de la population étudiée ($n = 40$).

La masse maigre était positivement corrélée au CMO CE, à la CSA CF et au Z CF. Ces résultats sont en accord avec ceux de plusieurs études (Maimoun et coll. 2016; El Hage et coll. 2014c). Nos résultats confirment la forte corrélation existante entre la masse maigre et la DMO chez les hommes en surpoids et obèses (El Khoury et coll. 2016a).

Le pourcentage de masse grasse était négativement corrélé au CMO CE et à la CSA CF. Nos résultats suggèrent que l'adiposité aurait un effet négatif sur la masse osseuse des hommes en surcharge pondérale. Les arguments en faveur d'un effet négatif de la masse grasse sur la masse osseuse ou la DMO ont été expliqués par Rosen et Bouxsein (Campos et coll. 2014).

La concentration sérique en vitamine D était positivement corrélée au CMO CE et à la DMO L1-L4. Ces résultats confirment donc l'influence positive de la vitamine D sur la masse osseuse (Rosen et Bouxsein et coll. 2006).

La CCJ était positivement corrélée au CMO CE, à la CSA CF et au Z CF. Nos résultats confirment l'influence positive d'un apport adéquat en calcium sur la masse osseuse (Rosen et Bouxsein et coll. 2006).

Notre étude présente quelques limites. La nature transversale de l'étude est une limite car elle ne permet pas d'affirmer une relation de cause à effet entre le niveau d'activité physique et les paramètres osseux. La deuxième limite est le faible nombre de sujets inclus dans chaque groupe. La troisième limite est la nature 2-dimensionnelle de la DXA (Bonjour et coll. 2007). La quatrième limite est l'utilisation des auto-questionnaires pour évaluer les apports calciques et protéiques. Cependant, à notre connaissance, c'est la première étude qui explore l'influence du niveau d'activité physique sur les paramètres osseux chez des hommes en surcharge pondérale. En conclusion, cette étude a montré que les valeurs de CMO, de DMO et de surface de section

transversale du col fémoral étaient supérieures chez des hommes sportifs en surcharge pondérale par rapport aux hommes sédentaires en surcharge pondérale suggérant ainsi un effet ostéogénique de la pratique d'activités physiques sur les paramètres osseux chez les hommes en surcharge pondérale. A notre connaissance, notre étude est la première à démontrer des corrélations positives entre le volume hebdomadaire d'activité physique et la densité minérale osseuse chez les jeunes hommes en surcharge pondérale. Cette étude suggère donc qu'il faille augmenter le niveau d'activité physique chez les jeunes hommes en surcharge pondérale pour prévenir l'ostéoporose plus tard dans la vie. Elle suggère aussi comme d'autres études que le fait d'être en surcharge pondérale n'est pas en soi un signe de mauvaise santé si on s'adresse à des sportifs (Heitmann et coll. 2009; Orsini et coll. 2008; Staiano et coll. 2012).

3b. Paramètres osseux chez des jeunes hommes sportifs en surpoids ou obèses et des jeunes hommes sédentaires en surpoids ou obèses

Le but de cette étude était de comparer les paramètres osseux chez des hommes sportifs en surpoids ou obèses et des hommes sédentaires en surpoids ou obèses. 37 hommes sportifs en surpoids ou obèses et 45 hommes sédentaires en surpoids ou obèses ont participé à cette étude. Le poids et la taille ont été mesurés et l'indice de masse corporelle (IMC) a été calculé. La composition corporelle et les paramètres osseux (le contenu minéral osseux (CMO), la densité minérale osseuse (DMO), les indices géométriques de résistance osseuse de la hanche et le trabecular bone score (TBS) ont été mesurés par DXA. Le niveau d'activité physique, la consommation calcique journalière (CCJ), la consommation protéique journalière et la durée de sommeil ont été mesurés par des questionnaires validés. La consommation maximale d'oxygène (VO_2 max) a été mesurée directement lors d'un effort maximal sur un tapis roulant. La force maximale en demi-squat a été mesurée en utilisant un protocole validé. Le poids et l'IMC étaient significativement supérieurs chez les hommes sédentaires en surpoids ou obèses par rapport aux hommes sportifs en surpoids ou obèses. Dans la population entière ($n = 82$), la VO_2 max (L/min), la masse maigre et la force maximale en demi-squat étaient positivement corrélées au CMO, à la DMO et aux indices géométriques de résistance osseuse de la hanche (surface de la section transversale et module de section). Après ajustement pour le poids corporel en utilisant une analyse de covariance, le CMO du corps entier, la DMO L1-L4, la DMO HE, la DMO CF, la CSA CF et le Z CF étaient supérieurs chez les hommes sportifs en surpoids ou obèses par rapport aux hommes sédentaires en surpoids ou obèses. En conclusion, cette étude suggère que le niveau d'activité physique influence positivement les paramètres osseux chez les hommes en surpoids et obèses. L'optimisation de la masse maigre et de la force maximale des membres inférieurs peut aider à prévenir l'ostéoporose chez les hommes en surpoids et obèses.

1. Matériels et méthodes

1.1. Sujets

82 hommes adultes (18-35 ans) en surpoids ou obèses (indice de masse corporelle $> 25 \text{ kg/m}^2$) ont participé à cette étude: 37 hommes ayant une pratique sportive régulière (pratique de sports collectifs supérieure à trois heures par semaine) depuis plus de cinq ans et 45 hommes

sédentaires (ne pratiquant pas régulièrement de sports à impacts). Leur recrutement a eu lieu dans trois universités privées situées au Nord Liban. Les participants n'avaient pas d'antécédent de maladie métabolique ou osseuse et n'avaient jamais subi d'immobilisation prolongée. Le consentement éclairé a été obtenu des participants. L'étude a été approuvée par le comité d'éthique de l'Université de Balamand.

1.2. Mesures anthropométriques

Les mesures du poids et de la taille des sujets ont été réalisées par l'intermédiaire d'une balance électronique (Taurus, précision: 0,1 kg) et d'une toise (Seca, précision: 0,1 cm). L'indice de masse corporelle a été calculé. La composition corporelle a été évaluée par DXA (GE Healthcare, Madison, WI).

1.3. Paramètres osseux

Des mesures d'absorptiométrie biphotonique à rayons- X (DXA (GE Healthcare, Madison, WI)) ont été réalisées au niveau du corps entier (CE), du rachis lombaire (L1-L4), de la hanche entière (HE) et du col fémoral (CF). La composition corporelle, la surface de la section transversale du col fémoral (CSA CF), le module de section du col fémoral (Z CF) et le TBS (trabecular bone score) au niveau du rachis lombaire ont été également évalués par DXA. Toutes ces mesures ont été réalisées par le même technicien et sur la même machine dans le même centre hospitalier. Le caractère aveugle (par rapport au groupe d'appartenance des sujets: sédentaire ou sportif) du technicien réalisant les mesures était respecté. Dans ce centre, le coefficient de variation pour les mesures de DMO de la hanche entière était inférieur à 1%.

1.4. Questionnaires

La consommation calcique journalière (CCJ), la consommation protéique journalière (CPJ), la durée du sommeil, la qualité du sommeil et le volume hebdomadaire d'activité physique ont été évalués par des questionnaires validés.

1.5. Force maximale en demi-squat

La force maximale en demi-squat a été évaluée par un appareil de musculation classique (Smith-machine) en respectant les instructions de l'Association nationale de conditionnement et de force musculaire (NCSA).

1.6. Mesure de la consommation maximale d'oxygène

La consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$) a été mesurée directement par un appareil de mesure (Cosmed Fitmate pro device (version 2,20, Cosmed)) lors d'un test triangulaire (augmentation de 1,5 à 2 km/h par palier) sur tapis roulant. Les mesures ont été réalisées deux heures après le petit déjeuner.



Figure 42 : L'appareil de mesure de la VO_2 (Cosmed Fimate pro)

1.7. Mesures sanguines

Un prélèvement sanguin a permis de mesurer les concentrations sériques en parathormone (PTH) et en 25- hydroxy-vitamine D.

1.8. Traitement statistique

Les données sont exprimées en moyenne $\pm$ la déviation standard ou l'erreur standard. Les différences entre les deux groupes (hommes sportifs en surpoids ou obèses et hommes sédentaires en surpoids ou obèses) ont été évaluées par le test-t de Student. Les corrélations ont été précisées par le test de Pearson. Des régressions linéaires à variables multiples ont été utilisées afin d'explorer les importances relatives de la masse maigre et de la force maximale en demi-squat sur les paramètres osseux mesurés par DXA. Les différences entre les deux groupes (hommes sportifs en surpoids ou obèses et hommes sédentaires en surpoids ou obèses) ont été évaluées après ajustement pour l'IMC, le poids, la masse maigre, la force maximale en demi-squat et la VO₂ max (L/min) en utilisant des analyses de covariance (ANCOVA). Le caractère aveugle (par rapport au groupe d'appartenance des sujets: sédentaire ou sportif) de la personne réalisant les données statistiques était respecté. Les analyses statistiques ont été effectuées par le logiciel Number Cruncher Statistical System (NCSS, 2001). Une valeur de $p < 0,05$ était exigée pour affirmer le caractère significatif des résultats.

2. Résultats

2.1. Caractéristiques cliniques et paramètres osseux de la population étudiée

Le poids, l'IMC, la masse grasse, le pourcentage de masse grasse et la CPJ étaient significativement supérieurs chez les hommes sédentaires en surpoids et obèses par rapport aux hommes sportifs en surpoids et obèses ($p < 0,05$). La concentration sérique en vitamine D, la VO₂ max (ml/mn/kg), la force maximale en demi-squat et le niveau d'activité physique (h/semaines) étaient significativement supérieurs chez les hommes sportifs en surpoids et obèses par rapport aux hommes sédentaires en surpoids et obèses ($p < 0,05$). Les paramètres osseux n'étaient pas significativement différents entre les deux groupes.

Tableau 30 : Caractéristiques cliniques et paramètres osseux de la population étudiée

	Hommes actifs en surpoids ou obèses (n = 37)	Hommes sédentaires en surpoids ou obèses (n = 45)
Age (ans)	22.7 ± 4.1	24.5 ± 4.8
Poids (kg)	90.2 ± 9.5 ***	107.6 ± 17.8
Taille (cm)	176.9 ± 6.2	177.8 ± 7.4
IMC (kg/m ²)	28.8 ± 2.7 ***	34.1 ± 5.8
Masse maigre (kg)	63.683 ± 5.494	64.591 ± 8.185
Masse grasse (kg)	23.310 ± 15.5 ***	39.677 ± 13.170
Masse grasse (%)	25.9 ± 6.2 ***	36.8 ± 6.1
CMO CE (g)	3204 ± 296	3332 ± 430
DMO CE (g/cm ²)	1.285 ± 0.123	1.290 ± 0.124
DMO L1-L4 (g/cm ²)	1.272 ± 0.150	1.216 ± 0.154
DMO HE (g/cm ²)	1.186 ± 0.148	1.170 ± 0.160
DMO CF (g/cm ²)	1.188 ± 0.148	1.163 ± 0.149
CSA CF (mm ²)	209.0 ± 27.8	202.7 ± 29.8
Z CF (mm ³)	1040 ± 217	1004 ± 215
TBS	1.373 ± 0.101	1.338 ± 0.142

Vit D (ng/ml)	29.4 ± 11.4 ***	20.9 ± 8.3
PTH (pg/ml)	39.6 ± 13.5	45.2 ± 14.4
VO ₂ max (L/min)	3.67 ± 0.43	3.66 ± 0.71
VO ₂ max (mL/min/kg)	41.1 ± 4.6 ***	34.2 ± 7.1
Force maximale en demi-squat (kg)	136.7 ± 46.3 ***	100.1 ± 16.5
AP (h/semaine)	10.1 ± 5.8 ***	2.0 ± 1.6
CCJ (mg/j)	1305 ± 333	927 ± 578
CPJ (g/j)	92.6 ± 3.8 *	154.3 ± 41.3
Sommeil (h/j)	7.2 ± 1.7	7.0 ± 1.1
PSQI	4 ± 2.8	4 ± 1.8

IMC: Indice de masse corporelle; CMO CE: Contenu minéral osseux du corps entier; DMO CE: Densité minérale osseuse du corps entier; DMO HE: Densité minérale osseuse de la hanche entière; DMO CF: Densité minérale osseuse du col fémoral; CSA CF: Surface de la section transversale du col fémoral; Z CF: Module de section du col fémoral; TBS: Trabecular Bone Score; VO₂ max: Consommation maximale d'oxygène; AP: Activité physique; CCJ: Consommation Calcique Journalière; CPJ: Consommation Protéique Journalière; * différences significatives entre les hommes actifs et les hommes sédentaires, $p < 0,05$; ** différences significatives entre les hommes actifs et les hommes sédentaires, $p < 0,01$; *** différences significatives entre les hommes actifs et les hommes sédentaires, $p < 0,001$.

2.2. Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux

Le poids corporel était positivement corrélé au CMO CE ($r = 0,42$; $p < 0,001$), à la DMO CE ($r = 0,39$; $p < 0,001$), à la DMO HE ($r = 0,31$; $p < 0,05$), à la CSA CF ($r = 0,22$; $p < 0,05$) et au Z CF

($r = 0,24$; $p < 0,05$). La masse maigre était positivement corrélée au CMO CE ($r = 0,72$; $p < 0,001$), à la DMO CE ($r = 0,42$; $p < 0,001$), à la DMO L1-L4 ($r = 0,32$; $p < 0,05$), à la DMO HE ($r = 0,38$; $p < 0,001$), à la DMO CF ($r = 0,37$; $p < 0,001$), à la CSA CF ($r = 0,53$; $p < 0,001$) et au Z CF ($r = 0,55$; $p < 0,001$). La VO_2 max (L/min) était positivement corrélée au CMO CE ($r = 0,48$; $p < 0,001$), à la DMO CE ($r = 0,43$; $p < 0,001$), à la DMO L1-L4 ($r = 0,27$; $p < 0,05$), à la DMO HE ($r = 0,40$; $p < 0,001$), à la DMO CF ($r = 0,38$; $p < 0,001$), à la CSA CF ($r = 0,37$; $p < 0,001$) et au Z CF ($r = 0,37$; $p < 0,01$). La VO_2 max (ml/mn/kg) était positivement corrélée au TBS ($r = 0,25$; $p < 0,001$). La force maximale en demi-squat était positivement corrélée au CMO CE ($r = 0,37$; $p < 0,01$), à la DMO CE ($r = 0,29$; $p < 0,05$), à la DMO L1-L4 ($r = 0,42$; $p < 0,001$), à la DMO HE ($r = 0,26$; $p < 0,05$), à la DMO CF ($r = 0,32$; $p < 0,01$), à la CSA CF ($r = 0,44$; $p < 0,001$) et au Z CF ($r = 0,37$; $p < 0,001$).

Tableau 31 : Corrélations entre les caractéristiques cliniques et les paramètres osseux

	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 CF (mm ²)	Z CF (mm ³)	TBS
Age (ans)	-0.00	0.03	-0.01	-0.10	-0.17	-0.21	-0.25 *	-0.35 **
Poids (kg)	0.42 ***	0.39 ***	0.10	0.31 **	0.20	0.22 *	0.24 *	-0.12
Taille (cm)	0.46 ***	0.02	0.18	0.04	-0.02	0.19	0.39	-0.20
IMC (kg/m ²)	0.22 *	0.39 ***	0.03	0.29 **	0.21 *	0.13	0.06	-0.03
Masse maigre (kg)	0.72 ***	0.42 ***	0.32 ***	0.38 ***	0.37 ***	0.53 ***	0.55 ***	0.14
Masse grasse (kg)	0.07	0.10	-0.00	0.07	0.03	0.01	0.04	-0.03
Masse grasse (%)	-0.11	0.11	-0.19	0.05	-0.05	-0.21	-0.22 *	-0.12
Vit D (ng/ml)	0.05	0.02	0.06	0.01	0.02	0.04	0.01	0.04
PTH (pg/ml)	-0.07	0.02	-0.15	-0.03	-0.06	-0.09	0.00	0.02
CCJ (mg/j)	0.38 ***	0.27 *	0.14	0.24 *	0.23	0.33 **	0.3	0.08

CPJ (g/j)	0.27 *	0.25 *	0.06	0.13	0.06	0.19	0.19	-0.08
VO ₂ max (L/min)	0.48 ***	0.43 ***	0.27 *	0.40 ***	0.38 ***	0.37 ***	0.37 **	0.19
VO ₂ max (mL/min/kg)	0.09	0.08	0.19	0.13	0.18	0.15	0.09	0.25 *
Force maximale en demi-squat (kg)	0.37 **	0.29 *	0.42 ***	0.26 *	0.32 **	0.44 ***	0.37 ***	0.15
AP (h/semaine)	0.07	0.06	0.18	0.11	0.15	0.16	0.06	0.20
Sommeil (h/j)	0.13	0.11	0.04	0.15	0.18	0.21 *	0.07	-0.02
PSQI	0.12	0.15	0.14	0.19	0.15	0.21	0.16	0.16

IMC: Indice de masse corporelle; CMO CE: Contenu minéral osseux du corps entier; DMO CE: Densité minérale osseuse du corps entier; DMO HE: Densité minérale osseuse de la hanche entière; DMO CF: Densité minérale osseuse du col fémoral; CSA CF : Surface de la section transversale du col fémoral; Z CF: Module de section du col fémoral; TBS: Trabecular Bone Score; VO₂ max: Consommation maximale d'oxygène; AP: Activité physique; CCJ: Consommation Calcique Journalière; CPJ: Consommation Protéique Journalière; PSQI: Pittsburgh Sleep Quality Index; * p < 0.05; ** p < 0.01; *** p < 0.001.

2.3. Régressions linéaires multiples

La masse maigre était un meilleur déterminant positif du CMO CE, de la DMO CE, de la DMO HE, de la DMO CF, de la CSA CF, du Z CF que la force maximale en demi-squat. La force maximale était un meilleur déterminant positif de la DMO L1-L4 que la masse maigre.

Tableau 32 : Régressions linéaires multiples

Variable	Coefficient	ES	Valeur de p
Variable dépendante : CMO CE (g) ($r^2 = 0,56$)			
Constante	710,633	270,303	0,011
Masse maigre (g)	0,0356	0,00421	<0,001
Force maximale en demi-squat (kg)	2,436	0,793	0,003
Variable dépendante : DMO CE (g/cm ²) ($r^2 = 0,20$)			
Constante	0,786	0,120	<0,001
Masse maigre (g)	0,00000660	0,00000186	<0,001
Force maximale en demi-squat (kg)	0,000708	0,000351	0,047

Variable dépendante : DMO L1-L4 (g/cm ²) (r ² = 0,20)			
Constante	0,749	0,153	<0,001
Masse maigre (g)	0,00000494	0,00000238	0,042
Force maximale en demi-squat (kg)	0,00156	0,000449	<0,001
Variable dépendante : DMO HE (g/cm ²) (r ² = 0,16)			
Constante	0,593	0,157	<0,001
Masse maigre (g)	0,00000766	0,00000245	0,003
Force maximale en demi-squat (kg)	0,000826	0,000461	0,078
Variable dépendante : DMO CF (g/cm ²) (r ² = 0,18)			
Constante	0,634	0,146	<0,001
Masse maigre (g)	0,00000657	0,00000228	0,005
Force maximale en demi-squat (kg)	0,00106	0,000429	0,016
Variable dépendante : CSA CF (mm ²) (r ² = 0,39)			

Constante	51,632	24,758	0,041
Masse maigre (g)	0,00190	0,000385	<0,001
Force maximale en demi-squat (kg)	0,277	0,0726	<0,001
Variable dépendante : Z CF (mm ³) ($r^2 = 0,38$)			
Constante	-152,236	185,204	0,414
Masse maigre (g)	0,0152	0,00288	<0,001
Force maximale en demi-squat (kg)	1,692	0,543	0,003

2.4. Paramètres osseux ajustés

Après ajustement pour l'IMC, la DMO L1-L4, la DMO HE, la DMO CF étaient significativement supérieures chez les hommes sportifs en surpoids et obèses par rapport aux hommes sédentaires en surpoids et obèses ($p < 0,05$). Après ajustement pour le poids corporel, le CMO CE, la DMO L1-L4, la DMO HE, la DMO CF, la CSA CF et le Z CF étaient significativement supérieurs chez les hommes sportifs en surpoids et obèses par rapport aux hommes sédentaires en surpoids et obèses ($p < 0,05$). Après ajustement pour la masse maigre ou la VO_2 max (L/min), la DMO au niveau du rachis lombaire (L1-L4) était significativement supérieure chez les hommes sportifs en surpoids et obèses par rapport aux hommes sédentaires en surpoids et obèses ($p < 0,05$). Après ajustement pour la force maximale en demi-squat, il n'y avait pas des différences significatives entre les deux groupes au niveau des paramètres osseux.

