

**UNIVERSITE DU DROIT ET DE LA SANTE DE LILLE 2
FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE**

[Année de soutenance : 2016]

N°:

**THESE POUR LE
DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE**

Présentée et soutenue publiquement le [14 SEPTEMBRE 2016]

Par Gaël BEIRNAERT-CHARTREL

Né(e) le 06 Février 1991 à Lomme (France)

**Dépistage précoce de l'ostéoporose à l'aide
des radiographies dentaires**

JURY

Président : Monsieur le Professeur Guillaume PENEL
Assesseurs : Monsieur le Docteur Laurent NAWROCKI
Madame le Docteur Cécile OLEJNIK
Monsieur le Docteur Xavier COUTEL

ACADEMIE DE LILLE
UNIVERSITE DU DROIT ET DE LA SANTE LILLE 2

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE
PLACE DE VERDUN
59000 LILLE



Président de l'Université	:	X. VANDENDRIESSCHE
Directeur Général des Services	:	P-M. ROBERT
Doyen	:	E. DEVEAUX
Assesseurs	:	E. BOCQUET, L. NAWROCKI et G. PENEL
Chef des Services Administratifs	:	S. NEDELEC

PERSONNEL ENSEIGNANT DE L'U.F.R.

PROFESSEURS DES UNIVERSITES :

P. BEHIN :	Prothèses
H. BOUTIGNY :	Parodontologie
T. COLARD :	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques, Radiologie
E. DELCOURT-DEBRUYNE :	Responsable de la Sous-Section de Parodontologie
E. DEVEAUX :	Odontologie Conservatrice - Endodontie Doyen de la Faculté
G. PENEL :	Responsable de la Sous-Section des Sciences Biologiques

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

T. BECAVIN :	Responsable de la Sous-Section d'Odontologie Conservatrice-Endodontie
F. BOSCHIN :	Parodontologie
E. BOCQUET :	Responsable de la Sous- Section d'Orthopédie Dento- Faciale
C. CATTEAU :	Responsable de la Sous-Section de Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
A. CLAISSE :	Odontologie Conservatrice - Endodontie
M.DANGLETERRE :	Sciences Biologiques
A. de BROUCKER :	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques, Radiologie.
T. DELCAMBRE :	Prothèses
C. DELFOSSE :	Responsable de la Sous-Section d'Odontologie Pédiatrique
F. DESCAMP :	Prothèses
A. GAMBIEZ :	Odontologie Conservatrice - Endodontie
F. GRAUX :	Prothèses
P. HILDEBERT :	Odontologie Conservatrice - Endodontie
J.M. LANGLOIS :	Responsable de la Sous-Section de Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique, Anesthésiologie et Réanimation
C. LEFEVRE :	Prothèses
J.L. LEGER :	Orthopédie Dento-Faciale
M. LINEZ :	Odontologie Conservatrice - Endodontie
G. MAYER :	Prothèses
L. NAWROCKI :	Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique, Anesthésiologie et Réanimation Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin - CHRU Lille
C. OLEJNIK :	Sciences Biologiques
P. ROCHER :	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques, Radiologie.
M. SAVIGNAT :	Responsable de la Sous-Section des Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques, Radiologie.
T. TRENTESAUX :	Odontologie Pédiatrique
J. VANDOMME	Responsable de la Sous-Section de Prothèses

Réglementation de présentation du mémoire de Thèse

Par délibération en date du 29 octobre 1998, le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire de l'Université de Lille 2 a décidé que les opinions émises dans le contenu et les dédicaces des mémoires soutenus devant jury doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'ainsi aucune approbation, ni improbation ne leur est donnée.

Aux membres du jury...

Monsieur le Professeur Guillaume PENEL

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier

Sous-Section Sciences Biologiques

Docteur en Chirurgie Dentaire

Doctorat de l'Université René DESCARTES (Paris V)

CES d'Odontologie Chirurgicale

Habilité à Diriger des Recherches

Vice-Doyen Recherche de la Faculté de Chirurgie Dentaire

Responsable de la Sous-Section Sciences Biologiques

Pour l'honneur que vous me faites en acceptant la présidence de cette thèse, pour votre partage de connaissances et de vos expériences cliniques tout au long de mes études ainsi que pour mon Master M1 Biologie Santé, je souhaite vous exprimer ma gratitude. Veuillez trouver ici l'expression de mes sentiments les plus respectueux

Monsieur le Docteur Laurent NAWROCKI

Maitre de Conférence des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD

Sous-Section Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique, Anesthésiologie et Réanimation

Docteur en Chirurgie Dentaire

Doctorat de l'Université de Lille 2 (mention Odontologie)

Maîtrise en Biologie Humaine

CES d'Odontologie Chirurgicale

Coordinateur Adjoint du D.E.S de Chirurgie Orale

Secrétaire du Collège Hospitalo-Universitaire de Médecine Buccale et Chirurgie Buccale

Vice-Doyen Relations Intérieures et Extérieures de la Faculté de Chirurgie Dentaire

Chef du Service d'Odontologie du Centre Abel Caumartin – CHRU de Lille

C'est un honneur de vous compter dans ce jury. Malgré un emploi du temps chargé et de nombreuses responsabilités, vous êtes parvenu à vous libérer et je vous en suis reconnaissant.

Veillez trouver en ce travail mes remerciements les plus sincères.

Madame le Docteur Cécile OLEJNIK

Maitre de Conférence des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD

Sous-Section Sciences Biologiques

Docteur en Chirurgie Dentaire

Vous avez accepté de suite de diriger ma thèse et je vous en remercie. Je suis ravi d'avoir travaillé en votre compagnie. Vous avez toujours été là, tout au long de l'année, pour me soutenir et me conseiller que ça soit dans cette thèse ou dans mes projets personnels. Vos anecdotes et votre sens de l'humour restera dans les meilleures parties de mon cursus. Je tenais à travers cette thèse à vous exprimer mes remerciements et ma gratitude.

Monsieur le Docteur Xavier Coutel

Assistant Hospitalo-Universitaire des CSERD

Sous-Section Sciences Biologiques

Docteur en Chirurgie Dentaire

Je tiens à vous remercier pour votre gentillesse et votre engagement dans mon Master M1 Biologie Santé et dans cette thèse, ainsi que pour les longs moments passés à disséquer des rats. Votre accueil et votre sympathie ont toujours été très appréciable. Je vous prie de trouver ici l'expression de mon profond respect.