Tableau 33 : Paramètres osseux ajustés pour l'IMC dans les deux groupes

	Hommes actifs en surpoids ou obèses (n = 37)	Hommes sédentaires en surpoids ou obèses (n = 45)
CMO CE (g)	3368 ± 61	3193 ± 55
DMO CE (g/cm ²)	1.317 ± 0.018	1.264 ± 0.017
DMO L1-L4 (g/cm ²)	1.28 ± 0.02 *	1.20 ± 0.02
DMO HE (g/cm ²)	1.22 ± 0.02 *	1.14 ± 0.02
DMO CF (g/cm ²)	1.21 ± 0.02 *	1.13 ± 0.02
CSA (mm ²)	212.9 ± 4.6	199.4 ± 4.2
Z (mm ³)	1056 ± 35.5	991 ± 32.2
TBS	1.375 ± 0.020	1.336 ± 0.018

CMO CE: Contenu minéral osseux du corps entier; DMO CE: Densité minérale osseuse du corps entier; DMO HE: Densité minérale osseuse de la hanche entière; DMO CF: Densité minérale osseuse du col fémoral; CSA CF: Surface de la section transversale du col fémoral; Z CF: Module de section du col fémoral; TBS: Trabecular Bone Score; * différences significatives entre les hommes actifs et les hommes sédentaires, $p < 0,05$.

Tableau 34 : Paramètres osseux ajustés pour le poids dans les deux groupes

	Hommes actifs en surpoids ou obèses (n = 37)	Hommes sédentaires en surpoids ou obèses (n = 45)
CMO CE (g)	3420 ± 54 **	3150 ± 49
DMO CE (g/cm ²)	1.318 ± 0.018	1.263 ± 0.017
DMO L1-L4 (g/cm ²)	1.294 ± 0.024 *	1.197 ± 0.022
DMO HE (g/cm ²)	1.225 ± 0.023 *	1.137 ± 0.021
DMO CF (g/cm ²)	1.215 ± 0.023 *	1.139 ± 0.021
CSA CF (mm ²)	215.1 ± 4.5 *	197.6 ± 4.1
Z CF (mm ³)	1087.6 ± 33.7 *	966.1 ± 30.6
TBS	1.368 ± 0.025	1.342 ± 0.018

CMO CE: Contenu minéral osseux du corps entier; DMO CE: Densité minérale osseuse du corps entier; DMO HE: Densité minérale osseuse de la hanche entière; DMO CF: Densité minérale osseuse du col fémoral; CSA CF: Surface de la section transversale du col fémoral; Z CF: Module de section du col fémoral; TBS: Trabecular Bone Score; * différences significatives entre les hommes actifs et les hommes sédentaires, $p < 0,05$.

Tableau 35 : Paramètres osseux ajustés pour la masse maigre dans les deux groupes

	Hommes actifs en surpoids ou obèses (n = 37)	Hommes sédentaires en surpoids ou obèses (n = 45)
CMO CE (g)	3321 ± 43	3231 ± 39
DMO CE (g/cm ²)	1.288 ± 0.019	1.286 ± 0.017
DMO L1-L4 (g/cm ²)	1.282 ± 0.024 *	1.213 ± 0.022
DMO HE (g/cm ²)	1.194 ± 0.024	1.164 ± 0.022
DMO CF (g/cm ²)	1.195 ± 0.023	1.157 ± 0.021
CSA CF (mm ²)	211.5 ± 4.1	200.8 ± 3.7
Z CF (mm ³)	1058.1 ± 29.7	985.2 ± 26.8
TBS	1.369 ± 0.019	1.347 ± 0.017

CMO CE: Contenu minéral osseux du corps entier; DMO CE: Densité minérale osseuse du corps entier; DMO HE: Densité minérale osseuse de la hanche entière; DMO CF: Densité minérale osseuse du col fémoral; CSA CF: Surface de la section transversale du col fémoral; Z CF: Module de section du col fémoral; TBS: Trabecular Bone Score; * différences significatives entre les hommes actifs et les hommes sédentaires, $p < 0,05$.

Tableau 36 : Paramètres osseux ajustés pour la force maximale en demi-squat dans les deux groupes

	Hommes actifs en surpoids ou obèses (n = 37)	Hommes sédentaires en surpoids ou obèses (n = 45)
CMO CE (g)	3219 ± 63	3339 ± 54
DMO CE (g/cm ²)	1.267 ± 0.021	1.315 ± 0.018
DMO L1-L4 (g/cm ²)	1.235 ± 0.024	1.254 ± 0.021
DMO HE (g/cm ²)	1.164 ± 0.026	1.195 ± 0.023
DMO CF (g/cm ²)	1.162 ± 0.024	1.193 ± 0.021
CSA CF (mm ²)	202.1 ± 4.5	210.1 ± 4.0
Z CF (mm ³)	997 ± 35	1047 ± 31
TBS	1.368 ± 0.022	1.349 ± 0.019

CMO CE: Contenu minéral osseux du corps entier; DMO CE: Densité minérale osseuse du corps entier; DMO HE: Densité minérale osseuse de la hanche entière; DMO CF: Densité minérale osseuse du col fémoral; CSA CF: Surface de la section transversale du col fémoral; Z CF: Module de section du col fémoral; TBS: Trabecular Bone Score.

3. Discussion

Cette étude menée chez de jeunes hommes en surpoids et obèses montre principalement que la force maximale en demi-squat, la masse maigre et la VO_2 max (L/min) sont positivement corrélées à plusieurs variables osseuses (CMO, DMO et indices géométriques de résistance osseuse du col fémoral) et qu'après ajustement pour le poids corporel, les hommes sportifs en surpoids ou obèses ont des valeurs de CMO CE, de DMO L1-L4 et de DMO HE supérieures à celles retrouvées chez les hommes sédentaires en surpoids ou obèses. A notre connaissance, c'est la première étude qui retrouve des différences significatives au niveau des variables osseuses entre les hommes sportifs en surpoids ou obèses et les hommes sédentaires en surpoids ou obèses et par conséquent renforce l'idée qu'il faille améliorer le niveau de performance physique chez les jeunes hommes en surpoids et obèses afin d'augmenter la masse osseuse.

Le poids, l'IMC, la masse grasse et le pourcentage de masse grasse étaient inférieurs dans le groupe de sportifs par rapport au groupe sédentaire. Pour cela, nous avons ajusté les variables osseuses au poids corporel et à l'IMC lorsque nous avons comparé les deux groupes. Après ajustement pour l'IMC, la DMO L1-L4, la DMO HE et la DMO CF étaient significativement supérieures chez les hommes actifs en surpoids ou obèses par rapport aux hommes sédentaires en surpoids ou obèses. Après ajustement pour le poids corporel, le CMO CE, la DMO L1-L4, la DMO HE, la DMO CF, la CSA F et le Z CF étaient significativement supérieurs chez les hommes actifs en surpoids ou obèses par rapport aux hommes sédentaires en surpoids ou obèses. Ces résultats soulignent donc l'importance d'être physiquement actif sur les paramètres osseux chez les hommes en surpoids ou obèses. Après ajustement pour la force maximale en demi-squat, il n'y avait aucune différence entre les deux groupes au niveau des paramètres osseux. En parallèle, la force maximale en demi-squat était positivement corrélée au CMO, à la DMO et aux indices géométriques de résistance osseuse du col fémoral. La force maximale en demi-squat était un meilleur déterminant positif de la DMO L1-L4 que la masse maigre. Ce résultat souligne l'importance d'augmenter la force musculaire des membres inférieurs pour la prévention de l'ostéoporose. Les mécanismes par lesquels la force musculaire influence les paramètres osseux ont été décrits dans une étude antécédente (El Khoury et coll. 2016a). Après ajustement pour la masse maigre ou la VO_2 max (L/min), seule la DMO au niveau du rachis lombaire était supérieure dans le groupe sportif par rapport au groupe sédentaire alors que tous les autres

paramètres n'étaient pas significativement différents entre les deux groupes. Dans l'ensemble de l'échantillon ($n = 82$), la masse maigre était positivement corrélée au CMO, à la DMO et aux indices géométriques de résistance osseuse du col fémoral. En se basant sur nos résultats et ceux d'autres études menées chez des hommes normo-pondérés et en surpoids ou obèses, il apparaît que la masse maigre est un déterminant positif des variables osseuses chez les hommes normo-pondérés, en surpoids et obèses.

La masse grasse et le pourcentage de masse grasse n'étaient pas positivement corrélés aux variables osseuses dans l'ensemble de l'échantillon. Ce résultat suggère que la relation entre l'adiposité et les variables osseuses chez les hommes est influencée par le statut pondéral de la population étudiée.

La VO_2 max (L/min) était un déterminant positif de la DMO. Ce résultat est en accord avec celui d'une autre étude menée chez de jeunes adultes (El Hage et coll. 2014c). L'augmentation de la VO_2 max (L/min) pourrait aider à prévenir l'ostéopénie et l'ostéoporose plus tard dans la vie.

La VO_2 max (ml/min/kg) était positivement corrélée au TBS mais pas à la DMO. Ce résultat confirme celui d'une étude antérieure menée chez 52 hommes en surpoids et obèses (El Khoury et coll. 2016a). De plus, une étude antécédente a déjà montré que la VO_2 max (ml/min/kg) est un déterminant positif du TBS chez les femmes non obèses (Zakhem et coll. 2015). La VO_2 max (ml/min/kg) semble donc être positivement corrélée au TBS chez les sujets obèses et non obèses. Les mécanismes qui peuvent expliquer l'association positive entre la VO_2 max (ml/min/kg) et le TBS peuvent être médiés par l'IMC et/ou l'augmentation de la capillarisation du tissu osseux.

La consommation calcique journalière était positivement corrélée au CMO CE, à la DMO CE, à la DMO HE et à la CSA CF tandis que la consommation protéique journalière était positivement corrélée au CMO CE et à la DMO CE. Les mécanismes par lesquels ces apports influencent les variables osseuses ont été décrits par Bonjour et coll. (2007).

La durée de sommeil était positivement corrélée à la CSA CF. De futures études seront nécessaires afin de mieux comprendre la relation complexe entre le sommeil et les paramètres osseux.

Cette étude présente plusieurs limites. La nature transversale de l'étude est une limite car elle ne permet pas d'évaluer les facteurs confondants. De plus, il existe des difficultés et des limites concernant l'évaluation des apports nutritionnels et le niveau d'activité physique chez les sujets obèses. La troisième limite est la nature 2D de la DXA. La masse grasse viscérale et la masse grasse sous-cutanée ont des effets différents sur la structure osseuse alors que la DXA ne permet pas de différencier ces deux types de masse grasse. Enfin, la qualité des scans densitométriques tend à se détériorer chez les sujets obèses. Néanmoins, à notre connaissance, c'est la première étude à explorer les différences au niveau des paramètres osseux entre les hommes actifs en surpoids ou obèses et les hommes sédentaires en surpoids ou obèses. Notre étude a surtout permis de définir un nouveau déterminant des variables osseuses chez les hommes en surpoids et obèses qu'est la force maximale en demi-squat.

En conclusion, notre étude montre que les hommes actifs en surpoids ou obèses ont des valeurs de CMO et de DMO supérieures aux hommes sédentaires en surpoids ou obèses après ajustement pour le poids corporel. De plus, cette étude montre que la force maximale des membres inférieurs, la masse maigre et la VO_2 max (L/min) sont positivement corrélés aux variables osseuses dans cette population. Par conséquent, la mise en place de stratégies visant à augmenter la masse maigre, la force maximale des membres inférieurs et la VO_2 max (L/min) chez les jeunes hommes en surpoids et obèses peut être très utile pour la prévention des fractures ostéoporotiques plus tard dans la vie. Ainsi, notre étude a des applications cliniques dans le domaine de la prévention des fractures ostéoporotiques chez les hommes en surpoids ou obèses.

3c. Etude de corrélation entre la consommation maximale d'oxygène et les indices de résistance osseuse du col fémoral chez des jeunes hommes en surpoids et obèses

1. Titre de l'étude

Relations entre la consommation maximale d'oxygène et les indices de résistance osseuse du col fémoral chez des jeunes hommes en surpoids et obèses.

2. Objectif de l'étude

Les indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI) sont prédictifs des fractures ostéoporotiques chez les personnes âgées (Karamangla et coll. 2004; Faulkner et coll. 2006; Li et coll. 2013). Chez les jeunes hommes adultes, l'obésité et le surpoids sont associés à une diminution de ces indices (El Khoury et coll. 2016a). D'autre part, plusieurs études ont déjà montré que l'obésité et le surpoids sont également associés à une diminution des valeurs de consommation maximale d'oxygène (ml/mn/kg) (Ouyang et coll. 2004). La VO_2 max est un excellent déterminant de la performance dans les épreuves d'endurance (Hagan et coll. 1981 ; Wiswell et coll. 2000). Cependant, la relation entre la consommation maximale d'oxygène (ml/mn/kg) et les paramètres osseux reste peu élucidée. El khoury et coll. (2016a) ont montré que la VO_2 max (ml/mn/kg) est positivement corrélée au TBS dans un groupe de jeunes hommes en surpoids et obèses. En revanche, El Hage et coll. (2014c) ont montré que la VO_2 max est positivement corrélée au CMO et à la DMO chez les jeunes femmes mais pas chez les jeunes hommes. Il semblerait que la relation entre la VO_2 max (ml/mn/kg) et les paramètres osseux soit spécifique du genre et du statut pondéral de la population étudiée ainsi que de la variable osseuse mesurée (El Hage et coll. 2014c). L'objectif de cette étude était d'explorer les relations entre la consommation maximale d'oxygène et les indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI) chez des jeunes hommes en surpoids et obèses.

3. Matériel et méthodes

3.1. Sujets et design de l'étude

73 jeunes hommes (âgés de 18 à 35 ans) de nationalité Libanaise ont participé à cette étude. Ces jeunes hommes avaient tous un IMC $> 25 \text{ kg/m}^2$. Les sujets ont été recrutés dans trois Universités privées situées dans la région Nord du Liban. Les sujets étaient tous non-fumeurs et n'avaient reçu aucun traitement hormonal ni vitaminique susceptible de modifier leur statut osseux. Ils n'avaient pas non plus d'antécédent de maladie métabolique ou osseuse et n'avaient jamais subi d'immobilisation prolongée. Le consentement éclairé des participants a été obtenu. Ce protocole a reçu l'approbation du comité d'éthique de l'Université de Balamand.

3.2. Mesures

Le poids et la taille ont été mesurés, et l'indice de masse corporelle (IMC) a été calculé. La composition corporelle, le contenu minéral osseux (CMO) et la densité minérale osseuse (DMO) ont été mesurés par DXA (GE-Lunar, iDXA). La DMO a été mesurée au niveau du corps entier (CE), de la hanche entière (HE) et du col fémoral (CF). Les indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI) ont été calculés comme précédemment décrit par Karlamangla et coll. (2004). Les coefficients de variation des mesures de composition corporelle (masse maigre et masse grasse) et de DMO sont inférieurs à 1% dans notre centre. Nous avons mesuré directement la consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_2 \text{ max}$ en L/min) en utilisant un système spécialisé (Cosmed Fitmate, version 2.20) lors d'un test triangulaire sur bicyclette ergométrique (Siemens-Elema RE 820; RodbyElektronik AB, Enhorna, Sweden).

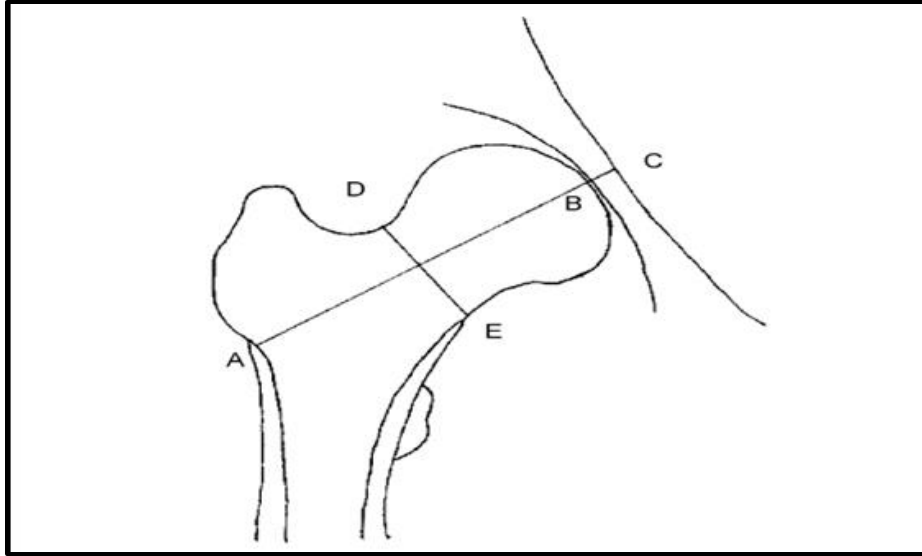


Figure 43 : Géométrie osseuse du col fémoral. AC représente la longueur de l'axe de la hanche alors que DE représente la largeur du col fémoral (Karlamañla et coll. 2004)

Tableau 37 : Calcul des indices de résistance du col fémoral

	Nom de l'indice	Formule
CSI (g/kg-m)	Indice de force en compression	$(\text{DMO CF} * \text{largeur CF}) / \text{poids}$
BSI (g/kg-m)	Indice de force en flexion	$(\text{DMO CF} * \text{largeur CF}^2) / (\text{longueur de l'axe de la hanche} * \text{poids})$
ISI (g/kg-m)	Indice de force aux contraintes	$(\text{DMO CF} * \text{Largeur CF} * \text{longueur de l'axe de la hanche}) / (\text{taille} * \text{poids})$

(Karlamañla et coll. 2004)

3.3. Analyse statistique

Les données sont exprimées en moyenne $\pm$ la déviation standard (DS). La significativité et l'existence d'éventuelles corrélations ont été précisées par une analyse en régression linéaire

simple (mesure du coefficient de corrélation de Pearson). Des régressions linéaires multiples ont été utilisées afin d'explorer les importances relatives de l'IMC et de la VO₂ max sur les indices de résistance du col fémoral (CSI, BSI et ISI). Les analyses statistiques ont été effectuées par le logiciel Number Cruncher Statistical System (NCSS, 2001). Une valeur de $p < 0,05$ était exigée afin d'affirmer le caractère significatif des résultats.

4. Résultats

4.1. Caractéristiques de la population étudiée

L'âge, le poids, la taille, l'IMC, la masse maigre, la masse grasse, le CMO CE, la DMO HE, la DMO CF, les indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI) et la VO₂ max de la population étudiée apparaissent dans le tableau suivant.

Tableau 38 : Caractéristiques cliniques et paramètres osseux de la population étudiée

	Moyenne $\pm$ déviation standard
Age (ans)	23,6 $\pm$ 4,8
Poids (kg)	99,9 $\pm$ 16,9
Taille (cm)	177,0 $\pm$ 6,7
IMC (kg/m ²)	31,9 $\pm$ 5,3
Masse maigre (kg)	63,987 $\pm$ 6,975
Masse grasse (kg)	32,638 $\pm$ 11,978
Masse grasse (%)	32,6 $\pm$ 7,7
CMO CE (g)	3275 $\pm$ 374
DMO HE (g/cm ²)	1,185 $\pm$ 0,151
DMO CF (g/cm ²)	1,182 $\pm$ 0,150
CSI CF (g/kg-m)	4,410 $\pm$ 0,789
BSI CF (g/kg-m)	1,367 $\pm$ 0,351
ISI CF (g/kg-m)	0,092 $\pm$ 0,018
Activité physique (h/sem)	6,2 $\pm$ 5,2
VO ₂ max (ml/mn/kg)	37,3 $\pm$ 6,9

IMC; Indice de Masse Corporelle; CMO CE: Contenu Minéral Osseux du Corps Entier; DMO HE: Densité Minérale Osseuse de la Hanche Entière; DMO CF: Densité Minérale Osseuse du Col Fémoral; CSI CF: Indice de force en compression du col fémoral; BSI CF: Indice de force en flexion du col fémoral; ISI CF: Indice de force aux contraintes du col fémoral; VO₂ max: Consommation maximale d'oxygène.

4.2. Corrélations entre la VO₂ max (ml/mn/kg) et les paramètres osseux

La VO₂ max (ml/mn/kg) était positivement corrélée au CSI CF ($r = 0,51$; $p < 0,001$), au BSI ($r = 0,28$; $p < 0,05$) et à l'ISI ($r = 0,48$; $p < 0,001$). Les corrélations positives entre la VO₂ max

(ml/mn/kg) et deux de ces indices (CSI et ISI) sont restées significatives après ajustement pour l'IMC.

Tableau 39 : Corrélations entre la VO₂ max et les différents paramètres de la population étudiée

	VO ₂ max (ml/mn/kg)	
	Valeur de r	Valeur de p
Poids (kg)	-0,57	< 0,001
IMC (kg/m ²)	-0,59	< 0,001
Masse maigre (kg)	-0,15	= 0,21
Masse grasse (kg)	-0,52	< 0,001
Masse grasse (%)	-0,59	< 0,001
CMO CE (g)	0,09	0,42
DMO HE (g/cm ²)	0,13	= 0,24
DMO CF (g/cm ²)	0,18	= 0,11
CSI CF (g/kg-m)	0,51	< 0,001
BSI CF (g/kg-m)	0,28	< 0,05
ISI CF (g/kg-m)	0,48	< 0,001

IMC; Indice de Masse Corporelle; CMO CE: Contenu Minéral Osseux du Corps Entier; DMO HE: Densité Minérale Osseuse de la Hanche Entière; DMO CF: Densité Minérale Osseuse du Col Fémoral; CSI CF: Indice de force en compression du col fémoral; BSI CF: Indice de force en

flexion du col fémoral; ISI CF: Indice de force aux contraintes du col fémoral; VO₂ max: Consommation maximale d'oxygène.

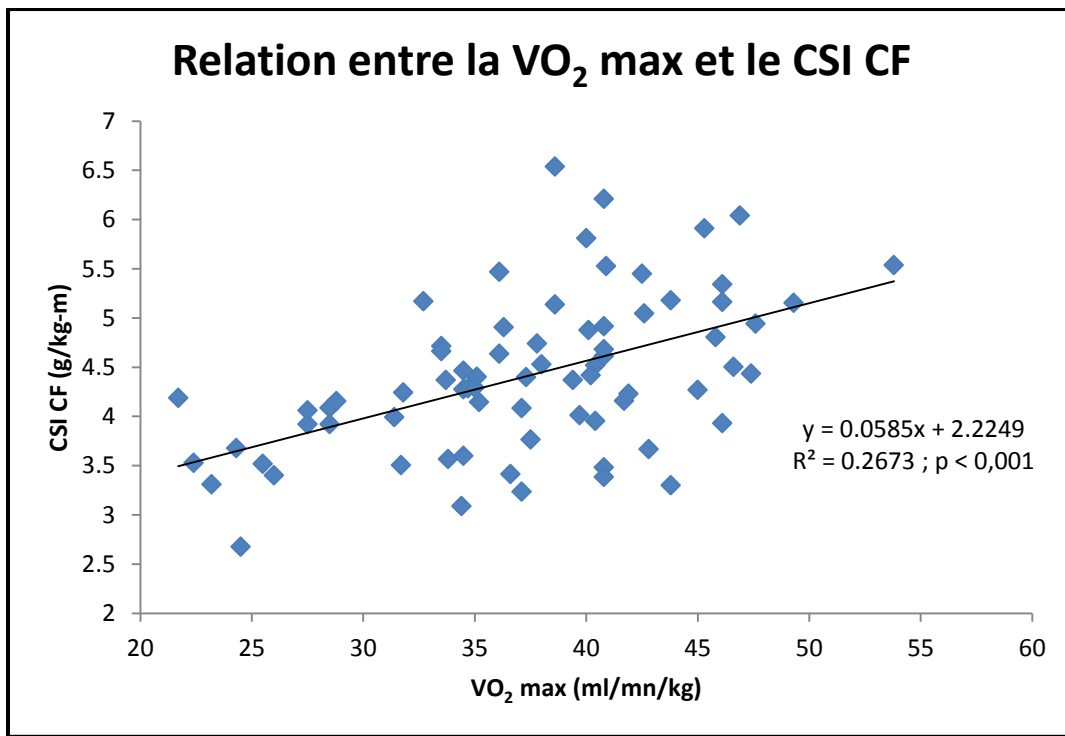


Figure 44: Relation entre la consommation maximale d'oxygène et le CSI du col fémoral

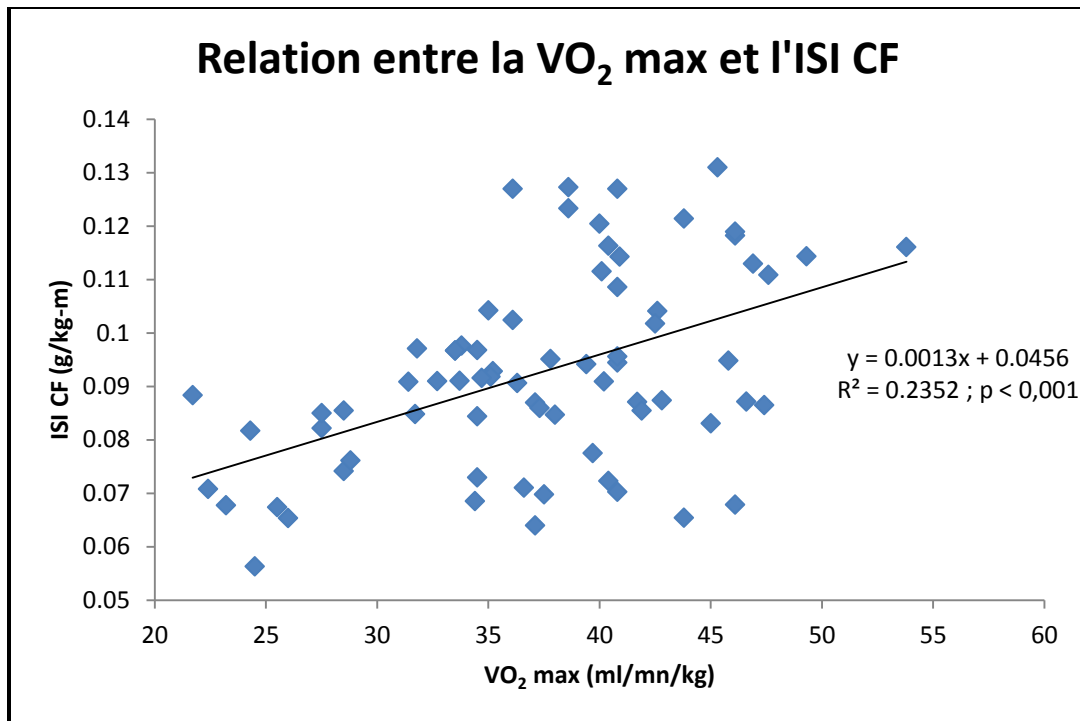


Figure 45: Relation entre consommation maximale d'oxygène et l'ISI du col fémoral

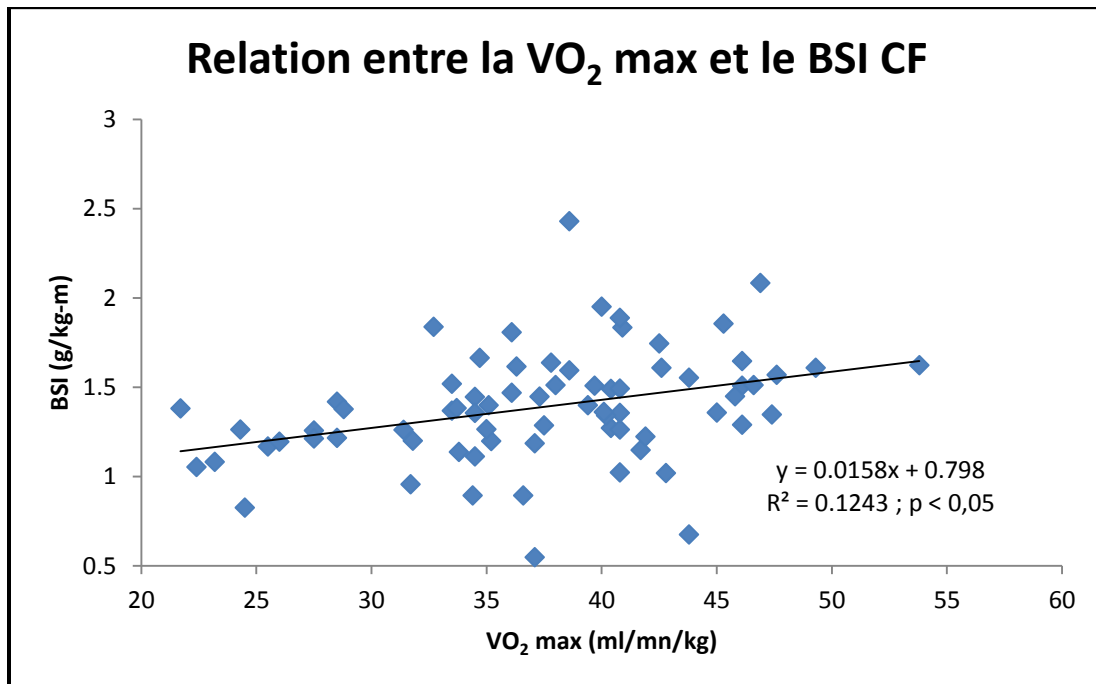


Figure 46: Relation entre consommation maximale d'oxygène et le BSI du col fémoral

Tableau 40 : Régressions linéaires multiples

Variable dépendante: CSI CF ($r^2 = 0,34$)				
	Coefficient	SE	Valeur de T	Valeur de p
VO ₂ max (ml/mn/kg)	0,036	0,013	2,65	0,01
IMC (kg/m ²)	-0,049	0,017	-2,77	0,007
Variable dépendante : BSI CF ($r^2 = 0,13$)				
VO ₂ max (ml/mn/kg)	0,006	0,006	0,86	0,39
IMC (kg/m ²)	-0,018	0,009	-2,02	0,04
Variable dépendante : ISI CF ($r^2 = 0,28$)				
VO ₂ max (ml/mn/kg)	0,0008	0,0003	2,54	0,01
IMC (kg/m ²)	-0,0009	0,0004	-2,18	0,03

CSI CF: Indice de force en compression du col fémoral ; BSI CF: Indice de force en flexion du col fémoral; ISI CF: Indice de force aux contraintes du col fémoral; IMC; Indice de Masse Corporelle; VO₂ max: Consommation maximale d'oxygène.

4.4. Corrélations entre le volume hebdomadaire d'activité physique et les paramètres osseux

Le volume hebdomadaire d'activité physique était positivement corrélé au CSI CF ($r = 0,43$; $p < 0,001$), au BSI CF ($r = 0,32$; $p = 0,004$) et à l'ISI CF ($r = 0,34$; $p = 0,002$).

Tableau 41 : Corrélations entre le volume hebdomadaire d'activité physique et les différents paramètres de la population étudiée

	Volume hebdomadaire d'AP (h/sem)	
	Valeur de r	Valeur de p
CMO CE (g)	0,13	= 0,26
DMO HE (g/cm ²)	0,13	= 0,24
DMO CF (g/cm ²)	0,15	= 0,19
CSI CF (g/kg-m)	0,43	= 0,0001
BSI CF (g/kg-m)	0,32	= 0,004
ISI CF (g/kg-m)	0,34	= 0,002

CMO CE: Contenu Minéral Osseux du Corps Entier; DMO HE: Densité Minérale Osseuse de la Hanche Entière; DMO CF: Densité Minérale Osseuse du Col Fémoral; CSI CF: Indice de force en compression du Col Fémoral ; BSI CF: Indice de force en flexion du Col Fémoral; ISI CF: Indice de force aux contraintes du Col Fémoral.

4.5. Corrélations entre les caractéristiques anthropométriques et les paramètres osseux

Le poids, l'IMC et le pourcentage de masse grasse étaient négativement corrélés au CSI, au BSI et à l'ISI.

Tableau 42 : Corrélations entre les caractéristiques anthropométriques et les paramètres osseux

	CMO CE (g)	DMO HE (g/cm ²)	DMO CF (g/cm ²)	CSI CF (g/kg-m)	BSI CF (g/kg-m)	ISI CF (g/kg-m)
Poids (kg)	0,37 **	0,25 *	0,16	-0,55 ***	-0,40 ***	-0,33 **
Taille (cm)	0,43 ***	0,08	0,01	-0,10	-0,15	0,29 *
IMC (kg/m ²)	0,18	0,22	0,16	-0,52 ***	-0,35 **	-0,46 ***
Masse maigre (kg)	0,70 ***	0,18	0,19	-0,05	-0,09	0,05
Masse grasse (kg)	0,02	-0,02	-0,03	-0,24 *	-0,06	-0,19
Masse grasse (%)	-0,13	-0,00	-0,10	-0,58 ***	-0,40 ***	-0,54 ***

CMO CE: Contenu Minéral Osseux du Corps Entier; DMO HE: Densité Minérale Osseuse de la Hanche Entière; DMO CF: Densité Minérale Osseuse du Col Fémoral; CSI CF: Indice de force en compression du Col Fémoral; BSI CF: Indice de force en flexion du Col Fémoral; ISI CF: Indice de force aux contraintes du Col Fémoral; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.

5. Discussion et conclusion

Cette étude menée chez 73 jeunes hommes en surpoids et obèses montre principalement que la VO_2 max (ml/mn/kg) est positivement corrélée aux indices de résistance osseuse du col fémoral (le CSI, le BSI et l'ISI).

Les corrélations entre la VO_2 max (ml/mn/kg) et deux indices calculés (le CSI et l'ISI) sont restées significatives même après ajustement pour l'IMC. Ces résultats suggèrent une relation indépendante entre la VO_2 max (ml/mn/kg) et ces deux indices.

Plusieurs études ont démontré un lien étroit entre la VO_2 max absolue (L/mn) et la DMO (Ayoub et coll. 2016; El Hage et coll. 2014c; Pocock et coll. 1986; Zunquin et coll. 2016). Cependant, la relation entre la VO_2 max (ml/mn/kg) et les paramètres osseux n'est pas totalement élucidée. En pratique, il apparaît que cette relation est influencée par le sexe et le statut pondéral de la population étudiée ainsi que par la nature de la variable osseuse mesurée ou calculée (El Hage et coll. 2014; El Khoury et coll. 2016a). Chez des hommes en surpoids et obèses, la VO_2 max (ml/mn/kg) est corrélée positivement au TBS mais pas à la DMO (El Khoury et coll. 2016a). D'autre part, la VO_2 max (ml/mn/kg) est positivement corrélée à la DMO et aux indices géométriques de résistance osseuse du col fémoral (surface de la section transversale et module de section) chez de jeunes femmes normo-pondérées (El Hage et coll. 2014c).

Le poids, l'IMC et le pourcentage de masse grasse étaient négativement corrélés au CSI, au BSI et à l'ISI. Ces résultats sont en accord avec ceux de l'étude MrOS qui a démontré que le risque fracturaire est augmenté au niveau de plusieurs sites osseux chez les hommes obèses (Cauley et coll. 2016; Nielson et coll. 2011).

Dans notre étude, le volume hebdomadaire d'activité physique était positivement corrélé au CSI, au BSI et à l'ISI. C'est la première étude à démontrer des corrélations positives entre le volume hebdomadaire d'activité physique et ces indices osseux.

En conclusion, cette étude est la première à démontrer une relation positive entre la VO_2 max (ml/mn/kg) et les indices de résistance osseuse du col fémoral (le CSI, le BSI et l'ISI) chez les

jeunes hommes en surpoids et obèses. L'augmentation de la VO_2 max chez les hommes en surpoids et obèses pourrait donc aider à réduire les fractures ostéoporotiques.

Discussion générale

Cette thèse avait pour objectif principal d'explorer les relations entre le niveau d'activité physique, le niveau de performance physique et les paramètres osseux (CMO, DMO, CSA, Z, CSI, BSI, ISI et TBS) chez de jeunes hommes en surpoids et obèses.

Afin de mieux introduire cet objectif, deux séries d'études préliminaires ont été menées. La première série avait pour objectif d'explorer les relations entre les niveaux de performance physique et les paramètres osseux. Ces premières études ont permis d'identifier des paramètres de performance physique corrélables aux variables osseuses. La force maximale en demi-squat était le paramètre physique le plus corrélé à la DMO. Notons que la corrélation entre la performance obtenue au test qui exprime la force maximale (demi-squat) et la DMO était, de manière générale, plus forte que les corrélations retrouvées entre les performances aux tests de puissance relative (détente verticale, détente horizontale, triple bonds et 5 sauts) et la DMO. De plus, il y avait des différences inter-sexes au niveau des relations entre les performances obtenues dans les tests physiques et la DMO. En effet, les performances obtenues aux tests de puissance musculaire relative étaient corrélées positivement à la DMO de la hanche chez les femmes mais pas chez les hommes. Dans notre étude, l'IMC était significativement plus élevé chez les hommes que chez les femmes. Un homme avec un IMC élevé peut avoir une force maximale élevée et une puissance absolue élevée mais une puissance relative faible étant donné son poids élevé. Ceci pourrait expliquer le manque de corrélations entre la plupart des performances obtenues aux tests qui expriment la puissance relative (détente verticale, détente horizontale, triple bonds et 5 sauts) et la DMO chez les hommes. Au contraire, la plupart des femmes étaient normo-pondérées; ainsi, une femme qui a une force maximale élevée va avoir une puissance relative au corps élevée. Ceci explique les corrélations significatives entre la majorité des performances obtenues aux tests qui expriment une puissance musculaire relative (détente verticale, détente horizontale, triple bonds et 5 sauts) et la DMO chez les femmes. D'autre part, la première série d'études a également exploré l'influence du type de pratique physique sur les paramètres osseux. Les valeurs de DMO, de TBS (L1-L4) et des paramètres géométriques du col fémoral (CSA, CSMI et Z) sont significativement plus élevées dans les deux

groupes de jeunes hommes sportifs (rugby et foot-basket) que chez les sédentaires. La pratique des sports collectifs à impacts biomécaniques élevés comme le football, le basketball et le rugby qui impliquent un nombre important de sauts, d'atterrissages, de changements de direction, de démarrages et d'arrêts, pourrait influencer positivement la masse osseuse, la géométrie osseuse et la microarchitecture osseuse. En particulier, le rugby semble avoir des actions (contact, conflit, soulevé de terre, taclé) susceptibles d'exercer des effets positifs sur la masse osseuse et la qualité osseuse du rachis lombaire. L'étude 1c est l'une des rares études qui a permis d'observer des valeurs élevées de TBS chez des joueurs du rugby. Des études contrôlées randomisées couplées à d'autres études ayant des méthodologies plus élaborées seraient nécessaires pour confirmer nos observations.

La deuxième série d'études avait pour objectif d'explorer l'influence du statut pondéral sur le CMO, la DMO et le TBS chez les jeunes adultes. Dans cette série, le poids, l'IMC et la masse maigre étaient positivement corrélés au CMO et à la DMO dans les deux sexes. La masse grasse était positivement corrélée au CMO et à la DMO chez les femmes mais pas chez les hommes. Ces résultats sont en accord avec ceux de notre première série d'étude dans laquelle la masse grasse était positivement corrélée à la BUA chez les jeunes femmes mais pas chez les jeunes hommes. L'obésité et le surpoids sont donc associés à des valeurs de DMO plus élevées pour les deux sexes. Les mécanismes par lesquels l'obésité et le surpoids influencent le métabolisme osseux ont déjà été évoqués par plusieurs auteurs et incluent des mécanismes mécaniques (le poids, les contraintes mécaniques, la relation os-muscle), hormonaux (hormones sexuelles, GH, IGF-1, insuline, leptine, adiponectine...), et d'autres en relation avec le sommeil, la vitamine D et les cytokines inflammatoires (Compston, 2015; Compston, 2013; Premaor et coll. 2014; Reid, 2010). Le TBS n'est pas positivement influencé par la surcharge pondérale; le poids et le pourcentage de masse grasse étaient négativement corrélés au TBS chez les hommes. Ainsi, le TBS et la DMO ne semblent pas avoir les mêmes déterminants positifs. Ceci n'est pas surprenant dans la mesure où ces deux paramètres ne reflètent pas les mêmes propriétés osseuses.

La deuxième série d'études a montré que la VO_2 max (L/min) est un déterminant important de la DMO pour les deux sexes. La VO_2 max (L/min) était également corrélé positivement au TBS

chez les femmes. En se basant sur nos résultats, il semble que la maximisation de la VO_2 max (L/min) pendant l'âge adulte pourrait aider à prévenir l'ostéoporose plus tard dans la vie.

La troisième série d'études constitue le cœur de cette thèse qui s'articule autour des relations entre le niveau d'activité physique, le niveau de performance physique et les paramètres osseux chez de jeunes hommes en surpoids et obèses. L'étude 3a a montré que le CMO CE, la DMO CE, la DMO L1-L4, la DMO CF et la CSA CF étaient significativement supérieurs chez les hommes sportifs en surcharge pondérale par rapport aux hommes sédentaires en surcharge pondérale. En parallèle, dans la population entière ($n = 40$), le volume hebdomadaire d'activité physique était positivement corrélé à la plupart des paramètres osseux mesurés dans cette étude (CMO CE, DMO CE, DMO L1-L4, DMO HE, DMO CF et CSA CF). Ces résultats suggèrent donc une influence positive de la pratique d'activité physique sur les paramètres osseux des hommes en surcharge pondérale. Après ajustement pour le volume hebdomadaire d'activité physique (analyse de covariance), les différences significatives disparaissent entre les deux groupes au niveau de tous les paramètres osseux. Ces résultats renforcent l'hypothèse d'un lien de causalité entre la pratique d'activités physiques et l'augmentation de la DMO chez les hommes en surcharge pondérale. D'un point de vue théorique, les hommes en surcharge pondérale sportifs se différencient de ceux en surcharge pondérale sédentaires au niveau de plusieurs paramètres qui influencent les paramètres osseux ; une masse maigre plus importante, une meilleure qualité de sommeil, une masse grasse viscérale moins importante et une concentration sérique plus élevée en vitamine D. De plus, nos résultats sont en accord avec ceux de deux études longitudinales montrant des effets bénéfiques de l'entraînement physique sur la minéralisation osseuse des sujets obèses (Shah et coll. 2011; Campos et coll. 2014).