Je dédie cette thèse

Tables des abréviations

ABP / DPA	Absorptiométrie biphotonique
AD	Profondeur antégoniaque
AI	Indice antégoniaque
ALP	Phosphatase Alcaline
AMP	Absortiométrie Monophotonique
ATM	Articulation Temporo-Mandibulaire
BMP	Bone Mineral Proteine
C	Canine
Ca	Calcium
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CBCT / TVFC	Cone-Beam Computed Tomography / Tomographie Volumique à Faisceau Conique
CMO / BMC	Contenu Minéral Osseux
CTCI	Indice Tomographique de l'indice cortical mandibulaire
CTI	Indice Tomographique par ordinateur
CTI (I)	Indice Tomographique Mandibulaire inférieur
CTI (S)	Indice Tomographique Mandibulaire supérieur
CTMI	Indice Tomographique de l'indice mentonnier
DMO	Densité Minérale Osseuse
DXA	Absorptiométrie biophotonique à rayons X
FD	Fractal Dimension
GI	Indice goniale
HA	Hydroxyapatite
ICTP	Télopeptides C-ter du collagène de type I
IL	Inter-leukine
LHRH	Inhibiteur de la pompe à proton
LRP	Low density Lipoprotéine Receptor
MABM	Masse osseuse alvéolaire mandibulaire
MCI	Indice corticale mandibulaire
MEC	Matrice extra-cellulaire
MI / MCW	Indice mentonnier
NPI	Valeurs d'intensité de pixels normalisées
NTX	Télopeptides N-ter du collagène de type I

ODM	Ostéodensitométrie
OP	Ostéoporose
OPG	Ostéoprotégérine
OPT	Orthopantomogramme
QCT	Tomodensitométrie quantitative
PDGF	Platelet of Derived Growth Factor
PI	Indice d'intensité de pixel
PICP	Propeptide C-ter du collagène de type I
PM	Pré-molaire
PMI	Indice panoramique mandibulaire
PTH	Parathormone
RANK-L	Receptor Activator of Nuclear Factor Kappa B-Ligand
ROI	Région d'intérêt
S1P	Sphingosine 1-phosphate
TGF β	Transforming Growth Factor Bêta
W	Epaisseur de la corticale

Table des matières

Tables des abréviations.....	12
Introduction.....	17
1. Généralités sur l'ostéoporose.....	18
1.1. Définitions de l'ostéoporose.....	18
1.2. Épidémiologie de l'ostéoporose (9–12).....	18
1.3. Physiopathologie du remodelage osseux.....	19
1.3.1. Le tissu osseux (13).....	19
1.3.2. Le remodelage.....	21
1.3.2.1. Phase d'activation.....	22
1.3.2.2. Phase de résorption du tissu osseux.....	23
1.3.2.3. Phase d'inversion.....	23
1.3.2.4. Phase de formation.....	24
1.4. Les facteurs causaux et mécaniques physiopathologiques de l'ostéoporose.....	25
1.4.1. Les étiologies (20).....	25
1.4.2. Les signes d'appel.....	27
1.5. Moyens d'évaluation de l'ostéoporose.....	28
1.5.1. L'évaluation par le dosage biologique (28,29).....	28
1.5.1.1. L'examen biologique de première intention.....	28
1.5.1.2. Rôle des marqueurs dans l'évaluation de la perte de DMO (30,31).....	28
1.5.2. Le bilan radiologique.....	30
1.5.2.1. L'examen de référence : l'absorptiométrie.....	30
1.5.2.1.1. Principes généraux de la DMO.....	30
1.5.2.1.1.1. Définitions.....	30
1.5.2.1.2. Évolution de la DMO au cours de la vie.....	31
1.5.2.1.3. L'indication de l'ostéodensitométrie dans le diagnostic de l'OP (45–47).....	32
1.5.2.1.4. L'imagerie de référence : Méthode DXA ou absorptiométrie biphotonique à rayons X (48,49).....	32
1.5.2.2. Examens alternatifs (50).....	33
1.5.2.2.1. Le scanner ou tomодensitométrie quantitative.....	33
1.5.2.2.2. L'ultrasonographie.....	34
1.6. Conclusion.....	35
2. La relation entre densité osseuse systémique et la densité osseuse orale.....	36
3. La radiographie panoramique.....	41
3.1. Principes généraux.....	41
3.2. Les principaux indices radiomorphométriques utilisés.....	42
3.2.1. L'indice cortical mandibulaire (MCI).....	42
3.2.2. L'indice Mentonnier.....	44
3.2.3. L'indice antégoniaque (AI).....	45
3.2.4. L'indice Gonioque (GI).....	46
3.2.5. L'indice Panoramique Mandibulaire (PMI).....	46
3.2.6. La profondeur antégoniaque (AD).....	47
3.2.7. L'indice M/M Ratio.....	47
3.2.8. L'angle gonioque et l'angle antégoniaque.....	48
3.2.9. Le « Pixel Intensity » (PI).....	48
3.3. Les méthodes d'évaluation des indices radiomorphométriques.....	49
3.4. Revue de littérature sur les indices radiomorphométriques des orthopantomogrammes et la détection précoce de l'ostéoporose.....	51

3.4.1. Corrélation des indices du remodelage osseux avec les marqueurs biologiques.....	51
3.4.2. Corrélation avec la DMO.....	52
3.4.2.1. Revue de littérature concernant le MCI.....	52
3.4.2.2. L'indice Mentonnier (MI ou MCW).....	54
3.4.2.3. L'indice Antégoniaque et l'indice Goniaque.....	55
3.4.2.4. L'indice panoramique mandibulaire.....	56
3.4.2.5. La profondeur antégoniaque, l'angle goniaque et l'angle antégoniaque.....	57
3.4.2.6. Le MM Ratio.....	58
3.4.2.7. L'indice d'intensité de Pixel (PI).....	59
3.5. L'influence des indices radiomorphométrique.....	60
3.5.1. L'âge.....	60
3.5.2. Le sexe.....	61
3.5.3. Influence de l'état dentaire.....	62
3.5.4. Influence de la classe sociale et de l'ethnie.....	64
3.6. Conclusion.....	65
4. Les radiographies intra-orales.....	67
4.1. Principes généraux.....	67
4.2. Les principaux indices radiomorphométrique utilisés.....	67
4.2.1. L'évaluation de la trabéculatation osseuse.....	68
4.2.2. La masse osseuse alvéolaire mandibulaire (MABM) par analyse photodensitométrie	68
4.2.3. L'indice d'intensité de pixel.....	69
4.2.4. L'indice de dimension fractale	69
4.3. Revue de littérature sur les indices radiomorphométriques des radiographies rétro-alvéolaires et la détection précoce de l'ostéoporose.....	70
4.3.1. L'indice d'évaluation de la trabéculatation osseuse.....	70
4.3.2. La masse osseuse alvéolaire mandibulaire (MABM) par analyse photodensitométrie	71
4.3.3. L'indice d'intensité de pixel (PI).....	71
4.3.4. L'indice de dimension fractale.....	72
4.4. Conclusion.....	73
5. Le Cone-Beam Computed Tomographie (CBCT).....	76
5.1. Principes généraux.....	76
5.2. Le CBCT dans la détection de l'ostéoporose.....	77
5.2.1. La détection de la DMO à partir du Cone-Beam.....	77
5.2.2. Les principaux indices radiomorphométrique utilisés lors tomographie par ordinateur (CTI) et la dimension fractale.....	78
5.2.2.1. Le CTI (S) : Computed Tomography Mandibular Index (Superior).....	79
5.2.2.2. Le CTI (I) : Computed Tomography Mandibular Index (Inferior).....	79
5.2.2.3. Le CTMI : Computed Tomography Mental Index.....	80
5.2.2.4. Le CTCI : Computed Tomography Cortical Index.....	80
5.2.2.5. La dimension fractale.....	80
5.2.3. Revue de littérature sur les indices radiomorphométriques du CBCT et la détection précoce de l'ostéoporose.....	81
5.2.4. Précaution d'utilisation du CBCT.....	81
5.2.4.1. Les erreurs « physiques » indépendante du CBCT.....	82
5.2.4.2. Les erreurs dues aux caractéristiques du CBCT.....	82
5.2.4.3. Les erreurs dues à la localisation de la zone étudiée.....	82
5.2.4.4. Les erreurs dues à la taille du champ de vision.....	83

5.2.4.5. La correction des erreurs.....	83
5.3. Conclusion.....	84
Conclusion.....	86
Références bibliographiques.....	88
Index des tableaux.....	103

Introduction

L'ostéoporose est une pathologie du squelette avec de lourdes conséquences aussi bien sur le risque de fracture que sur la qualité de vie (douleurs, impotence, perte d'autonomie et surmortalité en particulier secondairement aux fractures du col fémoral) (1).

Pathologie osseuse la plus fréquente, elle correspond à une maladie chronique du tissu osseux. La forme la plus courante est l'ostéoporose liée à l'âge, notamment chez la femme après la ménopause (ostéoporose post ménopausique) (2,3).

Il s'agit d'une atteinte dont la fréquence augmente proportionnellement à l'âge. L'âge moyen de la population française augmentant, la fréquence de survenue de l'OP est en conséquence en augmentation. Environ 1/3 des femmes européennes en post-ménopause et 1/8 des hommes après 50 ans auront une fracture ostéoporotique (4). L'impact de l'ostéoporose, qui touche sur nos pratiques et sur le système de santé va par conséquent s'accroître. L'ostéoporose est ainsi devenu un des problèmes de santé publique majeurs, pris en compte dans la loi du 9 août 2004 relative à la politique de santé publique. L'un des objectifs de cette loi était de « réduire de 10 % l'incidence des fractures de l'extrémité supérieure du fémur d'ici à 2008. »

Le diagnostic de l'OP peut survenir très tardivement puisque c'est une pathologie qui évolue à bas bruit et dont le diagnostic est souvent fait après une fracture.(5-7) Le diagnostic positif de l'OP est actuellement effectué par une ostéodensitométrie biphotonique à rayons X (ODM) qui est, depuis de nombreuses années, le gold standard dans le diagnostic de l'ostéoporose. En effet, cette technique présente de multiples avantages notamment sa précision, une irradiation minime, un balayage rapide et une possibilité de mesure de plusieurs sites (8). Néanmoins les recommandations concernant les indications de l'ODM étant trop précise, le diagnostic de l'ostéoporose reste tardif. Une détection précoce de l'ostéoporose semble s'imposer comme primordial.

Après avoir défini les caractéristiques de cette maladie générale, notre démarche sera d'évaluer le niveau de preuve de l'utilisation de radiographies dentaires (orthopantomogramme, radiographie intra-orale et cone-beam) et leur validité en tant qu'outil diagnostique dans le dépistage d'une ostéoporose. L'objectif est ainsi de vérifier d'une part si les différentes techniques peuvent être des signes d'appels d'une baisse de densité minérale osseuse, nécessitant ainsi la réorientation du patient chez un rhumatologue et la réalisation d'une ODM et d'autre part, si ces techniques peuvent s'appliquer dans la pratique courante de la chirurgie dentaire.

1. Généralités sur l'ostéoporose

Pour comprendre les mécanismes à l'origine de l'ostéoporose, il apparaît primordial de connaître la physiologie de l'os sain dans sa composante constitutive et fonctionnelle. Après une définition de l'ostéoporose, nous aborderons brièvement la physiologie de l'os sain avant de nous attacher à la description de la maladie ostéoporotique, de ses aspects physiopathologiques et de ses signes cliniques.

1.1. Définitions de l'ostéoporose

L'ostéoporose est défini selon l'OMS comme étant « une maladie diffuse du squelette caractérisée par une faible masse osseuse et une détérioration de la micro-architecture du tissu osseux, responsables d'une fragilité osseuse, donc d'une augmentation du risque de fracture » (1).

Les études montrent que le déterminant essentiel de la fragilité osseuse est la densité minérale osseuse (DMO) et que les fractures sont « la » complication de la maladie ostéoporotique et constituent toute la gravité de cette maladie.

1.2. Épidémiologie de l'ostéoporose (9–12)

L'ostéoporose a une prévalence augmentant avec l'âge à partir de 50 ans, parallèlement à l'incidence de fractures. L'ostéoporose touchait environ 3 millions de femmes ménopausées en France en 2009.

Cette ostéoporose touche 50 % des femmes après 60 ans (39% à 65 ans et autour de 70% après 80 ans), 20% des hommes, et on estime qu'elle est à l'origine de 130 000 fractures par an en France : environ 50 000 fractures fémorales, 35 000 fractures du poignet et 50 000 à 75 000 fractures vertébrales. Cependant, moins de 50 % des patients souffrant d'une fracture vertébrale consultent un médecin, ce qui fausse l'interprétation des données. Il s'agit donc d'un problème de santé d'envergure mondiale : on dénombre environ 1,6 millions de fracture de hanche par an dans le monde.

Les fractures ostéoporotiques, principalement les fractures fémorales, sont à l'origine d'une dégradation de la qualité de la vie, ainsi qu'une augmentation de la morbidité et de la mortalité (surmortalité de 20 % la première année après la fracture de l'extrémité supérieure du fémur). Des handicaps fonctionnels persistent après la fracture comme des tassements vertébraux, des fractures persistantes de poignet ou d'humérus (4).

Chez les femmes de plus de 45 ans, l'ostéoporose est à l'origine de davantage de journées d'hospitalisations que la plupart des autres pathologies y compris le diabète ou l'infarctus du myocarde. Le risque de fracture de hanche, chez la femme blanche, par rapport à l'espérance de vie est de 1 pour 6 femmes, soit un risque plus élevé que celui de développer un cancer du sein qui est de 1 pour 9 femmes.

Chez l'homme, l'incidence des fractures ostéoporotiques est environ 3 fois moins élevée que chez la femme, mais en revanche, l'incidence de mortalité précoce suivant la survenue d'une fracture de l'extrémité supérieure du fémur est environ trois fois plus importante chez l'homme que chez la femme, traduisant la grande fragilité des hommes victimes de ces fractures.

Compte tenu du vieillissement attendu de la population française, le nombre de fractures de l'extrémité supérieure du fémur devrait tripler d'ici 2050.

1.3. Physiopathologie du remodelage osseux

1.3.1. Le tissu osseux (13)

Le tissu osseux est un tissu conjonctif, en perpétuel remaniement, et ce tout au long de la vie, fonction des variations hormonales, des modifications locales inflammatoires et des contraintes mécaniques qui s'appliquent sur lui. Chez l'adulte, il possède une structure en proportion variable de 2 tissus osseux principaux :

- Le **tissu osseux cortical** (os compact) : il s'agit du tissu osseux dense situé sous le périoste de l'ensemble des os du squelette et majoritairement retrouvé dans les os longs dont il constitue la majeure partie de la diaphyse. Il est constitué d'unités structurales, les ostéons (ou systèmes de Havers) composés par un canal central (ou canal de Havers), lieu d'échanges vasculaires, et par des lamelles concentriques correspondant aux appositions successives d'os en périphérie et au sein desquelles sont emmurés les ostéocytes dans des lacunes (Illustration n°1).

Le tissu osseux cortical représente environ 80% du squelette et possède un niveau de remodelage lent, expliquant son implication moindre dans les atteintes du remodelage de l'ostéoporose.

- Le **tissu osseux trabéculaire** (os spongieux) : il s'agit d'un tissu osseux plus aéré, constitué de lamelles formant une trame irrégulière de minces colonnes de tissu osseux appelées trabécules, dont les espaces sont remplis de moelle hématopoïétique ou graisseuse. Il est moins abondant que l'os compact, mais il est présent en quantité importante dans les os courts, plats et irréguliers (13).