La masse maigre était positivement corrélée au CMO CE, à la CSA CF et au Z CF. Ces résultats sont en accord avec ceux de plusieurs études précédentes et ceux obtenus dans nos deux premières séries d'études. Nos résultats confirment la forte corrélation existant entre la masse maigre et la DMO chez les hommes en surpoids et obèses (El Khoury et coll. 2016a).

La concentration sérique en vitamine D était positivement corrélée au CMO CE et à la DMO L1-L4. Les actions bénéfiques de la vitamine D sur la santé osseuse sont bien connues et notre étude est parmi les rares études à retrouver des corrélations positives entre la concentration sérique en vitamine D et la masse osseuse chez les hommes en surpoids et obèses.

L'étude 3b a montré qu'après ajustement pour le poids, le CMO CE, la DMO L1-L4, la DMO HE, la DMO CF, la CSA F et le Z CF étaient significativement supérieurs chez les hommes actifs en surpoids ou obèses par rapport aux hommes sédentaires en surpoids ou obèses. Ce résultat est en accord avec celui de l'étude 3a. Ces résultats soulignent donc l'importance de l'activité physique sur les paramètres osseux chez les hommes en surpoids ou obèses. Cette étude a aussi montré que la VO_2 max (L/min) était un déterminant positif de la DMO chez les jeunes hommes en surpoids et obèses. Ce résultat est en accord avec celui obtenu dans notre première série d'études. La VO_2 max (ml/min/kg) était positivement corrélée au TBS. L'augmentation de la consommation maximale d'oxygène a donc des effets positifs sur la santé osseuse des hommes en surpoids et obèses et doit faire partie d'une stratégie à long terme visant à prévenir l'ostéoporose.

La force maximale en demi-squat était aussi positivement corrélée à la DMO. L'augmentation de la force maximale aurait donc des effets positifs sur la DMO des hommes en surpoids et obèses. Ce résultat renforce celui obtenu dans notre première série d'études. Au contraire, le pourcentage de masse grasse n'était pas corrélé aux paramètres osseux dans l'étude 2b et était négativement corrélé au CMO CE dans l'étude 2a. L'augmentation de la masse grasse chez l'homme peut avoir des influences négatives sur la sécrétion de la testostérone alors que les taux sériques d'IGF-1 sont davantage liés à la masse grasse viscérale. Globalement, la relation entre l'adiposité et les paramètres osseux (en particulier la DMO) est plus forte chez les femmes que chez les hommes, n'est certainement pas linéaire et dépend également du statut pondéral de la population étudiée.

Les études 3a et 3b ont montré des corrélations positives entre la consommation calcique journalière et les paramètres osseux. L'étude 3b a montré aussi que la consommation protéique journalière était corrélée à certains paramètres osseux. Les mécanismes par lesquels ces nutriments influencent les paramètres osseux ont été précédemment décrits par Rizzoli (2008).

Notre étude est parmi les rares études à retrouver de telles corrélations chez les hommes en surpoids et obèses.

L'étude 3c s'est intéressée principalement à explorer les corrélations entre la consommation maximale d'oxygène et les indices de résistance osseuse du col fémoral (CSI, BSI et ISI) calculés selon la méthode de Karlamangla et coll. (2004). Ces indices sont cliniquement importants dans la mesure où ils sont prédictifs du risque fracturaire. A notre connaissance, cette étude est l'une des rares études à s'intéresser à ces indices osseux chez les jeunes hommes en surpoids et obèses et la première à explorer les corrélations entre la consommation maximale d'oxygène (ml/min/kg) et ces indices chez les jeunes hommes en surpoids et obèses. La VO_2 max (ml/min/kg) était positivement corrélée à ces indices et les corrélations entre la VO_2 max (ml/min/kg) et deux indices calculés (le CSI et l'ISI) sont restées significatives même après ajustement pour l'IMC. Ces résultats suggèrent une relation indépendante entre la VO_2 max (ml/min/kg) et ces deux indices.

Le volume hebdomadaire d'activité physique était positivement corrélé à ces trois indices. Ce résultat est en accord avec celui de l'étude 3a. Cependant, ces corrélations disparaissaient après ajustement pour l'IMC. Globalement, cette étude suggère que l'augmentation de la VO_2 max (ml/min/kg) chez les hommes en surpoids et obèses pourrait donc aider à réduire les fractures ostéoporotiques dans la mesure où les indices osseux calculés sont prédictifs du risque fracturaire chez les personnes âgées.

Notre thèse a plusieurs limites. Premièrement, la nature transversale des différentes études est une limite car elle ne permet pas d'affirmer une relation de causalité entre les paramètres de performance physique (force maximale en demi-squat, consommation maximale d'oxygène) et la DMO. Deuxièmement, les mesures densitométriques sont de nature 2-D or la vraie nature de l'os est tridimensionnelle. Troisièmement, le manque de mesure de nombreux paramètres prédictifs de la DMO tels que les marqueurs de formation osseuse et les concentrations sanguines des différentes hormones (hormones sexuelles, GH, IGF-1, insuline, leptine, PTH...) régulant la masse osseuse est une limite. La non-distinction entre la masse grasse viscérale et la masse grasse sous-cutanée constitue une autre limite. Ces deux types de masse grasse ont des effets différents sur la masse osseuse et sont influencées par le sexe, l'âge et le statut pondéral (Gilsanz

et coll. 2009). Dernièrement, le manque d'informations objectives sur le passé d'obésité/surpoids des sujets constitue une limite dans la mesure où ce facteur influence les paramètres osseux (Uusi-Rasi et coll. 2010). Malgré toutes ces limites, cette thèse est la première à notre connaissance à explorer les corrélations entre les niveaux de performance physique et les paramètres osseux chez de jeunes hommes en surpoids et obèses, et suggère une bonne adaptation du tissu osseux à la pratique d'activités physiques dans cette population. Nos résultats ont des applications pratiques dans le domaine de la prévention de l'ostéoporose.

Conclusions et perspective

Cette thèse menée chez des jeunes hommes en surpoids et obèses montre principalement que:

- Le CMO CE, la DMO CE, la DMO L1-L4, la DMO CF et la CSA CF sont significativement supérieurs chez les sujets sportifs par rapport aux sujets sédentaires;
- La masse maigre, la force maximale en demi-squat et la VO_2 max (L/min) sont des déterminants positifs de la densité minérale osseuse et des indices géométriques de résistance osseuse de la hanche (mesurés par le logiciel HSA);
- La VO_2 max (ml/min/kg) est positivement corrélée au TBS;
- Le CMO CE, la DMO L1-L4, la DMO HE, la DMO CF, la CSA CF et le Z CF sont significativement supérieurs chez les sujets sportifs par rapport aux sujets sédentaires après ajustement pour le poids;
- La VO_2 max (ml/min/kg) est positivement corrélée au CSI CF, au BSI CF et à l'ISI CF. Les corrélations positives entre la VO_2 max (ml/min/kg) et deux de ces indices (CSI et ISI) restent significatives même après ajustement pour l'IMC.
- Le volume hebdomadaire d'activité physique est positivement corrélé au CSI CF, au BSI CF et à l'ISI CF.

Ces différents résultats suggèrent une adaptation ostéogénique significative des jeunes hommes en surpoids et obèses en réponse à l'entraînement physique. Les différentes corrélations retrouvées suggèrent qu'il faille augmenter la force maximale en demi-squat, la VO_2 max (L/min), la masse maigre et le volume hebdomadaire d'activité physique chez les jeunes hommes en surpoids et obèses afin de prévenir l'ostéoporose. Au vu de nos résultats (et en particulier les corrélations entre les niveaux de performance physique et les paramètres osseux), il serait intéressant dans le futur de mener plusieurs études. Dans un premier temps, il serait important de mener une étude randomisée contrôlée chez de jeunes hommes en surpoids et obèses. Le but de cette étude serait de comparer les effets de deux protocoles d'entraînement physique (un protocole basé sur l'entraînement de la force musculaire et un protocole basé sur l'entraînement des qualités aérobies) sur les paramètres osseux. La durée de cette étude devrait être comprise entre 12 et 18 mois à raison de 3 entraînements par semaine afin d'obtenir des résultats

potentiellement significatifs. Dans un deuxième temps, il serait intéressant d'explorer les effets des différents phénotypes d'obésité sur les paramètres osseux dans les deux sexes. En dernier lieu, il serait raisonnable d'explorer les effets des différents phénotypes d'obésité sur l'incidence fracturaire et le risque fracturaire chez les personnes âgées.

Bibliographie

1. Abrahin O, Rodrigues RP, Marçal AC, Alves EA, Figueiredo RC, de Sousa EC. (2016). Swimming and cycling do not cause positive effects on bone mineral density: a systematic review. *Rev Bras Reumatol Engl Ed*. Jul-Aug; 56(4):345-51.
2. AFFSA, CNERNA-CNAS. (2001). Apports nutritionnels conseillés pour la population Française. TEC et Doc.
3. Afghani A, Abbott AV, Wiswell RA, Jaque SV, Gleckner C, Schroeder ET, Johnson CA. (2004). Bone mineral density in Hispanic women: role of aerobic capacity, fat-free mass, and adiposity. *Int J Sports Med*. Jul; 25(5):384-90.
4. Agostinete RR, Lynch KR, Gobbo LA, Lima MC, Ito IH, Luiz-de-Marco R, Rodrigues-Junior MA, Fernandes RA. (2016). Basketball Affects Bone Mineral Density Accrual in Boys More Than Swimming and Other Impact Sports: 9-mo Follow-Up. *J Clin Densitom*. Jul-Sep; 19(3):375-81.
5. Ahedi H, Aitken D, Scott D, Blizzard L, Cicuttini F, Jones G. (2014). The association between hip muscle cross-sectional area, muscle strength, and bone mineral density. *Calcif Tissue Int*. Jul; 95(1):64-72.
6. Ainsworth BE, Youmans CP. (2002). Tools for physical activity counseling in medical practice. *Obes Res*; 10 (1): 69S-75S.
7. Albayrak I, Aydogmus M, Ozerbil OM, Levendoglu F. (2016). The association between bone mineral density, quality of life, quality of sleep and fatigue. *Acta Clin Belg*. Apr; 71(2):92-8.
8. Alberga AS, Sigal RJ, Kenny GP. (2011). A review of resistance exercise training in obese adolescents. *Phys Sports med*. May; 39(2):50-63.
9. Alos N, Rauch F. (2009). Bone mass acquisition in children: pathophysiology and evaluation. *Arch Pediatr*. Jun; 16(6):591-3.

10. 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. *J Clin Densitom.* Oct; 19(4):492-493.
11. Ammann P, Rizzoli R. (2003). Bone strength and its determinants. *Osteoporos Int.* 14 Suppl 3:S13-8.
12. Apostol L, Boudousq V, Basset O, Odet C, Yot S, Tabary J, Dinten JM, Boiler E, Kotzki PO, Peyrin F. (2006). Relevance of 2D radiographic texture analysis for the assessment of 3D bone micro-architecture. *Med Phys.* Sep; 33(9):3546-56.
13. Atlan M, Forget BC, Ramaz F, Boccara AC, Gross M. (2005). Pulsed acousto-optic imaging in dynamic scattering media with heterodyne parallel speckle detection. *Opt Lett.* Jun 1; 30(11):1360-2.
14. Audran, M., Insalaco, P., Legrand, E., Libouban, H., Basle, M. F. & Chappard, D. (2003). Physiologie du tissu osseux chez l'homme. *Progrès en Urologie.* 13(2):3-8.
15. Ayoub ML, 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. *Orthop Traumatol Surg Res.* Dec; 100(8):855-8.
16. Ayoub ML, Maalouf G, Cortet B, Legroux-Gérout I, Zunquin G, El Hage R. (2016). Trabecular Bone Score and Osteoporotic Fractures in Obese Postmenopausal Women. *J Clin Densitom.* Oct; 19(4):544-545.
17. Baddoura R, Arabi A, Haddad-Zebouni S, Khoury N, Salamoun M, Ayoub G, Okais J, Awada H, El-Hajj Fuleihan G. (2007). Vertebral fracture risk and impact of database selection on identifying elderly Lebanese with osteoporosis. *Bone.* Apr; 40(4):1066-72.
18. Baddoura R, Hoteit M, El-Hajj Fuleihan G. (2011). Osteoporotic fractures, DXA, and fracture risk assessment: meeting future challenges in the Eastern Mediterranean Region. *J Clin Densitom.* Oct-Dec; 14(4):384-94.

19. Baddoura R. (2001). Incidence of hip fractures in the Lebanese population. *East Mediterr Health J.* Jul-Sep; 7(4-5):725-9.
20. Baiotto S, Zidi M. (2004). Theoretical and numerical study of a bone remodeling model: the effect of osteocyte cells distribution. *Biomech Model Mechanobiol.* Sep; 3(1):6-16.
21. Bala Y, Farlay D, Chapurlat RD, Boivin G. (2011). Modifications of bone material properties in postmenopausal osteoporotic women long-term treated with alendronate. *Eur J Endocrinol.* Oct; 165(4):647-55.
22. Baqué, P. (2008). *Manuel pratique d'anatomie*. Paris: Ellipses Marketing.
23. Baron, M. (2001). Induction of embryonic hematopoietic and endothelial stem/progenitor cells by hedgehog-mediated signals. *Differentiation.* Oct; 68(4-5):175-85.
24. Baron, R. (2003). General principles of bone biology. EnFavus MJ. (Ed.), *Primer on the metabolic bone diseases and disorders of mineral metabolism* (pp. 1-8). (5thed.). Washington, D.C: American Society for Bone and Mineral Research.
25. Bass SL, Saxon L, Daly RM, Turner CH, Robling AG, Seeman E, Stuckey S. (2002). The effect of mechanical loading on the size and shape of bone in pre-, peri-, and postpubertal girls: a study in tennis players. *J Bone Miner Res.* Dec; 17(12):2274-80.
26. Bauer JS, Link TM. (2009). Advances in osteoporosis imaging. *Eur J Radiol.* Sep; 71(3):440-9.
27. Baxter-Jones AD, Kontulainen SA, Faulkner RA, Bailey DA. (2008). A longitudinal study of the relationship of physical activity to bone mineral accrual from adolescence to young adulthood. *Bone.* Dec; 43(6):1101-7.
28. Beck TJ, Ruff CB, Warden KE, Scott WW Jr, Rao GU. (1990). Predicting femoral neck strength from bone mineral data. A structural approach. *Invest Radiol.* Jan; 25(1):6-18.
29. Beck TJ. (2007). Extending DXA beyond bone mineral density: understanding hip structure analysis. *Curr Osteoporos Rep.* Jun; 5(2):49-55.

30. Beck TJ. (2009). Comparison of DXA hip structural analysis with volumetric QCT. *J Clin Densitom.* Apr-Jun; 12(2):260-1; author reply 262.
31. Benetou V, Orfanos P, Benetos IS, Pala V, Evangelista A, Frasca G. (2011). Anthropometry, physical activity and hip fractures in the elderly. *Injury*; 42(2):188–93.
32. Benhamou CL, Poupon S, Lespessailles E, Loiseau S, Jennane R, Siroux V, Ohley W, Pothuau L. (2001). Fractal analysis of radiographic trabecular bone texture and bone mineral density: two complementary parameters related to osteoporotic fractures. *J Bone Miner Res.* Apr; 16(4):697-704.
33. Benson AC, Torode ME, Fiatarone Singh MA. (2008). The effect of high-intensity progressive resistance training on adiposity in children: a randomized controlled trial. *Int J Obes (Lond).* Jun; 32(6):1016-27.
34. Bernard Cortet, Christian Roux. (2016). Obesity and osteoporosis. *Revue du Rhumatisme Monographies.* 83(1):25–28.
35. Berro AJ, Alwan A, Zouhal H, Maalouf G, Rizkallah M, El Hage R. (2016). Vitamin D Level and Composite Indices of Femoral Neck Strength in a Group of Young Lebanese Women. *J Clin Densitom.* Oct 14. pii: S1094-6950(16)30099-3.
36. Bevier WC, Wiswell RA, Pyka G, Kozak KC, Newhall KM, Marcus R. (1989). Relationship of body composition, muscle strength, and aerobic capacity to bone mineral density in older men and women. *J Bone Miner Res.* Jun; 4(3):421-32.
37. Bischoff-Ferrari HA, Borchers M, Gudat F, Dürmüller U, Stähelin HB, Dick W. (2004). Vitamin D receptor expression in human muscle tissue decreases with age. *J Bone Miner Res.* Feb; 19(2):265-9.
38. Bjarnason NH, Henriksen EE, Alexandersen P, Christgau S, Henriksen DB, Christiansen C. (2002). Mechanism of circadian variation in bone resorption. *Bone.* Jan; 30(1):307-13.
39. Björntorp P. (1997). Hormonal control of regional fat distribution. *Hum Reprod.* Oct; 12 Suppl 1:21-5.

40. Björntorp P. (1997). Neuroendocrine factors in obesity. *J Endocrinol.* Nov; 155(2):193-5.
41. Blanchet, C., Chaire, L., Chagnon, A. & Thibault, G. (2008). *Activité physique et santé osseuse.* Ministère de l'éducation, du loisir et du sport. Kino-Québec.
42. Bolam KA, Van Uffelen JG, Taaffe DR. (2013). The effect of physical exercise on bone density in middle-aged and older men: a systematic review. *Osteoporos Int.* Nov; 24(11):2749-62.
43. Bolotin HH, Sievänen H, Grashuis JL, Kuiper JW, Järvinen TL. (2001). Inaccuracies inherent in patient-specific dual-energy X-ray absorptiometry bone mineral density measurements: comprehensive phantom-based evaluation. *J Bone Miner Res.* Feb; 16(2):417-26.
44. Bonjour JP, Ammann P, Chevalley T, Rizzoli R. (2001). Protein intake and bone growth. *Can J Appl Physiol.* 26 Suppl: S153-66.
45. 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 Suppl 1:S5-17.
46. Bonjour JP, Chevalley T, Ferrari S. (2009). The importance and relevance of peak bone mass in the prevalence of osteoporosis. *Salud Publica Mex;* 51(1 Suppl.):S5—17.
47. Bonjour JP, Chevalley T, Rizzoli R, Ferrari S. (2007). Gene-environment interactions in the skeletal response to nutrition and exercise during growth. *Med Sport Sci;* 51: 64- 80.
48. Bonjour JP, Ferrari S, Slosman D, Rizzoli R. (1997). Calcium intake and bone growth. *Arch Pediatr.* Aug; 4(8):719-21.
49. Bonjour JP. (2011). Protein intake and bone health. *Int J Vitam Nutr Res.* Mar; 81(2-3):134-42.
50. Bonnick SL. (2007). HSA: beyond BMD with DXA. *Bone.* Jul; 41(1 Suppl 1):S9-12.
51. Bossard MJ, Tomaszek TA, Thompson SK, Amegadzie BY, Hanning CR, Jones C, Kurdyla JT, McNulty DE, Drake FH, Gowen M, Levy MA. (1996). Proteolytic activity

of human osteoclast cathepsin K. Expression, purification, activation, and substrate identification. *J Biol Chem*. May 24; 271(21):12517-24.