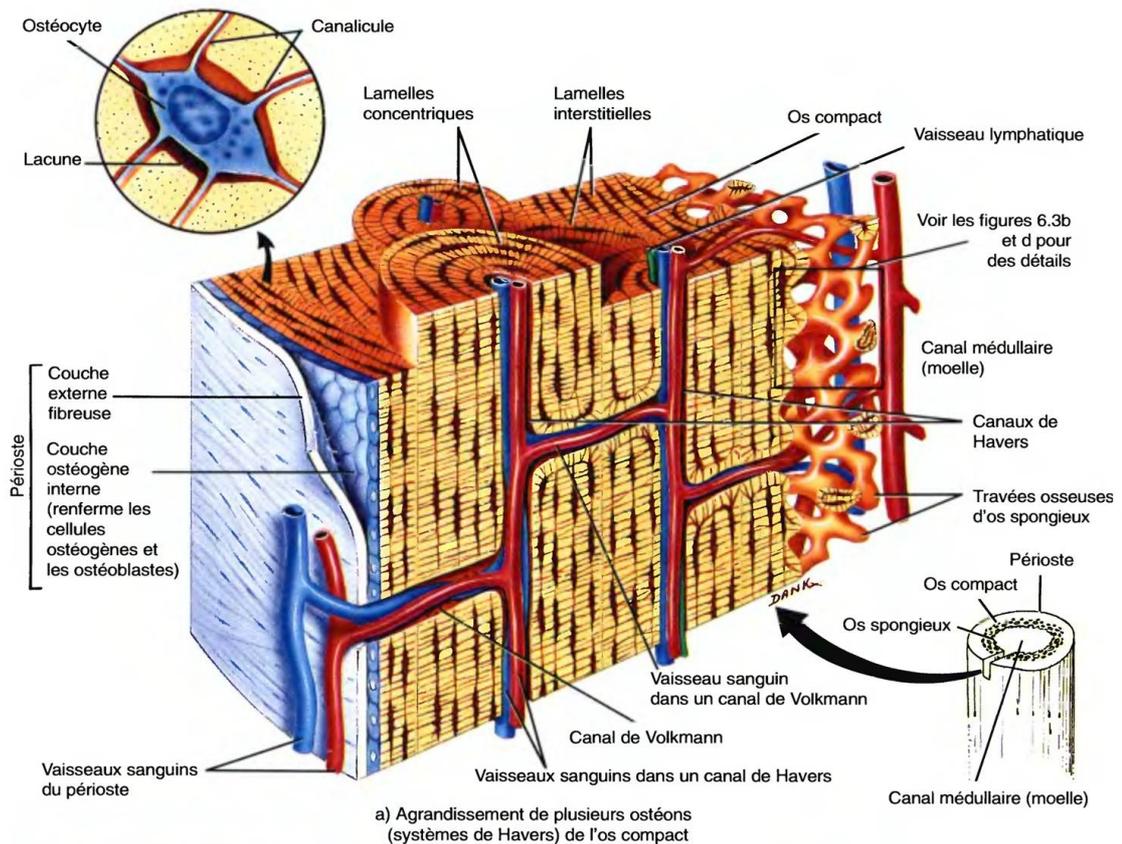


Illustration 1: Composition d'un tissu osseux d'après Mark (13)

Le tissu osseux trabéculaire possède un niveau de remodelage rapide, représente environ 20% du squelette et correspond au principal os touché lors de la maladie ostéoporotique. En effet, l'os trabéculaire est soumis à des régulations métaboliques plus importantes et à la régulation de la concentration en calcium (Ca). Il est donc plus rapidement et plus intensément touché par les variations du remodelage osseux (13).

Ce tissu osseux est entouré de deux enveloppes :

- Le **périoste** : c'est l'enveloppe externe de l'os qui le recouvre entièrement en dehors des surfaces articulaires et des insertions tendineuses et ligamentaires.
- L'**endoste** : c'est la face interne de l'os compact sur laquelle s'insère l'os trabéculaire limitant les cavités contenant la moelle hématopoïétique. C'est sur ces parois que des cellules bordantes viennent recouvrir 80% de la surface osseuse. Ces cellules correspondent ostéoblastes devenus progressivement plates, dont leur rôle, encore discuté, serait de moduler le remodelage à partir d'un pool de cellules ostéoblastiques en fonction de la sécrétion hormonale. Elles pourraient donc jouer un rôle majeur dans l'ostéoporose.

Le tissu osseux est composé de cellules osseuses (ostéoclastes, ostéoblastes, ostéocytes et cellules bordantes), d'une matrice osseuse et d'un micro-environnement médullaire (cellules stromales, cellules souches hématopoïétiques) à l'origine d'échange nutritif continue entre cellules et enveloppes.

1.3.2. Le remodelage

Le tissu osseux est un tissu dynamique remaniée tout au long de la vie à l'aide deux processus : le modelage et le remodelage.

Le modelage correspond à l'acquisition (durant la période embryonnaire) et au maintien (durant la période de croissance) de la micro-architecture osseuse ainsi que de sa morphologie. Il permet également l'ostéogenèse, qu'elle soit primaire ou secondaire. L'ostéogenèse primaire correspond soit à l'ossification membraneuse (à partir d'une ébauche mésenchymateuse) soit à l'ossification membraneuse (à partir d'une ébauche cartilagineuse). L'ostéogenèse secondaire correspond au renouvellement du tissu osseux primaire préexistant.

Le remodelage permet, quant à lui, le renouvellement osseux du tissu osseux ancien par un nouveau tissu osseux, grâce à une succession de phase de résorption et apposition, et ce, tout au long de la vie de l'individu.

Ce remodelage s'effectue grâce à des unités fonctionnelles, les cellules ostéoclastiques s'occupant de la résorption de l'os et les cellules ostéoblastiques permettant la synthèse d'une nouvelle matrice osseuse (Illustration n°2). Ces phases d'activités métaboliques sont couplées dans l'espace et le temps.

Parmi les cellules osseuses on distingue donc sur ce schéma :

- Les **osteoblastes** qui sont des cellules mésenchymateuses à l'origine de la sécrétion du tissu ostéoïde et de sa minéralisation. Elles possèdent de nombreux récepteurs aux œstrogènes et s'incorporent ensuite dans le tissu ostéoïde pour former des ostéocytes.
- Les **ostéocytes**, dérivés des ostéoblastes, qui siègent au sein des lacunes du tissu osseux, reliés entre eux par des ramifications servant de transport des substances organiques et inorganiques et à l'origine du signal transmis aux unités de remodelage présent à la surface de l'os.
- Les **cellules bordantes**
- Les **ostéoclastes**, dérivés de la lignée hématopoïétique, correspondent à des cellules géantes multinuclées, capable de résorber la matrice osseuse minéralisée à l'aide d'une pompe à proton relarguant des ions H⁺, suivi d'une digestion de la matrice collagénique, laissant place à une « lacune de Howship ».

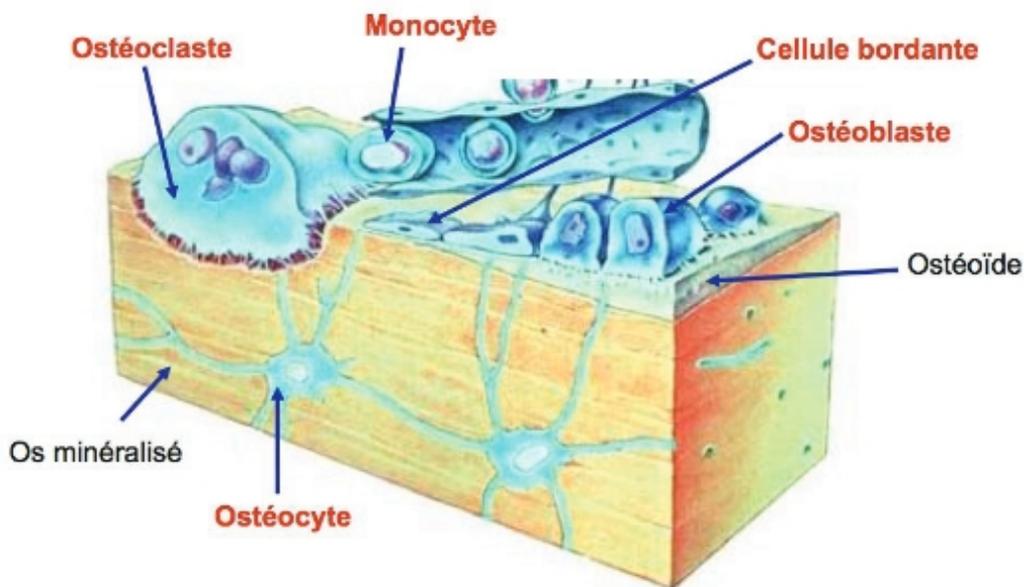


Illustration 2: Les cellules du tissu osseux (d'après Mark)

Le cycle de remodelage, mis en évidence par Baron, et également appelé « cycle **ARIF** », dure plus ou moins trois mois chez l'adulte. La phase de formation reste plus longue que la phase de résorption. On décompose ce cycle en 5 phases : L'activation, la résorption, l'inversion, la formation, la quiescence.

Les stimuli à l'origine de l'entrée en cycle sont multiples soit directe par une stimulation de l'os, soit indirecte par des facteurs généraux comme une variation de la concentration en calcium ionique, des changements vasculaires ou bien des modifications chimiques. Ces modifications entraînent alors l'induction des macrophages en ostéoclastes et des cellules mésenchymateuses indifférenciées en ostéoblastes.

1.3.2.1. Phase d'activation

La phase d'activation commence au niveau d'une surface osseuse, recouverte au départ de cellules bordantes. Les cellules bordantes vont permettre le recrutement de cellules ostéoclastiques (14).

En effet, un certain nombre de facteurs ostéorésorbants vont intervenir durant cette phase en agissant sur les cellules bordantes induisant la dégradation d'une fine couche de matrice non-minéralisée sous les cellules bordantes exposant la matrice à l'action des cellules ostéoclastiques. Parmi ces facteurs, on retrouve : PTH (parathormone), vitamine D3 et les prostaglandines E2.

Ainsi les précurseurs ostéoclastiques afflux sur la zone, se différencient en pré-ostéoclastes puis en ostéoclastes, sous l'influence du système RANK/RANK-L/OPG.

RANK-L est un ligand membranaire produit par les ostéoblastes qui se lie à son récepteur RANK présent sur la surface des précurseurs ostéoclastique, tandis que l'ostéoprotégérine (OPG) agit comme un inhibiteur de RANK-L.

La production de RANK-L et celle de l'ostéoprotégérine (facteur libéré par les ostéoblastes) sont sous la dépendance d'hormone notamment les œstrogènes et les cytokines (l'interleukine 6 (IL-6)) (15). La chute du taux d'œstrogène lors de la ménopause explique ainsi l'absence de régulation de la résorption osseuse, œstrogéno-dépendante, chez la femme ménopausée, et donc le déséquilibre entre formation et résorption induisant l'OP. (16–19)

De même, la hausse du taux d'IL-6 lors de pathologie inflammatoire est à l'origine d'un déséquilibre de la balance formation/résorption, induisant une perte osseuse et possiblement une OP secondaire.

1.3.2.2. Phase de résorption du tissu osseux

Les ostéoclastes formés, sont ensuite relâchés au niveau d'une travée osseuse et se fixent sur la matrice. Ils dissolvent par libération d'ion H⁺ la composante minérale de la matrice osseuse et on assiste ensuite à la dégradation sous l'action des enzymes lysosomiales de la matrice organique, créant ainsi une chambre de dissolution, appelé lacune de résorption ou lacune de Howship. Cette phase dure en moyenne 30 jours.

1.3.2.3. Phase d'inversion

La dégradation de la substance minérale osseuse induit la libération de facteur de croissance favorisant la lignée ostéoblastique, parmi lesquels on retrouve la sphingosine 1-phosphate (S1P), le platelet derived growth factor beta (PDGF), le TGFβ.

Les précurseurs de la lignée ostéoblastique sont alors attirés sur le site osseux. La différenciation et l'activation des ostéoblastes se feront également par la voie Wnt/β-caténine.

1.3.2.4. Phase de formation

La phase de formation débute par la multiplication de cellules ostéoblastiques qui vont venir s'agglutiner au niveau de la lacune de résorption au niveau de la ligne cémentante. Ces ostéoblastes vont ainsi synthétiser une matrice protéique non minéralisée appelé tissu ostéoïde.

Après 2 semaines, ce tissu néo-formé va se minéraliser, grâce à la phosphatase alcaline, par apposition d'hydroxyapatite sous la forme de cristaux aux seins des espaces interfibrillaires. Cette minéralisation va se diviser en une minéralisation primaire rapide et une minéralisation secondaire, plus lente, dont la durée sera fonction de la fréquence du remodelage.

Ce remodelage se fait de façon parallèle à l'homéostasie phosphocalcique (illustration n°3).

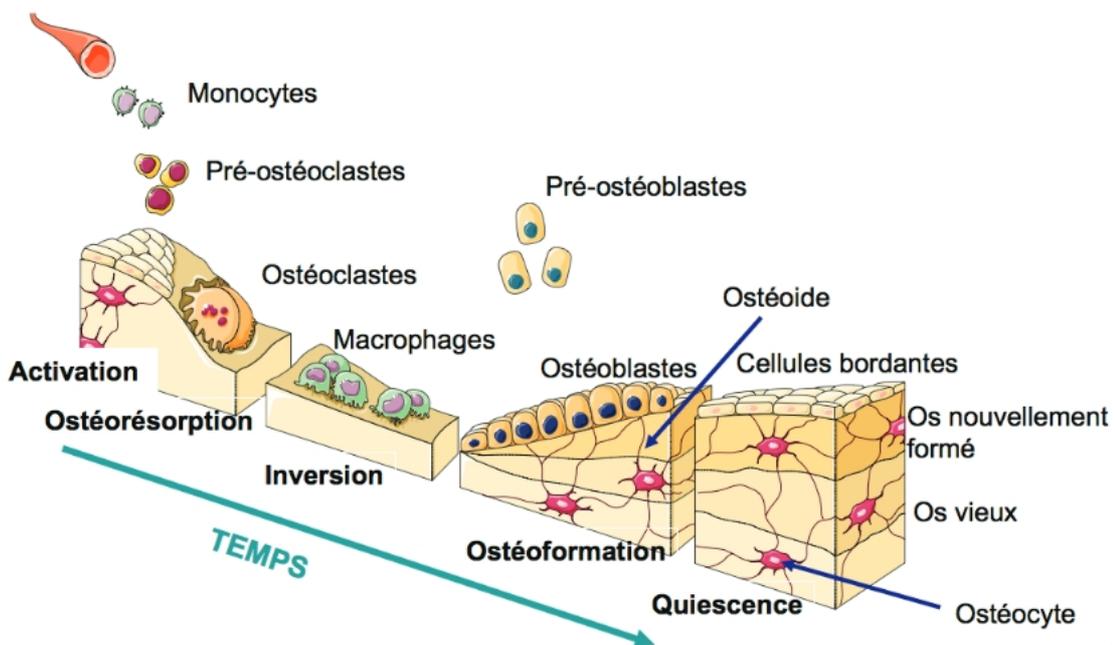


Illustration 3: Les différentes étapes du remodelage osseux (d'après Mark (13))

Il existe un équilibre entre les phases de formation et d'apposition, physiologique, permettant l'homéostasie du système phospho-calcique. En cas de déséquilibre, comme lors de la ménopause (où on assiste à une augmentation de la phase de résorption osseuse), ou lors d'une corticothérapie (où on assiste à une diminution de la formation osseuse), il se produit une perte osseuse.