52. Bousson V, Bergot C, Sutter B, Cortet B. (2011). Trabecular Bone Score (TBS) : que savons-nous ? *La Lettre du Rhumatologue* ; Numéro 377 (Décembre) : p45.
53. Bousson V, Bergot C, Sutter B, Thomas T, Bendavid S, Benhamou CL, Blain H, Brazier M, Breuil V, Briot K, Chapurlat R, Chapuis L, Cohen Solal M, Fardellone P, Feron JM, Gauvain JB, Laroche M, Legrand E, Lespessailles E, Linglart A, Marcelli C, Roux C, Souberbielle JC, Tremollieres F, Weryha G, Cortet B; Groupe de Recherche et d'Information sur les Ostéoporoses (GRIO). (2015). Trabecular Bone Score: Where are we now? *Joint Bone Spine*. Oct; 82(5):320-5.
54. Bousson V, Bergot C, Sutter B. (2012). Trabecular bone score (TBS): available knowledge, clinical relevance, and future prospects. *OsteoporosInt*; 23(5):1489–1501.
55. Bouxsein ML. (2003). Mechanisms of osteoporosis therapy: a bone strength perspective. *Clin Cornerstone*. Suppl 2:S13-21.
56. Bouxsein ML. (2008). Technology insight: noninvasive assessment of bone strength in osteoporosis. *Nat Clin Pract Rheumatol*. Jun; 4(6):310-8.
57. Brand JS, Rovers MM, Yeap BB, Schneider HJ, Tuomainen TP, Haring R, Corona G, Onat A, Maggio M, Bouchard C, Tong PC, Chen RY, Akishita M, Gietema JA, Gannagé-Yared MH, Undén AL, Hautanen A, Goncharov NP, Kumanov P, Chubb SA, Almeida OP, Wittchen HU, Klotsche J, Wallaschofski H, Völzke H, Kauhanen J, Salonen JT, Ferrucci L, van der Schouw YT. (2014). Testosterone, sex hormone-binding globulin and the metabolic syndrome in men: an individual participant data meta-analysis of observational studies. *PLoS One*. Jul 14; 9(7):e100409.
58. Brandi ML. (2009). Microarchitecture, the key to bone quality. *Rheumatology (Oxford)*. Oct; 48 Suppl 4:iv3-8.
59. Briot K. (2009). Macroarchitecture et résistance osseuse : Rôle de l'os cortical. *Sciences du Vivant*. Université d'Orléans. (Thèse de doctorat).

60. Briot K. (2013). DXA parameters: beyond bone mineral density. *Joint Bone Spine*; 80:265–69.
61. Bull FC, Maslin TS, Armstrong T. (2009). Global physical activity questionnaire (GPAQ): nine country reliability and validity study. *J Phys Act Health*; 6(6):790–804.
62. Burr DB. (1997). Muscle strength, bone mass and age-related bone loss. *J Bone Miner Res*. Oct; 12(10):1547-51.
63. Burr, D.B., Robling, A.G. & Turner, C.H. (2002). Effects of biomechanical stress on bones in animals. *Bone*. 30:781-6.
64. Buysse DJ, Reynolds 3rd CF, Monk TH, Berman SR, Kupfer DJ. (1989). The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Res*; 28(2):193–213.
65. Calbet JA, Dorado C, Díaz-Herrera P, Rodríguez-Rodríguez LP. (2001). High femoral bone mineral content and density in male football (soccer) players. *Med Sci Sports Exerc*. Oct; 33(10):1682-7.
66. Calbet JA, Moysi JS, Dorado C, Rodríguez LP. (1998). Bone mineral content and density in professional tennis players. *Calcif Tissue Int*. Jun; 62(6):491-6.
67. Campos RM, de Mello MT, Tock L, Silva PL, Masquio DC, de Piano A, Sanches PL, Carnier J, Corgosinho FC, Foschini D, Tufik S, Dâmaso AR. (2014). Aerobic plus resistance training improves bone metabolism and inflammation in adolescents who are obese. *J Strength Cond Res*. Mar; 28(3):758-66.
68. Carter DR, Bouxsein ML, Marcus R. (1992). New approaches for interpreting projected bone densitometry data. *J Bone Miner Res*. Feb; 7(2):137-45.
69. Carter DR, Orr TE. (1992). Skeletal development and bone functional adaptation. *J Bone Miner Res*. Dec; 7 Suppl 2:S389-95.
70. Cauley JA, Lacroix AZ, Wu L, Horwitz M, Danielson ME, Bauer DC, Lee JS, Jackson RD, Robbins JA, Wu C, Stanczyk FZ, LeBoff MS, Wactawski-Wende J, Sarto G, Ockene

- J, Cummings SR. (2008). Serum 25-hydroxyvitamin D concentrations and risk for hip fractures. *Ann Intern Med.* Aug 19; 149(4):242-50.
71. Chamari K, Chaouachi A, Hambli M, Kaouech F, Wisløff U, Castagna C. (2008). The five-jump test for distance as a field test to assess lower limb explosive power in soccer players. *J Strength Cond Res*; 22: 944-50.
72. Chang KP, Center JR, Nguyen TV, Eisman JA. (2004). Incidence of hip and other osteoporotic fractures in elderly men and women: Dubbo Osteoporosis Epidemiology Study. *J Bone Miner Res.* Apr; 19(4):532-6.
73. Chappard D, Retaillieu-Gaborit N, Legrand E, Baslé MF, Audran M. (2005). Comparison insight bone measurements by histomorphometry and microCT. *J Bone Miner Res.* Jul; 20(7):1177-84.
74. Chevalley T, Bonjour JP, Ferrari S, Rizzoli R. (2008). High-protein intake enhances the positive impact of physical activity on BMC in prepubertal boys. *J Bone Miner Res.* Jan; 23(1):131-42.
75. Chilibeck PD, Sale DG, Webber CE. (1995). Exercise and bone mineral density. *Sports Med.* Feb; 19(2):103-22.
76. Cho MR, Shin JY, Hwang JH, Jacobs DR Jr, Kim SY, Lee DH. (2011). Associations of fat mass and lean mass with bone mineral density differ by levels of persistent organic pollutants: National Health and Nutrition Examination Survey 1999-2004. *Chemosphere.* Feb; 82(9):1268-76.
77. Clark EM, Ness AR, Tobias JH. (2006). the avon longitudinal study of parents and children study team adipose tissue stimulates bone growth in prepubertal children. *J Clin Endocrinol Metab*; 91 (7):2534-41.
78. Clowes JA, Hannon RA, Yap TS, Hoyle NR, Blumsohn A, Eastell R. (2002). Effect of feeding on bone turnover markers and its impact on biological variability of measurements. *Bone.* Jun; 30(6):886-90.

79. Clowes JA, Robinson RT, Heller SR, Eastell R, Blumsohn A. (2002). Acute changes of bone turnover and PTH induced by insulin and glucose: euglycemic and hypoglycemic hyperinsulinemic clamp studies. *J Clin Endocrinol Metab.* Jul; 87(7):3324-9.
80. Cobayashi F, Lopes L, Taddei J. (2005). Bone mineral density in overweight and obese adolescents. *J Pediatr (Rio J)*; 81: 337-42.
81. Cohen-Solal M, de Vernejoul MC. (2003). Bone remodeling. *Therapie.* Sep-Oct; 58(5):391-3.
82. Cole TJ, Bellizzi MC, Flegal KM. (2000). Establishing a standard definition for child overweight and obesity worldwide: International survey. *BMJ*; 320(7244):1240–1243.
83. Cole ZA, Dennison EM, Cooper C. (2008). Osteoporosis epidemiology update. *Curr Rheumatol Rep*; 10: 92–6.
84. Compston JE, Watts NB, Chapurlat R, Cooper C, Boonen S, Greenspan S, Pfeilschifter J, Silverman S, Díez-Pérez A, Lindsay R, Saag KG, Netelenbos JC, Gehlbach S, Hooven FH, Flahive J, Adachi JD, Rossini M, Lacroix AZ, Roux C, Sambrook PN, Siris ES; Glow Investigators. (2011). Obesity is not protective against fracture in postmenopausal women: GLOW. *Am J Med.* Nov; 124(11):1043-50.
85. Compston, J. (2001). Sex Steroids and Bone. *Physiological Reviews*, 81(1), 419-447.
86. Cornish J, Callon KE, Bava U, Kamona SA, Cooper GJ, Reid IR. (2001). Effects of calcitonin, amylin, and calcitonin gene-related peptide on osteoclast development. *Bone.* Aug; 29(2):162-8.
87. Cortet B, Bousson V. (2016). TBS and bone strength. *Bonekey Rep.* Mar 2; 5: 792.
88. Couret, I. (2004). Biologie du remodelage osseux. *Médecine nucléaire*, 28(2), 57-65.
89. Courteix D, Lespessailles E, Peres SL, Obert P, Germain P, Benhamou CL. (1998). Effect of physical training on bone mineral density in prepubertal girls: a comparative study between impact-loading and non-impact-loading sports. *Osteoporos Int.* 8 (2):152-8.

90. Courteix D, Valente-Dos-Santos J, Ferry B, Lac G, Lesourd B, Chapier R, Naughton G, Marceau G, Coelho-E-Silva MJ, Vinet A, Walther G, Obert P, Dutheil F. (2015). Correction: Multilevel Approach of a 1-Year Program of Dietary and Exercise Interventions on Bone Mineral Content and Density in Metabolic Syndrome - the RESOLVE Randomized Controlled Trial. PLoS One. Oct 6; 10(10):e0140307.
91. Cowin L. (2001). Measuring nurses' self-concept. West J Nurs Res. Apr; 23(3):313-25.
92. Coxam V., Davicco M.J., Wittrant Y. (2013). Santé de l'appareil locomoteur : Mécanismes globaux musculo-squelettiques, effets des nutriments. Unité de Nutrition Humaine UMR1019, INRA Theix, 63122 saint-Genès Champanelle.
93. Cuenca-García M, Ortega FB, Huybrechts I, Ruiz JR, González- Gross M, Ottevaere C. (2012). Cardiorespiratory fitness and dietary intake in European adolescents: the healthy lifestyle in europe by nutrition in adolescence study. Br J Nutr; 107(12):1850–9.
94. Cummings SR. (1993). Bone mass and bone loss in the elderly: a special case? Int J Fertil Menopausal Stud.3; 38 Suppl 2:92-7.
95. Currie A, Cappuccio FP. (2007). Sleep in children and adolescents: a worrying scenario: can we understand the sleep deprivation-obesity epidemic? Nutr Metab Cardiovasc Dis 17(3):230-2.
96. De Laet C, Kanis JA, Odén A, Johanson H, Johnell O, Delmas P, Eisman JA, Kroger H, Fujiwara S, Garnero P, McCloskey EV, Mellstrom D, Melton LJ 3rd, Meunier PJ, Pols HA, Reeve J, Silman A, Tenenhouse A. (2005). Body mass index as a predictor of fracture risk: a meta-analysis. Osteoporos Int. Nov; 16 (11):1330-8.
97. de Salles PG, Vasconcellos FV, de Salles GF, Fonseca RT, Dantas EH. (2012). Validity and reproducibility of the sargent jump test in the assessment of explosive strength in soccer players. J Hum Kinet; 33:115–21.
98. Deheeger M, Rolland-Cachera MF, Fontvieille AM. (1997). Physical activity and body composition in 10 year old French children: linkages with nutritional intake? Int J Obes Relat Metab Disord; 21:372–379.

99. Dentant B. (2014). L'ostéoporose masculine, un mal sous-estimé : physiopathologie, diagnostic, suivi, recommandations thérapeutiques et place du pharmacien d'officine. Sciences pharmaceutiques. (Thèse de doctorat).
100. Dixon WG, Lunt M, Pye SR. (2005). Low grip strength is associated with bone mineral density and vertebral fracture in women. *Rheumatology (Oxford)*; 44: 642-6.
101. Dolan SH, Williams DP, Ainsworth BE, Shaw JM. (2006). Development and reproducibility of the bone loading history questionnaire. *Med Sci Sports Exerc.* Jun; 38(6):1121-31.
102. Donaldson AA, Feldman HA, O'Donnell JM. (2015). Spinal bone texture assessed by trabecular bone score in adolescent girls with anorexia nervosa. *J Clin Endocrinol Metab*; 100(9):3436—42.
103. Douchi T, Iemura A, Matsuo T. (2003). Relationship of head lean mass to regional bone mineral density in elderly postmenopausal women. *Maturitas*; 46 (3): 225.
104. Duan Y, Beck TJ, Wang XF, Seeman E. (2003). Structural and biomechanical basis of sexual dimorphism in femoral neck fragility has its origins in growth and aging. *J Bone Miner Res.* Oct; 18(10):1766-74.
105. Duan Y, Wang XF, Evans A, Seeman E. (2005). Structural and biomechanical basis of racial and sex differences in vertebral fragility in Chinese and Caucasians. *Bone.* Jun; 36(6):987-98.
106. Ducher G, Blimkie CJ. (2006). Adaptations architecturales du tissu osseux en réponse à l'exercice physique: intérêts et limites des méthodes non invasives utilisées chez l'homme. *Science & Sports*; 21:255–267.
107. Ducher G, Courteix D, Mème S, Magni C, Viala JF, Benhamou CL. (2005). Bone geometry in response to long-term tennis playing and its relationship with muscle volume: a quantitative magnetic resonance imaging study in tennis players. *Bone.* Oct; 37(4):457-66.

108. Ducher G, Daly RM, Bass SL. (2009). Effects of repetitive loading on bone mass and geometry in young male tennis players: a quantitative study using MRI. *J Bone Miner Res.* Oct; 24(10):1686-92.
109. Dyson K, Blimkie CJ, Davison KS, Webber CE, Adachi JD. (1997). Gymnastic training and bone density in pre-adolescent females. *Med Sci Sports Exerc.* Apr; 29(4):443-50.
110. Egan E, Reilly T, Giacomoni M, Redmond L, Turner C. (2006). Bone mineral density among female sports participants. *Bone.* Feb; 38(2):227-33.
111. Ehrlich PJ, Lanyon LE. (2002). Mechanical strain and bone cell function: a review. *Osteoporos Int.* Sep; 13(9):688-700.
112. Eisman JA. (1999). Genetics of osteoporosis. *Endocr Rev.* Dec; 20(6):788-804.
113. El Hage R, Bachour F, Khairallah W. (2014). Lumbar spine bone mineral density in obese, overweight, and normal-weight Lebanese postmenopausal women. *J Clin Densitom*; 17(1):215–216.
114. El Hage R, Bachour F, Khairallah W. (2014). The influence of obesity and overweight on hip bone mineral density in Lebanese women. *J Clin Densitom*; 17(1):216—7.
115. El Hage R, Bachour F, Sebaaly A. (2014). The influence of weight status on radial bone mineral density in Lebanese women. *Calcif Tissue Int*; 94(4):465–467.
116. El Hage R, Chatah R, Moussa E, Theunynck D. (2014a). Adult female football players have higher lumbar spine and hip bone mineral density than age- and body weight-matched controls. *J Sports Med Phys Fitness.* Apr; 54(2):174-8.
117. El Hage R, El Hage Z, Moussa E, Jacob C, Zunquin G, Theunynck D. (2013). Geometric indices of hip bone strength in obese, overweight, and normal-weight adolescent girls. *J Clin Densitom.* Jul-Sep; 16(3):313-9.
118. El Hage R, El Hage Z, Moussa E. (2013). Geometric indices of hip bone strength in obese, overweight, and normal-weight adolescent girls. *J Clin Densitom*; 16(3):313–319.

119. El Hage R, Jacob C, Moussa E, Benhamou CL, Jaffré C. (2009a). Total body, lumbar spine and hip bone mineral density in overweight adolescent girls: decreased or increased? *J Bone Miner Metab.* 27(5):629-33.
120. El Hage R, Jacob C, Moussa E, Jaffré C, Baddoura R. (2011a). Bone mass in a group of Lebanese girls from Beirut and French girls from Orleans. *J Med Liban.* Jul-Sep; 59 (3):131-5.
121. El Hage R, Jacob C, Moussa E, Youssef H, Jaffré C. (2009b). Effets de 12 semaines d'entraînement en endurance sur le contenu mineral osseux et la densité minérale osseuse chez des adolescentes obèses, en surpoids et normales. *Science et Sports* 24:210-213.
122. El Hage R, Jacob C, Moussa E. (2011). Relative importance of lean mass and fat mass on bone mineral density in a group of Lebanese postmenopausal women. *J ClinDensitom;* 14(3):326–331.
123. El Hage R, Khairallah W, Bachour F, Issa M, Eid R, Fayad F, Yared C, Zakhem E, Adib G, Maalouf G. (2014b). Influence of age, morphological characteristics, and lumbar spine bone mineral density on lumbar spine trabecular bone score in Lebanese women. *J Clin Densitom.* Jul-Sep; 17(3):434-5.
124. El Hage R, Mina F, Ayoub ML. (2012). Relative importance of lean mass and fat mass on bone mineral density in a group of Lebanese elderly men. *J Med Liban;* 60(3):136—41.
125. El Hage R, Moussa E, El Hage Z, Jacob C. (2011b). Birth weight a negative determinant of whole body bone mineral apparent density in a group of adolescent boys. *J Clin Densitom.* Jan-Mar; 14(1):63-7.
126. El Hage R, Moussa E, El Hage Z, Theunynck D, Jacob C. (2011c). Influence of age and morphological characteristics on whole body, lumbar spine, femoral neck and 1/3 radius bone mineral apparent density in a group of Lebanese adolescent boys. *J Bone Miner Metab.* Jul; 29(4):477-83.

127. El Hage R, Moussa E, Jacob C. (2010). Bone mineral content and density in obese, overweight, and normal-weighted sedentary adolescent girls. *J Adolesc Health*. Dec; 47(6):591-5.
128. El Hage R, Zakhem E, Theunynck D, Zunquin G, Bedran F, Sebaaly A, Bachour F, Maalouf G. (2014c). Maximal oxygen consumption and bone mineral density in a group of young Lebanese adults. *J Clin Densitom*. Apr-Jun; 17(2):320-4.
129. El Hage R, Zakhem E, Zunquin G, Theunynck D, Moussa E, Maalouf G. (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.
130. El Hage R, Zakhem E, Zunquin G, Theunynck D. (2014d). Geometric indices of hip bone strength in male professional soccer players. *J Med Liban*. Oct-Nov; 62(4):207-12.
131. El Hage R. (2012). Geometric indices of hip bone strength in obese, overweight, and normal-weight adolescent boys. *Osteoporos Int*; 23(5):1593–660.
132. El Hage R. (2013). Geometric indices of hip bone strength in young female football players. *J Musculoskelet Neuronal Interact*. Jun; 13(2):206-12.
133. El Hage R. (2014). Composite indices of femoral neck strength in adult female soccer players. *J Clin Densitom*. Jan-Mar; 17(1):212-3.
134. El Hage RP, Courteix D, Benhamou CL, Jacob C, Jaffré C. (2009c). Relative importance of lean and fat mass on bone mineral density in a group of adolescent girls and boys. *Eur J Appl Physiol*. Mar; 105(5):759-64.
135. El Khoury C, Pinti A, Lespessailles E, Maalouf G, Watelain E, El Khoury G, Berro AJ, Ayoub ML, Toumi H, El Hage R. (2016a). Physical Performance Variables and Bone Mineral Density in a Group of Young Overweight and Obese Men. *J Clin Densitom*. Aug 18. pii: S1094-6950(16)30088-9.
136. El Khoury C, Toumi H, Lespessailles E, Pinti A, El Khoury G, Maalouf G, Zakhem E, Ayoub ML, Watelain E, El Hage R. (2016b) Decreased Composite Indices of Femoral

- Neck Strength in Young Obese Men. *J Clin Densitom.* Apr 22. pii: S1094-6950(16)30030-0.
137. El-Hajj Fuleihan G, Baddoura R, Awada H, Arabi A, Okais J. (2008). First update of the Lebanese guidelines for osteoporosis assessment and treatment. *J Clin Densitom.* 2008 Jul-Sep; 11(3):383-96.
 138. Ellis KJ, Shypailo RJ, Wong WW, Abrams SA. (2003). Bone mineral mass in overweight and obese children: diminished or enhanced? *Acta Diabetol*; 40: S274-S277.
 139. 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. *J Bone Miner Metab.* 27(6):713-20.
 140. Ensrud KE, Lipschutz RC, Cauley JA, Seeley D, Nevitt MC, Scott J, Orwoll ES, Genant HK, Cummings SR. (1997). Body size and hip fracture risk in older women: a prospective study. Study of Osteoporotic Fractures Research Group. *Am J Med.* Oct; 103(4):274-80.
 141. Eriksen EF. (2010). Cellular mechanisms of bone remodeling. *Rev EndocrMetabDisord.* Dec; 11(4):219-27.
 142. Fardellone P, Sebert JL, Bouraya M, Bonidan O, Leclercq G, Doutrelot C. (1991). Evaluation of the calcium content of diet by frequential self-questionnaire. *Rev Rhum Mal Osteoartic*; 58 (2): 99–103.
 143. Farpour-Lambert, N. J. & Rizzoli, R. (2003). Santé osseuse de l'adolescent, *Revue Médicale Suisse*, 575.
 144. Faulkner K.G., Wacker W.K., Barden H.S., et coll. (2006). Femur strength index predicts hip fracture independent of bone density and hip axis length. *Osteoporos Int* 17:593–99.
 145. Ferry B, Duclos M, Burt L, Therre P, Le Gall F, Jaffré C, Courteix D. (2011). Bone geometry and strength adaptations to physical constraints inherent in different sports:

- comparison between elite female soccer players and swimmers. *J Bone Miner Metab.* May; 29(3):342-51.
146. Ferry B, Lespessailles E, Rochcongar P, Duclos M, Courteix D. (2013). Bone health during late adolescence: effects of an 8-month training program on bone geometry in female athletes. *Joint Bone Spine.* Jan; 80(1):57-63.
147. Flöter M, Bittar CK, Zabeu JL, Carneiro AC. (2011). Review of comparative studies between bone densitometry and quantitative ultra-sound of the calcaneus in osteoporosis. *Acta Reumatol Port;* 36(4):327–35.
148. Folsom AR, Kushi LH, Anderson KE, Mink PJ, Olson JE, Hong CP. (2000). Associations of general and abdominal obesity with multiple health outcomes in older women: the Iowa Women's Health Study. *Arch Intern Med;* 160(14):2117–28.
149. Fonseca H, Moreira-Gonçalves D, Coriolano HJ. (2014). Bone quality: the determinants of bone strength and fragility. *Sports Med;* 44(1):37–53.
150. Fricke O, Lehmkuhl G, Schoenau E. (2006). The principle of regulation in biology-from bone to eating behavior. *Exp Clin Endocrinol Diabetes.* Apr; 114(4):197-203.
151. Frisch RE, Revelle R. (1970). Height and weight at menarche and a hypothesis of critical body weights and adolescent events. *Science.* Jul 24; 169(3943):397-9.
152. Frost HM. (1987). A determinant of bone architecture. The minimum effective strain. *Clin Orthop Relat Res.* 1983 May; (175):286-92.
153. Frost HM. (1998). From Wolff's law to the mechanostat: a new "face" of physiology. *J Orthop Sci.* 3(5):282-6.
154. Frost HM. (2003). Bone's mechanostat: a 2003 update. *Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol;* 275: 1081-101.
155. Frost, H.M. (1983). A determinant of bone architecture. The minimum effective strain. *Clinical Orthopaedic and Related Research,* 286-92.