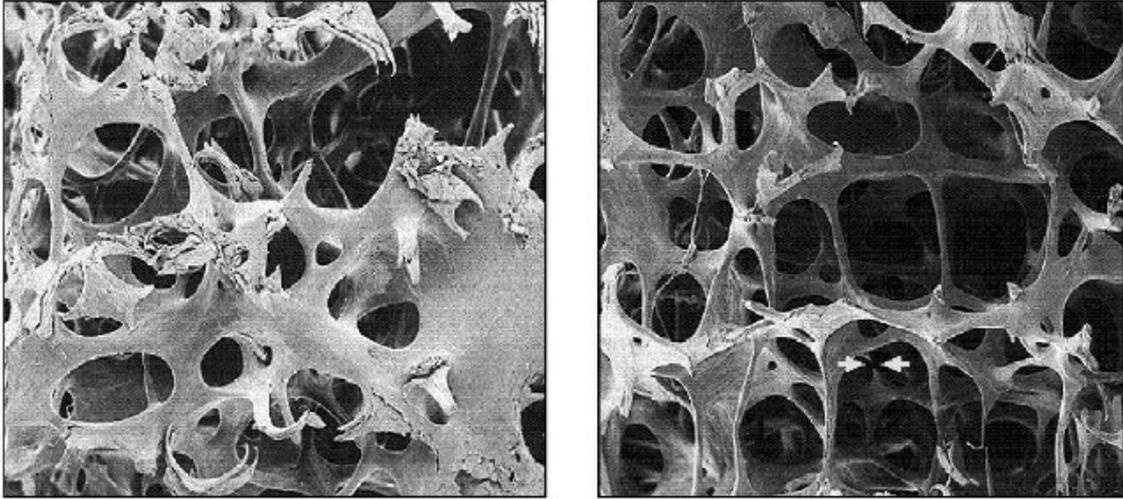


Illustration 4: Exemple de perte osseuse avec à gauche un os trabéculaire normal et à droite un os trabéculaire ostéoporotique avec un amincissement de l'épaisseur des travées représentées par les flèches (163)

La différence entre l'os sain et l'os ostéoporotique n'est pas uniquement d'ordre quantitatif mais elle est aussi qualitative. En effet, l'os ostéoporotique se caractérise par une augmentation de ses trabéculations osseuses et d'une modification de sa microarchitecture et de sa composition physico-chimique (illustration n°4).

1.4. Les facteurs causaux et mécaniques physiopathologiques de l'ostéoporose

1.4.1. Les étiologies (20)

On distingue une ostéoporose primitive retrouvée principalement chez la femme (en raison d'un mécanisme de remodelage davantage soumis aux variations hormonales et d'une espérance de vie plus élevée) d'une ostéoporose dite secondaire, plus fréquente chez l'homme (cause retrouvée dans environ 50 % des cas) (21–24)

Cependant plusieurs étiologies peuvent être concomitantes :

- **La carence en œstrogène/androgène** : elle est souvent assimilée au vieillissement dans les mécanismes de perte de la densité minérale osseuse, soit chez l'homme, avec une diminution progressive de la sécrétion d'androgène liée à l'âge, ou chez la femme avec une diminution brutale d'œstrogène à la ménopause. Ces phénomènes entraînent une augmentation du remodelage osseux induisant une altération de la microarchitecture osseuse avec une diminution de l'épaisseur corticale, du nombre et de l'épaisseur des travées osseuses et de manière plus générale, une diminution de la DMO.

- **L'hyperparathyroïdie secondaire** : Elle résulte de l'augmentation de parathormone, en réaction à une hypocalcémie. Cette carence en calcium, souvent induit par une insuffisance en vitamine D, entraîne la baisse de la capacité de synthèse liée au vieillissement.

Cette hyperparathyroïdie entraîne une augmentation de la phase de résorption du remodelage osseux induisant une perte osseuse corticale et trabéculaire. Le traitement de correction de l'hypocalcémie et du taux de vitamine D permet d'endiguer ce processus.

- **L'absence d'une activité physique** : Les pressions sur l'os dit « en charge » suite à une activité physique régulière, vont permettre une augmentation du gain de masse osseuse au cours de la croissance par stimulation de la formation et contribue ainsi à préserver le capital osseux à l'âge adulte.

Ainsi, l'immobilisation totale ou partielle (paralysie des membres inférieurs par exemple et/ou l'alitement prolongé), va entraîner une absence de stimulation de l'os induisant une perte osseuse.

- **La composante héréditaire** : On estime que le pic de masse osseuse a une composante héréditaire à hauteur de 80% du pic et qu'ainsi un sujet aux antécédents familiaux d'ostéoporose aura un risque de survenue plus élevé.

De même, de nombreuses études en cours montrent un possible lien entre des gènes du collagène de type I, du récepteur de la vitamine D, de l'IL1 (interleukine 1) et de l'estradiol et la survenue de l'ostéoporose : notamment des mutations sur les gènes LPR5 et LPR6 (low-density lipoprotein receptor) semblent corrélées avec un risque légèrement accru d'ostéoporose.

- **Les ostéoporoses secondaires** : les causes sont nombreuses et tendent à augmenter à l'avenir. Parmi les causes d'ostéoporose secondaire, on retrouve :

- les **endocrinopathies** : hypercorticisme spontanée (maladie de Cushing), l'hyperthyroïdie, l'hypogonadisme (syndrome de Klinefelter chez l'homme, anorexie mentale chez la femme)
- Les **ostéoporoses iatrogènes** : corticothérapie, antiaromatases, antiandrogènes, etc.
- Les **ostéoporoses génétiques** : maladie de Lobstein, ostéogénèse imparfaite, hémochromatose
- La mastocytose osseuse
- Les **addictions** : tabagisme, alcoolisme

La baisse de la DMO ou sa variation sous l'effet d'un traitement, n'explique pas entièrement le risque fracturaire et implique la présence de facteurs de risque (1,25–27) à prendre également en compte comme déterminant indépendant du risque de fracture. On distingue les facteurs liés à la DMO tels qu'une sédentarité, une précocité de la ménopause, une aménorrhée primaire ou secondaire, un déficit vitaminocalcique mais aussi des facteurs indépendants de la DMO tels que l'âge avancé, les antécédents personnels ou familiaux de fracture, un indice de masse corporelle très bas (retrouvé dans les anorexies mentales par exemple), la présence de troubles neuromusculaires ou orthopédiques, d'une hyperthyroïdie ou d'une polyarthrite rhumatoïde, la présence d'un traitement par corticoïdes, la consommation excessive de tabac, alcool, sel et café ou encore le mauvais état de santé.

L'ensemble de ces facteurs doivent interpeller le praticien et sont à inclure dans la réflexion de prise en charge, pour référer le patient en cas de risque trop important.