156. Frost, H.M. (1987). The mechanostat: a proposed pathogenic mechanism of osteoporoses and the bone mass effects of mechanical and nonmechanical agents. *Bone Mineral*. 2:73-85.
157. Fulton JP. (1999). New guidelines for the prevention and treatment of osteoporosis. National Osteoporosis Foundation. *Med Health R I*; 82:110–111.
158. Gilsanz V, Chalfant J, Mo AO, Lee DC, Dorey FJ, Mittelman SD. (2009). Reciprocal relations of subcutaneous and visceral fat to bone structure and strength. *J Clin Endocrinol Metab*. Sep; 94(9):3387-93.
159. Ginty F, Rennie KL, Mills L, Stear S, Jones S, Prentice A. (2005). Positive, site-specific associations between bone mineral status, fitness, and time spent at high-impact activities in 16- to 18-year-old boys. *Bone*. Jan;36(1):101-10.
160. Giudicelli, J. & Souberbielle, J.C. (1998). Le remodelage osseux et l'exploration de l'ostéoporose. *Acomen*, 4(3), 251-272.
161. Glaser DL, Kaplan FS. (1997). Osteoporosis. Definition and clinical presentation. *Spine (Phila Pa 1976)*. Dec 15; 22(24 Suppl):12S-16S.
162. Glüer CC, Eastell R, Reid DM, Felsenberg D, Roux C, Barkmann R, Timm W, Blenk T, Ambrecht G, Stewart A, Clowes J, Thomasius FE, Kolta S. (2004). Association of five quantitative ultrasound devices and bone densitometry with osteoporotic vertebral fractures in a population-based sample: the OPUS Study. *J Bone Miner Res*. May; 19(5):782-93.
163. Gomez-Bruton A, Montero-Marín J, González-Agüero A, García-Campayo J, Moreno LA, Casajús JA, Vicente-Rodríguez G. (2016). The Effect of Swimming During Childhood and Adolescence on Bone Mineral Density: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med*. Mar; 46(3):365-79.
164. Gonnelli S, Cepollaro C, Gennari L, Montagnani A, Caffarelli C, Merlotti D. (2005). Quantitative ultrasound and dual-energy X-ray absorptiometry in the prediction of fragility fracture in men. *Osteoporos Int*; 16(8):963–8.

165. Goulding A, Jones IE, Taylor RW, Williams SM, Manning PJ. (2001). Bone mineral density and body composition in boys with distal forearm fractures: a dual-energy x-ray absorptiometry study. *J Pediatr. Oct*; 139(4):509-15.
166. Grampp S, Steiner E, Imhof H. (1997). Radiological diagnosis of osteoporosis. *Eur Radiol. 7 Suppl 2*:S11-9.
167. Greenspan SL, Bouxsein ML, Melton ME, Kolodny AH, Clair JH, Delucca PT. (1997). Precision and discriminatory ability of calcaneal bone assessment technologies. *J Bone Miner Res*; 12 (8):1303–13.
168. Grey A. (2007). Emerging pharmacologic therapies for osteoporosis. *Expert Opin Emerg Drugs. Sep*; 12(3):493-508.
169. Groothausen J, Siemer H, Kemper HCG, Twisk JWR, Welten DC. (1997). Influence of peak strain on lumbar bone mineral density: an analysis of 15 year physical activity in young men and women. *Pediatr Exerc Sci. 9*:159-173
170. Guggenbuhl P, Bodic F, Hamel L, Baslé MF, Chappard D. (2006). Texture analysis of X-ray radiographs of iliac bone is correlated with bone micro-CT. *Osteoporos Int. 17*(3):447-54.
171. Guglielmi G, Grimston SK, Fischer KC, Pacifici R. (1994). Osteoporosis: diagnosis with lateral and posteroanterior dual x-ray absorptiometry compared with quantitative CT. *Radiology. Sep*; 192(3):845-50.
172. Hamrick MW, Ferrari SL. (2008). Leptin and the sympathetic connection of fat to bone. *Osteoporos Int. Jul*; 19(7):905-12.
173. Hannan MT, Tucker KL, Dawson-Hughes B, Cupples LA, Felson DT, Kiel DP. (2000). Effect of dietary protein on bone loss in elderly men and women: the Framingham Osteoporosis Study. *J Bone Miner Res. Dec*; 15(12):2504-12.

174. Hans D, Dargent-Molina P, Schott AM, Sebert JL, Comier C, Kotzki PO. (1996). Ultrasonographic heel measurements to predict hip fracture in elderly women: the EPIDOS prospective study. *Lancet*; 348(9026):511–4.
175. Hans D, Fuerst T, Uffmann M. (1996). Bone density and quality measurement using ultrasound. *Curr Opin Rheumatol*. Jul; 8(4):370-5.
176. Hans D, Goertzen A, Krieg MA. (2011). Bone microarchitecture assessed by tbs predicts hip, clinical spine and all osteoporotic fractures independently of BMD in 22,234 women aged 50 and older: the Manitoba Prospective Study. *J Bone Miner Res*; 26(11):2762—9.
177. Hans D, Krieg MA. (2009). Quantitative ultrasound for the detection and management of osteoporosis. *Salud Publica Mex*. 51 Suppl 1:S25-37.
178. Hanson ED, Leigh S, Mynark RG. (2007). Acute effects of heavy and light-load squat exercises on the kinetic measures of vertical jump. *J Strength Cond Res*; 21 (4): 1012-17.
179. Hart KJ, Shaw JM, Vajda E, Hegsted M, Miller SC. (2001). Swim-trained rats have greater bone mass, density, strength, and dynamics. *J Appl Physiol*; 91: 1663- 8.
180. Harvey NC, Glüer CC, Binkley N. (2015). Trabecular bone score (TBS) as a new complementary approach for osteoporosis evaluation in clinical practice. *Bone*; 78:216–224.
181. Haymann J. (2010). Ostéodensitométrie : principes et indications. *Progrès en Urologie - FMC*, Volume 20, Issue 4, December, Pages F119-F122.
182. Heiniö L, Nikander R, Sievänen H. (2015). Association between long-term exercise loading and lumbar spine trabecular bone score (TBS) in different exercise loading groups. *J Musculoskelet Neuronal Interact*. Sep; 15(3):279-85.
183. Heinonen A, Oja P, Kannus P, Sievänen H, Haapasalo H, Mänttari A, Vuori I. (1995). Bone mineral density in female athletes representing sports with different loading characteristics of the skeleton. *Bone*. Sep; 17(3):197-203.

184. Heinonen A, Sievänen H, Kannus P, Oja P, Vuori I. (2002). Site-specific skeletal response to long-term weight training seems to be attributable to principal loading modality: a pQCT study of female weightlifters. *Calcif Tissue Int.* Jun; 70(6):469-74.
185. Heiss CJ, Sanborn CF, Nichols DL, Bonnick SL, Alford BB. (1995). Associations of body fat distribution, circulating sex hormones, and bone density in postmenopausal women. *J Clin Endocrinol Metab*; 80 (5): 1591-6.
186. Heitmann BL, Hills AP, Frederiksen P, Ward LC. (2009). Obesity, leanness, and mortality: effect modification by physical activity in men and women. *Obesity (Silver Spring)*. Jan; 17(1):136-42.
187. Henriksen DB, Alexandersen P, Bjarnason NH, Vilsbøll T, Hartmann B, Henriksen EE, Byrjalsen I, Krarup T, Holst JJ, Christiansen C. (2003). Role of gastrointestinal hormones in postprandial reduction of bone resorption. *J Bone Miner Res.* Dec; 18(12):2180-9.
188. Hernandez CJ, Beaupré 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.* Oct; 14(10):843-7.
189. Herring JA. (1994). The treatment of Legg-Calvé-Perthes disease. A critical review of the literature. *J Bone Joint Surg Am.* Mar; 76(3):448-58.
190. Hind K, Truscott JG, Evans JA. (2006). Low lumbar spine bone mineral density in both male and female endurance runners. *Bone.* Oct; 39(4):880-5.
191. Hofbauer LC, Hamann C, Ebeling PR. (2010). Approach to the patient with secondary osteoporosis. *Eur J Endocrinol.* Jun; 162(6):1009-20.
192. Holroyd C, Cooper C, Dennison E. (2008). Epidemiology of osteoporosis. *Best Pract Res Clin Endocrinol Metab*; 22:671–85.
193. Hsieh YF, Robling AG, Ambrosius WT, Burr DB, Turner CH. (2001). Mechanical loading of diaphyseal bone in vivo: the strain threshold for an osteogenic response varies with location. *J Bone Miner Res*; 16: 2291-7.

194. Hudgins B, Scharfenberg J, Triplett NT, McBride JM. (2012). Relationship between jumping ability and running performance in events of varying distance. *J Strength Cond Res*; 27 (3): 563-7.
195. Huopio J, Kröger H, Honkanen R, Jurvelin J, Saarikoski S, Alhava E. Calcaneal ultrasound predicts early postmenopausal fractures as well as axial BMD. A prospective study of 422 women. *Osteoporos Int* 2004; 15(3):190–5.
196. Huuskonen J, Väisänen SB, Kröger H, Jurvelin C, Bouchard C, Alhava E, Rauramaa R. (2000). Determinants of bone mineral density in middle aged men: a population-based study. *Osteoporos Int*. 11(8):702-8.
197. Ihle R, Loucks AB. (2004). Dose-response relationships between energy availability and bone turnover in young exercising women. *J Bone Miner Res*. Aug; 19(8):1231-40. *J Clin Densitom*. Oct-Dec; 14(4):384-94.
198. Iki M, Tamaki J, Kadowaki E. (2014). Trabecular bone score (TBS) predicts vertebral fractures in Japanese women over 10 years independently of bone density and prevalent vertebral deformity: the Japanese Population-Based Osteoporosis (JPOS) cohort study. *J Bone Miner Res*; 29(2):399–407.
199. Janicka A, Wren TA, Sanchez MM, Dorey F, Kim PS, Mittelman SD. (2007). Fat mass is not beneficial to bone in adolescents and young adults. *J Clin Endocrinol Metab*; 92(1):143–7.
200. Janssen HC, Samson MM, Verhaar HJ. (2002). Vitamin D deficiency, muscle function, and falls in elderly people. *Am J Clin Nutr*. Apr; 75(4):611-5.
201. Javed F, Yu W, Thornton J, Colt E. (2009). Effect of fat on measurement of bone mineral density. *Int J Body Compos Res*. Jul 1; 7(1):37-40.
202. Jidovtseff B, Crielaard JM, Cauchy S, Croisier JL. (2008). Validité et reproductibilité d'un dynamomètre inertiel basé sur l'accélérométrie. *Sci Sports*; 23: 94-7.

203. JM Soulat, Lauque D, Esquirol Y, Déprés M, Giron J, Claudel R, Carles P. (1999). High-resolution computed tomography abnormalities in ex-insulators annually exposed to asbestos dust. *Am J Ind Med.* Dec; 36(6):593-601.
204. Johnell O, O'Neill T, Felsenberg D, Kanis J, Cooper C, Silman AJ. (1997). Anthropometric measurements and vertebral deformities. European Vertebral Osteoporosis Study (EVOS) Group. *Am J Epidemiol.* Aug 15; 146(4):287-93.
205. Johnston JD. (1994). Smokers have less dense bones and fewer teeth. *J R Soc Health.* Oct; 114(5):265-9.
206. Judex S, William C, Whiting C, Zernicke RF. (1999). Exercise-induced bone adaptation: considerations for designing an osteogenically effective exercise program. *International Journal of Industrial Ergonomics.* 24:235-238.
207. Judex S, Zernicke RF. (2000). High-impact exercise and growing bone: relation between high strain rates and enhanced bone formation. *J Appl Physiol;* 88: 2183-91.
208. Kanehisa J, Heersche JN. (1988). Osteoclastic bone resorption: in vitro analysis of the rate of resorption and migration of individual osteoclasts. *Bone.* 9 (2):73-9.
209. Kanis JA. (1994). Assessment of fracture risk and its application to screening for postmenopausal osteoporosis: synopsis of a WHO report. WHO Study Group. *Osteoporos Int;* 4:368–81.
210. Kaptoge S, da Silva JA, Brixen K, Reid DM, Kröger H, Nielsen TL, Andersen M, Hagen C, Lorenc R, Boonen S, de Vernejoul MC, Stepan JJ, Adams J, Kaufman JM, Reeve J. (2008). 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.* Aug; 43(2):332-9.
211. 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. *Osteoporos Int.* 15(1):62–70.

212. Karsenty G, Ferron M. (2012). The contribution of bone to whole-organism physiology. *Nature*. Jan 18; 481(7381):314-20.
213. Katzman DK, Bachrach LK, Carter DR, Marcus R. (1991). Clinical and anthropometric correlates of bone mineral acquisition in healthy adolescent girls. *J Clin Endocrinol Metab*. Dec; 73(6):1332-9.
214. Kaufman JM, Goemaere S. (2008). Osteoporosis in men. *Best Pract Res Clin Endocrinol Metab*. Oct; 22(5):787-812.
215. Kelley GA, Kelley KS, Kohrt WM. (2013). Exercise and bone mineral density in premenopausal women: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Int J Endocrinol*. 2013:741639.
216. Kemper HC, Bakker I, Twisk JW, van Mechelen W. (2002). Validation of a physical activity questionnaire to measure the effect of mechanical strain on bone mass. *Bone*. May; 30(5):799-804.
217. Kohrt WM, Bloomfield SA, Little KD, Nelson ME, Yingling VR; American College of Sports Medicine. (2004). American College of Sports Medicine Position Stand: physical activity and bone health. *Med Sci Sports Exerc*. Nov; 36(11):1985-96.
218. Kolta S, Quilgotti S, Ruysen-Witrand A, Amido A, Mitton D, Bras AL, Skalli W, Roux C. (2008). In vivo 3D reconstruction of human vertebrae with the three-dimensional X-ray absorptiometry (3D-XA) method. *Osteoporos Int*. Feb; 19(2):185-92.
219. Kontulainen, S. (2002). Training, Detraining and bone: Effect of exercise on bone mass and structure with special reference to maintenance of the exercise induced. *Bone Gain*. Université de Jyväskylä (Finlande).
220. Kremer R, Gilsanz V. (2016). Fat and Bone: An Odd Couple. *Front Endocrinol (Lausanne)*. Mar 7; 6:190.
221. Krueger D, Fidler E, Libber J. (2014). Spine trabecular bone score subsequent to bone mineral density improves fracture discrimination in women. *J Clin Densitom*; 17(1):60–65.

222. Krstrup P, Hansen PR, Andersen LJ. (2010). Long-term musculoskeletal and cardiac health effects of recreational football and running for premenopausal women. *Scand J Med Sci Sports*; 20: 58-71.
223. Lacombe, M. (2000). *Précis d'anatomie et de physiologie humaine*. Vélizy: Editions Lamarre.
224. LaCroix AZ, Beck TJ, Cauley JA, Lewis CE, Bassford T, Jackson R, Wu G, Chen Z. (2010). Hip structural geometry and incidence of hip fracture in postmenopausal women: what does it add to conventional bone mineral density? *Osteoporos Int*. Jun; 21(6):919-29.
225. Lanyon LE, Rubin CT. (1984). Static vs dynamic loads as an influence on bone remodelling. *J Biomech*. 17(12):897-905.
226. Lanyon LE. (1996). Using functional loading to influence bone mass and architecture: objectives, mechanisms, and relationship with estrogen of the mechanically adaptive process in bone. *Bone*; 18: 37S-43S.
227. Lau EM, Chan YH, Chan M, Woo J, Griffith J, Chan HH, Leung PC. (2000). Vertebral deformity in chinese men: prevalence, risk factors, bone mineral density, and body composition measurements. *Calcif Tissue Int*. Jan; 66(1):47-52.
228. Laugier P, Novikov V, Elmann-Larsen B, Berger G. (2000). Quantitative ultrasound imaging of the calcaneus: precision and variations during a 120-Day bed rest. *Calcif Tissue Int*. Jan; 66(1):16-21.
229. Laugier P. (2006). Quantitative ultrasound of bone: looking ahead. *Joint Bone Spine*. Mar; 73(2):125-8.
230. Leonard MB, Shults J, Wilson BA, Tershakovec AM, Zemel BS. (2004). Obesity during childhood and adolescence augments bone mass and bone dimensions. *Am J Clin Nutr*. Aug; 80(2):514-23.

231. Leslie WD, Aubry-Rozier B, Lix LM. (2014). Spine bone texture assessed by trabecular bone score (TBS) predicts osteoporotic fractures in men: the Manitoba Bone Density Program. *Bone*; 67:10–14.
232. Leslie WD, Johansson H, Kanis JA. (2014). Lumbar spine texture enhances 10-year fracture probability assessment. *OsteoporosInt*; 25(9):2271–2277.
233. Leslie WD, Krieg MA, Hans D. (2013). Manitoba Bone Density Program. Clinical factors associated with trabecular bone score. *J ClinDensitom*; 16(3):374–379.
234. Leslie WD, Krieg MA, Hans D; Manitoba Bone Density Program. (2013). Clinical factors associated with trabecular bone score. *J Clin Densitom*. Jul-Sep; 16(3):374-9.
235. Li GW, Chang SX, Xu Z, Chen Y, Bao H, Shi X. (2013). Prediction of hip osteoporotic fractures from composite indices of femoral neck strength. *Skeletal Radiol*. Feb; 42(2):195-201.
236. Liu PY, Hornbuckle LM, Ilich JZ, Kim JS, Panton L. (2014). Body composition and muscular strength as predictors of bone mineral density in African American women with metabolic syndrome. *Ethn Dis*. Summer; 24(3):356-62.
237. Maalouf G, Bachour F, Hlais S, Maalouf NM, Yazbeck P, Yaghi Y, Yaghi K, El Hage R, Issa M. (2013). Epidemiology of hip fractures in Lebanon: a nationwide survey. *Orthop Traumatol Surg Res*. Oct; 99(6):675-80.
238. MacKelvie KJ, McKay HA, Petit MA, Moran O, Khan KM. (2002). 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*. May; 17(5):834-44.
239. MacKelvie KJ, Petit MA, Khan KM, Beck TJ, McKay HA. (2004) Bone mass and structure are enhanced following a 2-year randomized controlled trial of exercise in prepubertal boys. *Bone* 34(4):755-764.
240. Magali SM, Pierre L, Martin G, Thierry T, Jean-Claude B, Philippe C, Frédéric R, Emilia S. (2016). Does Subjective Sleep Affect Bone Mineral Density in Older People

- with Minimal Health Disorders? The PROOF Cohort. *J Clin Sleep Med*. Nov 15; 12(11):1461-1469.
241. Magnusson SP, Hansen P, Kjaer M. (2003). Tendon properties in relation to muscular activity and physical training. *Scand J Med Sci Sports*. Aug; 13(4):211-23.
 242. Major GC, Chaput JP, Ledoux M, St-Pierre S, Anderson GH, Zemel MB, Tremblay A. (2008). Recent developments in calcium-related obesity research. *Obes Rev*. Sep; 9(5):428-45.
 243. Marie P, Halbout P. (2008). OPG/RANKL: role and therapeutic target in osteoporosis. *Med Sci (Paris)*. Jan; 24(1):105-10.
 244. Marie PJ, De Vernejoul MC. (1993). Local factors of bone remodeling. *Rev Rhum Ed Fr*. Jan; 60(1):54-63.
 245. Marie PJ. (2006). Strontium ranelate: a dual mode of action rebalancing bone turnover in favour of bone formation. *Curr Opin Rheumatol*. Jun; 18 Suppl 1:S11-5.
 246. Marieb, E. & Hoehn, K. (2010). *Anatomie et physiologie humaine, adaptation de la 8ème édition américaine*.
 247. Marieb, EN. (1999). *Physiologie humaine: Anatomie et physiologie (4th ed.)*. Bruxelles: Edition de Boeck Université.
 248. Marin RV, Pedrosa MA, Moreira-Pfrimer LD, Matsudo SM, Lazaretti-Castro M. (2010). Association between lean mass and handgrip strength with bone mineral density in physically active postmenopausal women. *J Clin Densitom*. Jan-Mar; 13(1):96-101.
 249. Marks Jr., Odgren P. (2002). Structure and Development of the Skeleton. *Principles of Bone Biology (Second Edition)*, Pages 3-15.
 250. Marshall D, Hailey D, Jonsson E. (1996). Health policy on bone density measurement technology in Sweden and Australia. *Health Policy*. Mar; 35(3):217-28.