1.4.2. Les signes d'appel

La symptomatologie apparaît soit de façon spontanée ou après un traumatisme mineur. Elle peut être composée de douleur de type osseuse localisée, plus ou moins vives, de tassements vertébraux à l'origine d'une diminution de taille, d'une incapacité fonctionnelle plus ou moins invalidante et d'irradiation de l'extrémité des membres.

On peut remarquer au niveau de la qualité des clichés radiologiques des signes également tel qu'une diminution de la densité osseuse (si la perte est supérieure à 30% de la masse osseuse), un amincissement de la corticales des os longs, un aspect peigné des vertèbres et un liseré dense du pourtour vertébral (illustration n°5).



Illustration 5: Aspect peigné des vertèbres (164)

1.5. Moyens d'évaluation de l'ostéoporose

1.5.1. L'évaluation par le dosage biologique (28,29)

1.5.1.1. L'examen biologique de première intention

L'exploration biologique n'est pas suffisante dans le diagnostic de l'ostéoporose mais reste un élément utile dans la détection de cause d'ostéoporose secondaire (exemple : problème thyroïdien) et dans le suivi du traitement.

Il n'existe pas de consensus sur les examens systématiques à effectuer mais un bilan biologique peut être proposé pour déterminer les facteurs étiologiques externes de l'OP. Il est composé de :

- Un **hémogramme** (NFS-plaquettes, VS, électrophorèse des protéines sériques) afin d'éliminer une ostéopathie maligne (myélome ou métastases)
- Un dosage de la calcémie, de la phosphatémie, des gamma GT, des transaminases, de la créatininémie avec estimation de la clairance afin d'éliminer une anomalie du métabolisme phosphocalcique
- Un dosage de la 25-hydroxy vitamine D, afin d'éliminer une insuffisance sévère en vitamine D
- Un dosage sur les urines des 24 heures : calciurie et créatinurie, afin d'évaluer la fonction rénale
- Un dosage des phosphatases alcalines afin d'éliminer une ostéomalacie et une maladie de Paget

1.5.1.2. Rôle des marqueurs dans l'évaluation de la perte de DMO (30,31)

Comme vu précédemment, une perte de masse osseuse, qu'importe son origine, est issue d'un déséquilibre entre l'activité ostéoblastique (de formation osseuse) et l'activité ostéoclastique (de résorption osseuse).

La physiologie osseuse entraîne la libération de produits retrouvés dans le sang et les urines, dosables, qu'on appelle marqueurs osseux. Ces marqueurs, une fois dosés, permettent de mettre en évidence la vitesse du remodelage osseux ainsi que l'efficacité des traitements. Des techniques de dosages biologiques ont permis d'évaluer les deux types cellulaires et de déterminer l'activité de ses marqueurs osseux. (30–33) Ce sont des évaluations non invasive, qui peuvent être :

- L'étude de l'**activité enzymatique associée aux cellules** : Phosphatase alcaline osseuse pour la formation et phosphatase acide tartrate-résistante pour la résorption.

- L'étude d'un **constituant de la matrice extra-cellulaire** : Ostéocalcine pour les ostéoblastes et hydroxyproline, désoxypyridinoline (DPD) pour les ostéoclastes.
- L'étude des **constituants cellulaire** : P1NP (Procollagen type I propeptides) pour la formation et les télépeptides associés, CTX et NTX, pour la résorption

Leurs performances sont retrouvés dans le tableau n° 1.

<u>Marqueurs Osseux</u>	<u>Fonctions étudiées</u>	<u>Sensibilité</u>	<u>Spécificité</u>
Phosphatase alcaline sérique total (34)	Activité ostéoblastique	Faible (variable en post prandiale)	Faible (retrouvé dans le foie et les intestins)
Isoenzyme osseuse de la phosphatase alcaline (34)		Bonne	Correcte
Ostéocalcine (34–36)		Bonne	Bonne (dosage uniquement sérique)
Peptide d'extension du collagène I : CTX & NTX (35–40)		Faible	Bonne
Calciurie(34,36)	Activité ostéoclastique	Faible (dosage à jeun et variabilité)	Bonne (spécifique des urines)
Hydroxyproline urinaire		Faible	Faible (présence non spécifique du collagène de type 1)
Phosphatase alcaline plasmatique(39,40)		Bonne	Faible (contribution plaquettaire)
Pyrodinoline urinaire(34)		Bonne	Faible (tissu osseux et cartilagineux)
Deoxypyridinoline (38)		Bonne	Bonne

Tableau 1: Évaluation de la sensibilité et de la spécificité des différents marqueurs osseux de l'ostéoporose

L'interprétation des marqueurs dans l'évaluation du risque fracturaire ainsi que dans le suivi des femmes sous anti-résorptifs est parfois difficile en raison d'une mauvaise sensibilité ou d'une mauvaise spécificité, qui entraîne la présence de nombreux faux positif et faux négatif. Chez une femme âgée ménopausée, une résorption osseuse élevée est corrélée à une augmentation du risque fracturaire au niveau de la hanche indépendamment de la densité minérale osseuse.

Ainsi, même si le dosage est utilisé pour le suivi des femmes traitées sous antirésorptifs, une nouvelle méthode d'évaluation gagnerait à améliorer la prise en charge des femmes ménopausées.

La corrélation entre les marqueurs biochimiques du remodelage osseux et le risque de fractures ostéoporotiques a été évoquée dans plusieurs études (38,41,42).

Les marqueurs biochimiques du remodelage osseux tendent à se modifier chez la femme à la ménopause puis progressivement avec l'âge : chez l'homme, ces variations se produisent plus tard, après 70 ans (43,44).

1.5.2. Le bilan radiologique

1.5.2.1. L'examen de référence : l'absorptiométrie

1.5.2.1.1. Principes généraux de la DMO

1.5.2.1.1.1. Définitions

Le diagnostic d'ostéoporose se définit à partir de résultats densitométrique, c'est à dire après mesure de la densité minérale osseuse ou DMO. Cette définition s'applique exclusivement après avoir éliminé les autres causes de diminution de la DMO, à savoir les ostéopathies fragilisantes (ostéomalacie, affections malignes).

La densité minérale osseuse d'un individu peut être exprimée de différentes façons :

- Étant donné que les valeurs normales diminuent en fonction de l'âge, les résultats de la DMO sont habituellement exprimés en Z score. Le Z score représente ainsi la différence entre la valeur mesurée et la valeur moyenne théorique ajustée en fonction de l'âge et du sexe. Cette différence est exprimée en fractions d'écart-type. Le Z score intègre donc pour un âge donné, la variance de la densité minérale osseuse de la population normale ainsi que la diminution physiologique de la DMO liée à l'âge.

Il sera donc utilisé chez les femmes avant la ménopause et les hommes de moins de 50 ans.

- L'autre expression de la DMO exprime les résultats en T-score. Il correspond à la différence entre la valeur mesurée et la moyenne de la masse osseuse des femmes jeunes normales (pic de masse osseuse) et est donc indépendant de l'âge. Le T score exprimé en fractions d'écart-type est donc indépendant de l'âge.