251. Marshall D, Johnell O, Wedel H. (1996). Meta-analysis of how well measures of bone mineral density predict occurrence of osteoporotic fractures. *BMJ*. May 18; 312(7041):1254-9.
252. Matkovic V, Ilich JZ, Skugor M, Badenhop NE, Goel P, Clairmont A, Klisovic D, Nahhas RW, Landoll JD. (1997). Leptin is inversely related to age at menarche in human females. *J Clin Endocrinol Metab*. Oct; 82(10):3239-45.
253. Maurel DB, Boisseau N, Benhamou CL, Jaffre C. (2012). Alcohol and bone: review of dose effects and mechanisms. *Osteoporos Int*. Jan; 23(1):1-16.
254. McGuigan FE, Murray L, Gallagher A, Davey-Smith G, Neville CE, Van't Hof R. (2002) Genetic and environmental determinants of peak bone mass in young men and women. *J Bone Miner Res*; 17:1273–9.
255. McNair PJ, Colvin M, Reid D. (2011). Predicting maximal strength of quadriceps from submaximal performance in individuals with knee joint osteoarthritis. *Arthritis Care Res (Hoboken)*; 63: 216-22.
256. Melton LJ 3rd, Atkinson EJ, O'Connor MK, O'Fallon WM, Riggs BL. (1998). Bone density and fracture risk in men. *J Bone Miner Res*. Dec; 13(12):1915-23.
257. Melton LJ 3rd, Beck TJ, Amin S, Khosla S, Achenbach SJ, Oberg AL, Riggs BL. (2005). Contributions of bone density and structure to fracture risk assessment in men and women. *Osteoporos Int*. May; 16(5):460-7.
258. Miettinen HM, Pulkkinen P, Jämsä T, Koistinen J, Simanainen U, Tuomisto J, Tuukkanen J, Viluksela M. (2005). Effects of in utero and lactational TCDD exposure on bone development in differentially sensitive rat lines. *Toxicol Sci*. Jun; 85(2):1003-12.
259. Miller ME. (1989). Treatment of subtrochanteric fractures of the femur treated with the 95 degrees angled blade plate. *Clin Orthop Relat Res*. Dec; (249):285-7.
260. Miller SC. (1985). The rapid appearance of acid phosphatase activity at the developing ruffled border of parathyroid hormone activated medullary bone osteoclasts. *Calcif Tissue Int*. Sep; 37(5):526-9.

261. Moayyeri A, Adams JE, Adler RA, Krieg MA, Hans D, Compston J. (2012). Quantitative ultrasound of the heel and fracture risk assessment: an updated meta-analysis. *Osteoporos Int*; 23(1):143–53.
262. Morin P, Herrmann F, Ammann P, Uebelhart B, Rizzoli R. (2005). A rapid self-administered food frequency questionnaire for the evaluation of dietary protein intake. *Clin Nutr*; 24: 768-74.
263. Morroni M, De Matteis R, Palumbo C, Ferretti M, Villa I, Rubinacci A, Cinti S, Marotti G. (2004). In vivo leptin expression in cartilage and bone cells of growing rats and adult humans. *J Anat. Oct*; 205(4):291-6.
264. Mosbah H, Andreelli F. (2012). Os et métabolisme glucidique. *Médecine des Maladies Métaboliques*, Volume 6, Issue 4, September, Pages 311-316.
265. Mosley JR, March BM, Lynch J, Lanyon LE. (1997). Strain magnitude related changes in whole bone architecture in growing rats. *Bone*; 20: 191-8.
266. Mowry DA, Costello MM, Heelan KA. (2009). Association among cardiorespiratory fitness, body fat, and bone marker measurements in healthy young females. *J Am Osteopath Assoc. Oct*; 109(10):534-9.
267. Muftic M, Selimovic EK, Miladinovic K. (2013). Osteoporosis – comparative study between quantitative ultrasound of calcaneus and DXA. *Med Arch*; 67(4):289–91.
268. Mundy, G. (1999). Bone Remodeling. *Primer on the Metabolic Bone Diseases and Disorders of Mineral Metabolism*; Fourth Edition: 30-38.
269. Nevill A, Holder R, Stewart A. (2014). Do sporting activities convey benefits to bone mass throughout the skeleton? *J Sports Med*; 22:645–650.
270. Nicholson PH, Müller R, Lowet G, Cheng XG, Hildebrand T, Rüegsegger P, van der Perre G, Dequeker J, Boonen S. (1998). Do quantitative ultrasound measurements reflect structure independently of density in human vertebral cancellous bone? *Bone. Nov*; 23(5):425-31.

271. Nielson CM, Marshall LM, Adams AL, LeBlanc ES, Cawthon PM, Ensrud K, Stefanick ML, Barrett-Connor E, Orwoll ES; Osteoporotic Fractures in Men Study Research Group. (2011). BMI and fracture risk in older men: the osteoporotic fractures in men study (MrOS). *J Bone Miner Res.* Mar; 26(3):496-502.
272. NIH. (2001). Consensus Development Panel on Osteoporosis Prevention, Diagnosis and Therapy. Osteoporosis prevention, diagnosis, and therapy. *JAMA*; 285:785–95.
273. Nikander R, Sievänen H, Heinonen A, Kannus P. (2005). Femoral neck structure in adult female athletes subjected to different loading modalities. *J Bone Miner Res.* Mar; 20(3):520-8.
274. Nikander R, Sievänen H, Heinonen A, Kannus P. (2005). Femoral neck structure in adult female athletes subjected to different loading modalities. *J Bone Miner Res*; 20: 520-8.
275. Niu J, Sahni S, Liao S, Tucker KL, Dawson-Hughes B, Gao X. (2015). Association between Sleep Duration, Insomnia Symptoms and Bone Mineral Density in Older Boston Puerto Rican Adults. *PLoS One.* Jul 6; 10(7):e0132342.
276. Njeh CF, Boivin CM, Langton CM. (1997). The role of ultrasound in the assessment of osteoporosis: a review. *Osteoporos Int*; 7:7– 22.
277. Nordström P, Thorsen K, Bergström E, Lorentzon R. (1996). High bone mass and altered relationships between bone mass, muscle strength, and body constitution in adolescent boys on a high level of physical activity. *Bone.* Aug; 19(2):189-95.
278. O'Connor JA, Lanyon LE, MacFie H. (1982). The influence of strain rate on adaptive bone remodelling. *J Biomech.* 15(10):767-81.
279. Orsini N, Bellocco R, Bottai M, Pagano M, Michaelsson K, Wolk A. *J Intern Med.* Nov; 264(5):442-51. (2008). Combined effects of obesity and physical activity in predicting mortality among men.

280. Outila, T. (2001). The effect of vitamin D status on calcium and bone metabolism. (Thèse de Doctorat, Université de Helsinki, Helsinki. Retrouvée de <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/maa/skemi/vk/outila/theeffec.pdf>.
281. Pande I, Francis RM. (2001). Osteoporosis in men. *Best Pract Res Clin Rheumatol*; 15:415—27.
282. Parfitt AM. (1996). Hormonal influences on bone remodeling and bone loss: application to the management of primary hyperparathyroidism. *Ann Intern Med*. Sep 1; 125(5):413-5.
283. Pasco JA, Holloway KL, Brennan-Olsen SL, Moloney DJ, Kotowicz MA. (2015). Muscle strength and areal bone mineral density at the hip in women: a cross-sectional study. *BMC Musculoskelet Disord*. May 24; 16:124.
284. Peng XD, Xie H, Zhao Q, Wu XP, Sun ZQ, Liao EY. (2008). Relationships between serum adiponectin, leptin, resistin, visfatin levels and bone mineral density, and bone biochemical markers in Chinese men. *Clin Chim Acta*; 387 (1-2): 31-5.
285. Petit MA, Beck TJ, Shults J, Zemel BS, Foster BJ, Leonard MB. (2005). Proximal femur bone geometry is appropriately adapted to lean mass in overweight children and adolescents. *Bone*; 36: 568-76.
286. Petit MA, McKay HA, MacKelvie KJ, Heinonen A, Khan KM, Beck TJ. (2002). A randomized school-based jumping intervention confers site and maturity-specific benefits on bone structural properties in girls: a hip structural analysis study. *J Bone Miner Res*. Mar; 17(3):363-72.
287. Pigeon WR, Sateia MJ. (2012). Is insomnia a breathing disorder? *Sleep*. Dec 1; 35(12):1589-90.
288. Plaza-Carmona M, Vicente-Rodríguez G, Gómez-Cabello A, Martín-García M, Sánchez-Sánchez J, Gallardo L, Ara I. (2016). Higher bone mass in prepubertal and peripubertal female footballers. *Eur J Sport Sci*. Oct; 16(7):877-83.

289. Pludowski P, Lebiedowski M, Olszaniecka M, Marowska J, Matusik H, Lorenc RS. (2006). Idiopathic juvenile osteoporosis analysis of the muscle-bone relationship. *Osteoporos Int*; 17: 1681-90.
290. Pocock N, Eisman J, Gwinn T, Sambrook P, Kelly P, Freund J, Yeates M. (1989). Muscle strength, physical fitness, and weight but not age predict femoral neck bone mass. *J Bone Miner Res. Jun*; 4(3):441-8.
291. Pocock NA, Eisman JA, Yeates MG, Sambrook PN, Eberl S. (1986). Physical fitness is a major determinant of femoral neck and lumbar spine bone mineral density. *J Clin Invest. Sep*; 78(3):618-21.
292. Premaor MO, Ensrud K, Lui L, Parker RA, Cauley J, Hillier TA, Cummings S, Compston JE; Study of Osteoporotic Fractures. (2011). Risk factors for nonvertebral fracture in obese older women. *J Clin Endocrinol Metab. Aug*; 96(8):2414-21.
293. Rauch F, Bailey D, Baxter-Jones A, Mirwald R, Faulkner R. (2004). The muscle-bone unit during the pubertal growth spurt. *Bone*; 34: 771-5.
294. Rauch F. (2008). Histomorphometric evaluation of skeletal development. *J Musculoskelet Neuronal Interact. Jan-Mar*; 8(1):29-31.
295. Reid DM, Purdie DW. (1992). Bone-density measurement. *Lancet. Feb 8*; 339(8789):370.
296. Reid DM. (2006). Once-monthly dosing: an effective step forward. *Bone. Apr*; 38(4 Suppl 1):S18-22.
297. Reid DM. (2010). Update on the use of zoledronic acid in the management of osteoporosis. *Curr Osteoporos Rep. Sep*; 8(3):145-50.
298. Reid IR, Plank LD, Evans MC. (1992). Fat mass is an important determinant of whole body bone density in premenopausal women but not in men. *J Clin Endocrinol Metab*; 75 (3):779-82.

299. Reid IR. (2002). Relationships among body mass, its components, and bone. *Bone*. Nov; 31(5):547-55.
300. Reid IR. (2008). Anti-resorptive therapies for osteoporosis. *Semin Cell Dev Biol*; 19 (5): 473-8.
301. Reid IR. (2010). Fat and bone. *Arch Biochem Biophys*. Nov 1; 503(1):20-7.
302. Revilla M, Villa LF, Sánchez-Atrio A, Hernández ER, Rico H. (1997). Influence of body mass index on the age-related slope of total and regional bone mineral content. *Calcif Tissue Int*. Aug; 61(2):134-8.
303. Ricci TA, Heymsfield SB, Pierson RN Jr, Stahl T, Chowdhury HA, Shapses SA. (2001). Moderate energy restriction increases bone resorption in obese postmenopausal women. *Am J Clin Nutr*. Feb; 73(2):347-52.
304. Rico H, Revilla M, Fraile E, Martin FJ, Cardenas JL, Villa LF.(1994). Metacarpal cortical thickness by computed radiography in osteoporosis. *Bone*. May-Jun; 15(3):303-6.
305. Rieger R, Hambli R, Jennane R. (2011). Modeling of biological doses and mechanical effects on bone transduction. *J Theor Biol*. Apr 7; 274(1):36-42.
306. Rizzoli R, Bianchi ML, Garabédian M, McKay HA, Moreno LA. (2010). Maximizing bone mineral mass gain during growth for the prevention of fractures in the adolescents and the elderly. *Bone*. Feb; 46(2):294-305.
307. Rizzoli R, Boonen S, Brandi ML, Burlet N, Delmas P, Reginster JY. (2008). The role of calcium and vitamin D in the management of osteoporosis. *Bone*. Feb; 42(2):246-9.
308. Röben P, Barkmann R, Ullrich S, Gause A, Heller M, Glüer CC. (2001). Assessment of phalangeal bone loss in patients with rheumatoid arthritis by quantitative ultrasound. *Ann Rheum Dis*; 60 (7):670–7.
309. Rocher E, Chappard C, Jaffre C, Benhamou CL, Courteix D. (2008). Bone mineral density in prepubertal obese and control children: relation to body weight, lean mass, and fat mass. *J Bone Miner Metab*. 26(1):73-8.

310. Rocher E, El Hage R, Chappard C, Portier H, Rochefort GY, Benhamou CL. (2013). Bone mineral density, hip bone geometry, and calcaneus trabecular bone texture in obese and normal-weight children. *J Clin Densitom.* Apr-Jun; 16(2):244-9.
311. Romagnoli E, Lubrano C, Carnevale V, Costantini D, Nieddu L, Morano S, Migliaccio S, Gnessi L, Lenzi A. (2016). Assessment of trabecular bone score (TBS) in overweight/obese men: effect of metabolic and anthropometric factors. *Endocrine.* Nov; 54(2):342-347.
312. Rosen CJ, Bouxsein ML. (2006). Mechanisms of disease: is osteoporosis the obesity of bone? *Nat Clin Pract Rheumatol.* Jan; 2(1):35-43.
313. Rosen CJ, Klibanski A. (2009). Bone, fat, and body composition: evolving concepts in the pathogenesis of osteoporosis. *Am J Med.* May; 122(5):409-14.
314. Roux FE, Lotterie JA, Cassol E, Lazorthes Y, Sol JC, Berry I. (2003). Cortical areas involved in virtual movement of phantom limbs: comparison with normal subjects. *Neurosurgery.* Dec; 53(6):1342-52; discussion 1352-3.
315. Roux JP, Wegrzyn J, Boutroy S. (2013). The predictive value of trabecular bone score (TBS) on whole lumbar vertebrae mechanics: an ex vivo study. *OsteoporosInt;* 24(9):2455–2460.
316. Ruff CB, Walker A, Trinkaus E. (1994). Postcranial robusticity in Homo. III: Ontogeny. *Am J Phys Anthropol.* Jan; 93(1):35-54.
317. Russo CR, Lauretani F, Seeman E. (2006). Structural adaptations to bone loss in aging men and women. *Bone;* 38(1):112–118.
318. Sahin G, Polat G, Baethifl S. (2003). Body composition, bone mineral density, and circulating leptin levels in postmenopausal Turkish women. *Rheumatol Int;* 23 (2): 87-91.
319. Sambrook P, Cooper C. (2006). Osteoporosis. *Lancet.* Jun 17; 367(9527):2010-8.

320. Sandalinas, F. et al. (2011). "Surpoids et obésité de l'adulte : prise en charge médicale de premier recours Recommandations pour la pratique clinique." Haute Autorité de Santé: 1-133.
321. Sandström P, Jonsson P, Lorentzon R, Thorsen K. (2000). Bone mineral density and muscle strength in female ice hockey players. *Int J Sports Med.* Oct; 21(7):524-8.
322. Sardinha LB, Baptista F, Ekelund U. (2008). Objectively measured physical activity and bone strength in 9-year-old boys and girls. *Pediatrics.* Sep; 122(3):e728-36.
323. Schipilow JD, Macdonald HM, Liphardt AM, Kan M, Boyd SK. (2013). Bone micro-architecture, estimated bone strength, and the muscle-bone interaction in elite athletes: an HR-pQCT study. *Bone*; 56(2):281–289.
324. Schmidt GP, Reiser MF, Baur-Melnyk A. (2007). Whole-body imaging of the musculoskeletal system: the value of MR imaging. *Skeletal Radiol.* Dec; 36(12):1109-19.
325. Schnitzer TJ, Wysocki N, Barkema D, Griffith J, Lent V, Romba M. (2012). Calcaneal quantitative ultrasound compared with hip and femoral neck dual-energy x-ray absorptiometry in people with a spinal cord injury. *PM R*; 4(10):748–55.
326. Schoenau E, Frost HM. (2002). The "muscle-bone unit" in children and adolescents. *Calcif Tissue Int.* May; 70(5):405-7.
327. Schoenau E. (2006). Bone mass increase in puberty: what makes it happen? *Horm Res.* 65 Suppl 2:2-10.
328. Schott A.M., Cormier C., Hans D. (1998). How hip and whole-body bone mineral density predict hip fracture in elderly women: the EPIDOS Prospective Study. *Osteoporosis International.* 8:247-54.
329. Seeman E, Hopper JL, Young NR, Formica C, Goss P, Tsalamandris C. (1996). Do genetic factors explain associations between muscle strength, lean mass, and bone density? A twin study. *Am J Physiol.* Feb; 270(2 Pt 1): E320-7.

330. Seeman E. (2001). During aging, men lose less bone than women because they gain more periosteal bone, not because they resorb less endosteal bone. *Calcif Tissue Int.* Oct; 69(4):205-8.
331. Seeman E. (2002). Pathogenesis of bone fragility in women and men. *Lancet.* May 25; 359(9320):1841-50.
332. Sforza E, Thomas T, Barthélémy JC, Collet P, Roche F. (2013). Obstructive sleep apnea is associated with preserved bone mineral density in healthy elderly subjects. *Sleep.* Oct 1; 36(10):1509-15.
333. Sgro M, McGuigan MR, Pettigrew S, Newton RU. (2009). The effect of duration of resistance training interventions in children who are overweight or obese. *J Strength Cond Res.* Jul; 23(4):1263-70.
334. Shah K, Armamento-Villareal R, Parimi N, Chode S, Sinacore DR, Hilton TN, Napoli N, Qualls C, Villareal DT. (2011). Exercise training in obese older adults prevents increase in bone turnover and attenuates decrease in hip bone mineral density induced by weight loss despite decline in bone-active hormones. *J Bone Miner Res.* Dec; 26(12):2851-9.
335. Sherk VD, Palmer IJ, Bembien MG, Bembien DA. (2009). Relationships between body composition, muscular strength, and bone mineral density in estrogen-deficient postmenopausal women. *J Clin Densitom*; 12: 292-8.
336. Shin H, Liu PY, Panton LB, Ilich JZ. (2014). Physical performance in relation to body composition and bone mineral density in healthy, overweight, and obese postmenopausal women. *J Geriatr Phys Ther.* Jan-Mar; 37(1):7-16.
337. Sibai AM, Nasser W, Ammar W, Khalife MJ, Harb H, Fuleihan Gel-H. (2011). Hip fracture incidence in Lebanon: a national registry-based study with reference to standardized rates worldwide. *Osteoporos Int.* Sep; 22(9):2499-506.
338. Silva BC, Bilezikian JP. (2014). Trabecular bone score: perspectives of an imaging technology coming of age. *Arq Bras Endocrinol Metabol*; 58(5):493–503.

339. Silva BC, Broy SB, Boutroy S. (2015). Fracture risk prediction by non-BMD DXA measures: the 2015 ISCD official positions part 2: Trabecular Bone Score. *J Clin Densitom*; 18(3):309—30.
340. Silva BC, Leslie WD, Resch H. (2014). Trabecular bone score: a non-invasive analytical method based upon the DXA image. *J Bone Miner Res*; 29(3):518–530.
341. Sirola J, Rikkinen T, Tuppurainen M, Jurvelin JS, Alhava E, Kröger H. (2008). Grip strength may facilitate fracture prediction in perimenopausal women with normal BMD: a 15-year population based study. *Calcif Tissue Int*; 83: 93-100.
342. Slemenda CW. (1995) Body composition and skeletal density-mechanical loading or something more? *J Clin Endocrinol Metab* 80(6):1761-3.
343. Snow-Harter C, Bouxsein M, Lewis B, Charette S, Weinstein P, Marcus R. (1990). Muscle strength as a predictor of bone mineral density in young women. *J Bone Miner Res. Jun*; 5(6):589-95.
344. Söderman K, Bergström E, Lorentzon R, Alfredson H. (2000). Bone mass and muscle strength in young female soccer players. *Calcif Tissue Int*; 67: 297-303.
345. Staiano AE, Reeder BA, Elliott S, Joffres MR, Pahwa P, Kirkland SA, Paradis G, Katzmarzyk PT. (2012). Physical activity level, waist circumference, and mortality. *Appl Physiol Nutr Metab. Oct*; 37(5):1008-13.
346. Swanson CM, Shea SA, Stone KL, Cauley JA, Rosen CJ, Redline S, Karsenty G, Orwoll ES. (2015). Obstructive sleep apnea and metabolic bone disease: insights into the relationship between bone and sleep. *J Bone Miner Res. Feb*; 30(2):199-211.
347. Tardif K, Cloutier I, Miao Z, Lemieux C, St-Denis C, Winnik FM, Tanguay JF. (2011). A phosphorylcholine-modified chitosan polymer as an endothelial progenitor cell supporting matrix. *Biomaterials. Aug*; 32(22):5046-55.
348. Tenforde AS, Fredericson M. (2011). Influence of sports participation on bone health in the young athlete: a review of the literature. *PM R. Sep*; 3(9):861-7.

349. THE MIDDLE EAST & AFRICA REGIONAL AUDIT. (2011). Epidemiology, costs & burden of osteoporosis in 2011. www.iofbonehealth.org.
350. Thomas T, Burguera B, Melton LJ, 3rd, Atkinson EJ, O'Fallon WM. (2001). Role of serum leptin, insulin, and estrogen levels as potential mediators of the relationship between fat mass and bone mineral density in men versus women. *Bone*; 29(2):114–20.
351. Tom SE, Berenson AB. (2013). Associations between poor sleep quality and psychosocial stress with obesity in reproductive-age women of lower socioeconomic status. *Womens Health Issues*. Sep-Oct; 23(5):e295-300.
352. Travison TG, Araujo AB, Esche GR, Beck TJ, McKinlay JB. (2008). Lean mass and not fat mass is associated with male proximal femur strength. *J Bone Miner Res*; 23: 189-98.
353. Tsai PJ, Yu CH, Hsu SP, Lee YH, Chiou CH, Hsu YW, Ho SC, Chu CH. (2004). Cord plasma concentrations of adiponectin and leptin in healthy term neonates: positive correlation with birthweight and neonatal adiposity. *Clin Endocrinol (Oxf)*. Jul; 61(1):88-93.
354. Turner CH, Burr DB. (1993). Basic biomechanical measurements of bone: a tutorial. *Bone*. Jul-Aug; 14(4):595-608.
355. Turner CH. (1998) Three Rules for Bone Adaptation to Mechanical Stimuli. *Bone* 23(5):399-407.
356. Uusi-Rasi K, Kannus P, Pasanen M, Sievänen H. (2010). Is childhood obesity associated with bone density and strength in adulthood? *J Osteoporos*. Jun 20;2010: 904806.
357. Vainionpää A, Korpelainen R, Sievänen H, Vihriälä E, Leppäluoto J, Jämsä T. (2009). Effect of impact exercise and its intensity on bone geometry at weight-bearing tibia and femur. *Bone*; 40 (3): 604-11.
358. Vaitkeviciute D, Lätt E, Mäestu J, Jürimäe T, Saar M, Purge P, Maasalu K, Jürimäe J. (2014). Physical activity and bone mineral accrual in boys with different body mass parameters during puberty: a longitudinal study. *PLoS One*. Oct 3; 9(10):e107759.

359. Van Cauter E, Knutson KL. (2008). Sleep and the epidemic of obesity in children and adults. *Eur J Endocrinol*. Dec; 159 Suppl 1:S59-66.
360. Vicente-Rodriguez G, Ara I, Perez-Gomez J, Serrano-Sanchez JA, Dorado C, Calbet JA. (2004). High femoral bone mineral density accretion in prepubertal soccer players. *Med Sci Sports Exerc*. Oct; 36(10):1789-95.
361. Vicente-Rodriguez G, Dorado C, Perez-Gomez J, Gonzalez-Henriquez JJ, Calbet JA. (2004). Enhanced bone mass and physical fitness in young female handball players. *Bone*. Nov; 35(5):1208-15.
362. Vilayphiou N. (2012). Evaluation de la microarchitecture trabéculaire et des propriétés mécaniques osseuses in vivo chez l'humain par scanner périphérique à haute résolution: application clinique à l'ostéoporose. Médecine humaine et pathologie. Université Claude Bernard. Lyon I, 2010. (Thèse de doctorat).
363. Von Muhlen D, Safii S, Jassal SK, Svartberg J, Barrett-Connor E. (2007). Associations between the metabolic syndrome and bone health in older men and women: the Rancho Bernardo Study. *Osteoporos Int*; 18(10):1337-44.
364. Walters PH, Jezequel JJ, Grove MB. (2012). Case study: Bone mineral density of two elite senior female powerlifters. *J Strength Cond Res*. Mar; 26(3):867-72.
365. Wang MC, Bachrach LK, Van Loan M, Hudes M, Flegal KM, Crawford PB. (2005). The relative contributions of lean tissue mass and fat mass to bone density in young women. *Bone*. Oct; 37(4):474-81.
366. Ward KA, Roberts SA, Adams JE, Mughal MZ. (2005). Bone geometry and density in the skeleton of pre-pubertal gymnasts and school children. *Bone*. Jun; 36(6):1012-8.
367. Warner SE, Shea JE, Miller SC, Shaw JM. (2006). Adaptations in cortical and trabecular bone in response to mechanical loading with and without weight bearing. *Calcif Tissue Int*; 79: 395-403.

368. Waters DL, Hale L, Grant AM, Herbison P, Goulding A. (2010). Osteoporosis and gait and balance disturbances in older sarcopenic obese New Zealanders. *Osteoporos Int.* Feb; 21(2):351-7.
369. Weiler HA, Janzen L, Green K, Grabowski J, Seshia MM, Yuen KC. (2000) Percent body fat and bone mass in healthy Canadian females 10 to 19 years of age. *Bone*; 27(2):203-7.
370. Witzke KA, Snow CM. (1999). Lean body mass and leg power best predict bone mineral density in adolescent girls. *Med Sci Sports Exerc.* Nov; 31(11):1558-63.
371. World Health Organisation. (1994). 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.
372. Wu C, Glüer C, Lu Y, Fuerst T, Hans D, Genant HK. (1998). Ultrasound characterization of bone demineralization. *Calcif Tissue Int.* Feb; 62(2):133-9.
373. Xu Y, Guo B, Gong J, Xu H, Bai Z. (2014). The correlation between calcaneus stiffness index calculated by QUS and total body BMD assessed by DXA in Chinese children and adolescents. *J Bone Miner Metab*; 32(2):159-66.
374. Yu CC, Sung RY, So RC, Lui KC, Lau W, Lam PK, Lau EM. (2005). Effects of strength training on body composition and bone mineral content in children who are obese. *J Strength Cond Res.* Aug; 19(3):667-72.
375. Zakhem E, Ayoub ML, Zunquin G, Theunynck D, Bedran F, Sebaaly A, Bachour F, Maalouf G, El Hage R. (2015). Physical performance and trabecular bone score in a group of young Lebanese women. *J Clin Densitom.* Apr-Jun; 18(2):271-2.
376. Zakhem E, El Hage R, Zunquin G, Jacob C, Moussa E, Theunynck D. (2014). Sleep quality is a determinant of hip bone mineral density in a group of young Lebanese men. *J Med Liban.* Oct-Nov; 62(4):213-6.

377. Zaki ME. (2014). Effects of whole body vibration and resistance training on bone mineral density and anthropometry in obese postmenopausal women. *J Osteoporos*. 702589.
378. Zamboni M, Mazzali G, Fantin F, Rossi A, Di Francesco V. (2008). Sarcopenic obesity: a new category of obesity in the elderly. *Nutr Metab Cardiovasc Dis*. Jun; 18(5):388-95.
379. Zebaze RM, Jones A, Knackstedt M, Maalouf G, Seeman E. (2007). Construction of the femoral neck during growth determines its strength in old age. *J Bone Miner Res*. Jul; 22(7):1055-61.
380. Zemel MB. (2009). Proposed role of calcium and dairy food components in weight management and metabolic health. *Phys Sports med*. Jun; 37(2):29-39.
381. Zhao H, Ettala O, Väänänen HK. (2002). Intracellular membrane trafficking pathways in bone-resorbing osteoclasts revealed by cloning and subcellular localization studies of small GTP-binding rab proteins. *Biochem Biophys Res Commun*. May 10; 293(3):1060-5.
382. Zhu K, Briffa K, Smith A, Mountain J, Briggs AM, Lye S. (2014). Gender differences in the relationships between lean body mass, fat mass and peak bone mass in young adults. *Osteoporos Int*; 25(5):1563–70.
383. Zunquin G, Berro AJ, Bouglé D, Zakhem E, Theunynck D, Mawlawi G, Ayoub ML, El Hage R. (2016). Positive Association Between Maximal Oxygen Consumption and Bone Mineral Density in Growing Overweight Children. *J Clin Densitom*. Apr 19. pii: S1094-6950(16)30010-5.

Annexes

Articles publiés dans des revues indexées :

Georges El Khoury, Hassane Zouhal, César El Khoury, Christophe Jacob, Genevieve Cabagno, Ghassan Maalouf, Anthony Khawaja, Rawad El Hage. Influence du niveau d'activité physique sur les paramètres osseux chez des jeunes hommes en surcharge pondérale. Article accepté pour publication (Kinésithérapie, la revue).

Georges El Khoury, Hassane Zouhal, Geneviève Cabagno, César El Khoury, Maroun Rizkallah, Ghassan Maalouf and Rawad El Hage. Bone Variables in Active Overweight/Obese Men and Sedentary Overweight/Obese Men. Journal of Clinical Densitometry 2016. In press.

Georges El Khoury, Hassane Zouhal, Geneviève Cabagno, Ghassan Maalouf, César El Khoury, Eddy Zakhem, Abdel-Jalil Berro, Rawad El Hage. Maximal Oxygen Consumption and Composite Indices of Femoral Neck Strength in a Group of Young Overweight and Obese Men. Journal of Clinical Densitometry 2016. In press.

Eddy Zakhem, **Georges El Khoury**, Léa Feghaly, Gautier Zunquin, César El Khoury, Thierry Pezé, Marie-Louise Ayoub, Denis Theunynck, Rawad El Hage. Performance physique et densité minérale osseuse chez des jeunes adultes Libanais. Journal Médical Libanais 2016 ; 64(3) : 193-199.

Eddy Zakhem, **Georges El Khoury**, Abdel-Jalil Berro, Hassane Zouhal, César El Khoury, Denis Theunynck, Rémy Hurdiel, Thierry Pezé, Gautier Zunquin, Christophe Jacob, Rawad El Hage. Les déterminants de santé corrélables à la densité minérale osseuse appréciée par ultrasonométrie. Kinésithérapie, la Revue, Volume 16, Issue 173, May 2016, Pages 9-14.

Abir Alwan, César El Khoury, Hassane Zouhal, Ghassan Maalouf, Maroun Rizkallah, **Georges El Khoury**, Eddy Zakhem, Rawad El Hage. Vitamin D Level and Composite Indices of Femoral Neck Strength in a Group of Young Lebanese Men. Journal of Clinical Densitometry, Volume 19, Issue 4, October 2016, Pages 492-493.

Marie-Louise Ayoub, **Georges El Khoury**, Eddy Zakhem, César El Khoury, Bernard Cortet, Rawad El Hage. Trabecular Bone Score in obese, overweight and normal-weight young men. *Science & Sports* 2016. In press.

Eddy Zakhem, **Georges El Khoury**, Hassane Zouhal, Denis Theunynck, Rawad El Hage. Étude observationnelle sur l'impact du type d'activité physique sur la densité minérale osseuse, la géométrie osseuse de la hanche et le TBS chez des hommes adultes. *Kinésithérapie, la Revue*, Volume 15, Issue 163, July 2015, Pages 24-29.

Article en navette:

Marie-Louise Ayoub, **Georges El Khoury**, César El Khoury, Eddy Zakhem, Bernard Cortet, Rawad El Hage. Trabecular Bone Score in overweight and normal-weight young women. Article envoyé à *Jacobs Journal of Physiotherapy and Exercise*.

Résumés publiés dans des revues indexées et/ou des actes de congrès:

Abir Alwan, **Georges El Khoury**, Hassane Zouhal, César El Khoury, Rawad El Hage. Vitamin D level and bone parameters in a group of overweight men. *Osteoporosis Int* 2016; 27(Suppl 1):S482.

Georges El Khoury, Hassane Zouhal, César El Khoury, Abir Alwan, Rawad El Hage. Bone variables in sedentary overweight men and active men. *Osteoporosis Int* 2016; 27(Suppl 1):S494.

Eddy Zakhem, **Georges El Khoury**, Ghassan Maalouf, Denis Theunynck, Gautier Zunquin, Rawad El Hage. Maximal oxygen consumption is a stronger determinant of bone mineral density than body weight in a group of young women. *Osteoporosis Int* 2015; 26(Suppl1):S124.

Georges El Khoury, Hassane Zouhal, Ghassan Maalouf, Eddy Zakhem, César El Khoury, Rawad El Hage. Relative importance of lean mass and fat mass on bone mineral density in young Lebanese adults. *Osteoporosis Int* 2015; 26(Suppl1):S132.

Abir Alwan, **Georges El Khoury**, Hassane Zouhal, Ghassan Maalouf, Walid Khairallah, Rawad El Hage. Concentration sérique de vitamine D et densité minérale osseuse chez des jeunes adultes Libanais. Actes du 16^{ème} congrès de l'ACAPS (2015), page 609.

Georges El Khoury, Marie-Louise Ayoub, Hassane Zouhal, Abir Alwan, Eddy Zakhem, Rawad El Hage. Influence de la surcharge pondérale sur le score trabéculaire osseux chez les jeunes femmes. Actes du 16^{ème} congrès de l'ACAPS (2015), page 655.

Georges El Khoury, Hassane Zouhal, Abir Alwan, César El Khoury, Eddy Zakhem, Rawad El Hage. Relation entre concentration sérique de vitamine D et consommation maximale d'oxygène chez des jeunes femmes. Actes du 16^{ème} congrès de l'ACAPS (2015), page 657.

Marie-Louise Ayoub, **Georges El Khoury**, Ghassan Maalouf, Rawad El Hage. Influence of weight status on trabecular bone score in young Lebanese women. 4th FFN global congress 2015, Rotterdam, the Netherlands, 3-5 September.

Rawad El Hage, Riad Nasr, Abdel-Jalil Berro, Eddy Zakhem, **Georges El Khoury**, César El Khoury, Marie-Louise Ayoub, Abir Alwan, Ghassan Maalouf. Trunk fat mass and bone variables in a group of young men. Sciencesconf.org:bma2015:72488.

Résumé

Le but de cette thèse était d'explorer l'influence du niveau d'activité physique et du niveau de performance physique sur la densité minérale osseuse, la géométrie osseuse de la hanche et le score de l'os trabéculaire chez de jeunes hommes en surpoids et obèses. Trois principales études ont été menées. Une première étude a montré que la pratique d'activités physiques a un effet positif sur le CMO, la DMO et la section transversale du col fémoral chez les hommes en surcharge pondérale. Une deuxième étude a suggéré que le niveau d'activité physique influence positivement les paramètres osseux chez les hommes en surpoids et obèses et que l'optimisation de la masse maigre, de la VO_2 max (L/min) et de la force maximale des membres inférieurs peut aider à prévenir l'ostéoporose chez les hommes en surpoids et obèses. Enfin, une dernière étude, a été la première à démontrer une relation positive entre la VO_2 max (ml/min/kg) et les indices de résistance osseuse du col fémoral (le CSI, le BSI et l'ISI) chez les jeunes hommes en surpoids et obèses et a donc suggéré que l'augmentation de la VO_2 max chez les hommes en surpoids et obèses pourrait aider à réduire les fractures ostéoporotiques. Ces différents résultats suggèrent une adaptation ostéogénique significative des jeunes hommes en surpoids et obèses en réponse à l'entraînement physique.

Mots clés : Consommation maximale d'oxygène ; Force musculaire ; Pic de masse osseuse ; Prévention de l'ostéoporose ; Surcharge pondérale.

Abstract

The aim of this thesis was to explore the influence of physical activity level and physical performance on bone mineral density, hip geometry and trabecular bone score in young overweight and obese men. Three main studies have been conducted. The first study has shown that physical activity practice has a positive effect on BMC, BMD and femoral neck cross-sectional area in overweight men. The second study has shown that physical activity level positively affects bone variables in overweight/obese men and that increasing lean mass, VO_2 max (L/min) and muscular strength of the lower limbs can help to prevent osteoporosis in overweight and obese men. Finally, the last study, was the first to show positive associations between maximal oxygen consumption (milliliter per minute per kilogram) and composite indices of FN strength (CSI, BSI and ISI) in young overweight and obese men and therefore suggested that enhancing VO_2 max in overweight and obese men may help to reduce osteoporotic fractures. These different results suggest a significant osteogenic adaptation in young overweight and obese men in response to physical training.

Keywords: Maximal oxygen consumption; Muscular strength; Peak bone mass; Prevention of osteoporosis; Overweight.

TITRE EN FRANCAIS

Influences des niveaux d'activité physique et de performance physique sur la densité minérale osseuse, la géométrie osseuse de la hanche et le score de l'os trabéculaire chez de jeunes hommes en surpoids et obèses

Sous-titre : activité physique et résistance osseuse chez les jeunes hommes en surpoids

Résumé

Le but de cette thèse était d'explorer l'influence du niveau d'activité physique et du niveau de performance physique sur la densité minérale osseuse, la géométrie osseuse de la hanche et le score de l'os trabéculaire chez de jeunes hommes en surpoids et obèses. Trois principales études ont été menées. Une première étude a montré que la pratique d'activités physiques a un effet positif sur le CMO, la DMO et la section transversale du col fémoral chez les hommes en surcharge pondérale. Une deuxième étude a suggéré que le niveau d'activité physique influence positivement les paramètres osseux chez les hommes en surpoids et obèses et que l'optimisation de la masse maigre, de la $\dot{V}O_2$ max (L/min) et de la force maximale des membres inférieurs peut aider à prévenir l'ostéoporose chez les hommes en surpoids et obèses. Enfin, une dernière étude, a été la première à démontrer une relation positive entre la $\dot{V}O_2$ max (ml/min/kg) et les indices de résistance osseuse du col fémoral (le CSI, le BSI et l'ISI) chez les jeunes hommes en surpoids et obèses et a donc suggéré que l'augmentation de la $\dot{V}O_2$ max chez les hommes en surpoids et obèses pourrait aider à réduire les fractures ostéoporotiques. Ces différents résultats suggèrent une adaptation ostéogénique significative des jeunes hommes en surpoids et obèses en réponse à l'entraînement physique.

Mots clés :

Consommation maximale d'oxygène ; Force musculaire ; Pic de masse osseuse ; Prévention de l'ostéoporose ; Surcharge pondérale.

TITRE EN ANGLAIS

Influences of physical activity and physical performance levels on bone mineral density, hip geometry and trabecular bone score in a group of young overweight and obese men

Sous-titre: Physical activity and bone resistance in a group of young overweight men

Abstract

The aim of this thesis was to explore the influence of physical activity level and physical performance on bone mineral density, hip geometry and trabecular bone score in young overweight and obese men. Three main studies have been conducted. The first study has shown that physical activity practice has a positive effect on BMC, BMD and femoral neck cross-sectional area in overweight men. The second study has shown that physical activity level positively affects bone variables in overweight/obese men and that increasing lean mass, $\dot{V}O_2$ max (L/min) and muscular strength of the lower limbs can help to prevent osteoporosis in overweight and obese men. Finally, the last study, was the first to show positive associations between maximal oxygen consumption (milliliter per minute per kilogram) and composite indices of FN strength (CSI, BSI and ISI) in young overweight and obese men and therefore suggested that enhancing $\dot{V}O_2$ max in overweight and obese men may help to reduce osteoporotic fractures. These different results suggest a significant osteogenic adaptation in young overweight and obese men in response to physical training.

Keywords :

Maximal oxygen consumption; Muscular strength; Peak bone mass; Prevention of osteoporosis; Overweight.

LABORATOIRE OU COMPOSANTE DE L'UNIVERSITE

PRESENTATION DE VIOLENCES, INNOVATIONS, POLITIQUES,

SOCIALISATIONS ET SPORTS (VIPS2)

ADRESSE

Université Rennes 2