Il sera utilisé principalement chez les femmes ménopausées et les hommes de plus de 50 ans

L'expression de la DMO en T-score permet le diagnostic de l'ostéoporose à partir de la classification suivante, décrite par l'OMS :

Normalité	T-score > -1
Ostéopénie	-1 > T-score > - 2,5
Ostéoporose	T-score < - 2,5
Ostéoporose sévère ou confirmée	T-score < -2,5 et présence d'une ou plusieurs fractures

1.5.2.1.2. Évolution de la DMO au cours de la vie

La densité minérale osseuse (DMO) évolue au fur et à mesure de l'âge en plusieurs phases. On les retrouve facilement dans l'illustration n°6. On observe :

- Une **phase de croissance osseuse** avec acquisition du pic de masse osseuse parallèlement à la croissance du squelette. Le pic de masse osseuse est atteint, dans les 2 sexes, avant la vingtième année.
- Une **phase de stabilité** pendant 10 à 15 ans avec une perte très légère de la masse osseuse
- Une **phase de perte osseuse lente** jusqu'à la cinquantaine, début du vieillissement cellulaire où on observera une perte au rythme de 0,1 à 0,3 % par an.
- Une **phase de perte osseuse rapide** (environ 2 à 3 % par an au rachis) chez la femme exclusivement pendant les 8 à 10 ans suivant la ménopause
- Une **phase tardive** de perte osseuse régulière (0,5% par an), équivalente chez l'homme et la femme associée au vieillissement.

Le pic de masse osseuse est déterminé, en partie, par la génétique, mais il reste influencé par des critères environnementaux (nutrition et activité physique).

Ainsi, les sujets qui ont un pic de masse osseuse maximale faible sont probablement plus susceptibles d'être ostéoporotique que les autres.

C'est pourquoi, on comprend facilement que la diminution de la DMO peut être sans gravité pour de nombreux patients mais si cette diminution est associée à une DMO basse ou à certains facteurs de risques, une ostéoporose pourra se constituer.

Cette ostéoporose ne pourra que s'accroître avec l'âge et sera d'autant plus marquée que le nombre de facteurs de risque est important.

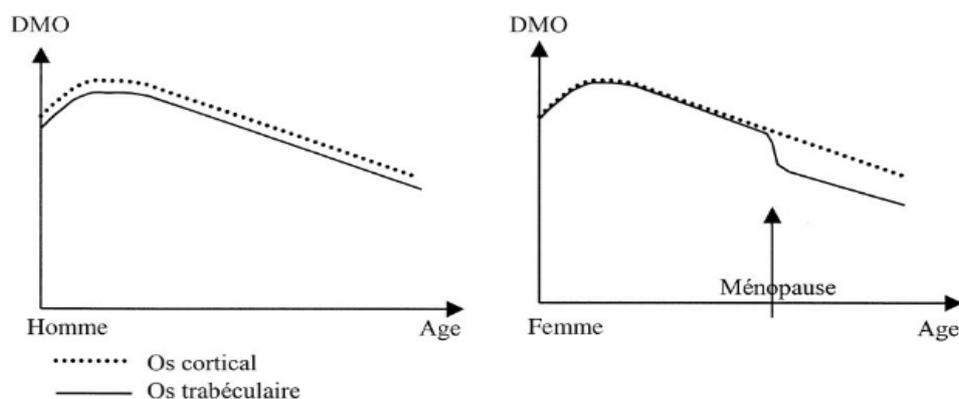


Illustration 6: Evolution de la densité minérale osseuse (DMO) chez l'homme et la femme au cours de la vie en fonction de l'âge d'après le COFER (165)

1.5.2.1.3. L'indication de l'ostéodensitométrie dans le diagnostic de l'OP (45–47)

L'ostéodensitométrie est indiquée en cas de :

- Découverte ou confirmation radiologique d'une fracture vertébrale (avec une déformation du corps vertébral) sans contexte traumatique ni tumoral évident.
- Antécédent personnel de fracture périphérique survenue sans traumatisme majeur à l'exception des fractures du crâne, des orteils, des doigts et du rachis cervical

Devant des signes d'ostéoporose, les recommandations actuelles préconisent la recherche d'une maladie responsable d'une ostéoporose secondaire, ou d'une cause tumorale ou traumatique de fracture.

En revanche, l'ostéodensitométrie est peu indiquée dans le suivi des patients. Seules quelques situations peuvent être soumises à une réévaluation du risque fracturaire, conduisant ainsi à la réalisation d'une deuxième ostéodensitométrie. Les deux indications sont les suivantes :

- En cas d'arrêt d'un traitement anti-ostéoporotique, à l'exception de l'arrêt du traitement de façon précoce (en raison d'un effet indésirable par exemple).
- En cas d'apparition de nouveaux facteurs de risques, 3 à 5 ans après une première ostéodensitométrie, ne montrant qu'une valeur normale ou une ostéopénie, et sans traitement associé.

La mesure densitométrique par la méthode DXA dans le suivi de l'efficacité d'un traitement ou dans l'appréciation de son observance, n'est cependant pas indiquée.

1.5.2.1.4. L'imagerie de référence : Méthode DXA ou absorptiométrie biphotonique à rayons X (48,49)

Parmi les instruments qui ont été développés pour mesurer la densité minérale osseuse, la DXA (absorptiométrie à rayons X double énergie) représente la technique la mieux développée sur le plan technique et la mieux validée sur le plan clinique. Elle représente ainsi la technique de référence de l'évaluation de la DMO.

Les appareils de DXA mesurent le contenu minéral osseux (hydroxyapatite) rapporté à une surface, il s'agit donc d'une densité surfacique (exprimée en g/cm²).

La méthode DXA permet également de faire une évaluation morphométrique des déformations vertébrales à la colonne thoracique (jusqu'en T7) et lombaire. Enfin, une association significative a été retrouvée entre la mesure de la DMO par l'absorptiométrie biphotonique à rayons X et le risque de fracture du col du fémur, ce qui en fait ainsi le paramètre le plus prédictif du risque fracturaire

Les résultats d'une étude française réalisée à partir d'une cohorte montrent que la diminution de la DMO mesurée par DXA au niveau du col fémoral et du corps entier est associée de façon significative au risque de fracture du col du fémur, même chez les femmes très âgées. Cette étude prouve que la mesure de la DMO au niveau du grand trochanter constitue le paramètre le plus prédictif de fracture (9).

La technique d'absorptiométrie possède néanmoins des limites :

- La valeur de la densité minérale osseuse est dépendante du type d'appareil et de l'opérateur ainsi que du positionnement du patient
- Les mesures de références, utilisé pour le calcul du T-score, ont été effectuées sur des populations de sujets différents selon les marques.
- La présence d'ostéophytes, de scolioses, de déformations vertébrales ou bien de calcifications extra-squelettiques, courantes chez les sujets âgés ménopausés, induit une baisse de précision de la mesure de la densité minérale osseuse, au niveau du rachis lombaire.
- La DMO peut varier selon le site mesuré chez un même individu.

1.5.2.2. Examens alternatifs (50)

1.5.2.2.1. Le scanner ou tomодensitométrie quantitative

La tomодensitométrie quantitative mesure séparément l'os cortical et l'os trabéculaire (en éliminant les calcifications aortiques) et donne une mesure de la densité osseuse volumétrique. Elle est appliquée à la colonne lombaire et à l'avant-bras mais son utilisation est limitée par l'irradiation élevée et par une moins bonne reproductibilité que les autres techniques. Elle ne doit pas constituer un choix de première intention dans le dépistage des ostéoporoses mais pourrait servir de détection si elle est indiquée pour une autre cause.

Le scanner, ou tomодensitométrie quantitative, a vu son utilisation détournée afin de quantifier l'absorption de radiations par les tissus calcifiés. Il permet l'évaluation de la densité minérale osseuse volumétrique (c'est à dire de façon tridimensionnelle), reflétant une densité vraie, contrairement à l'ABP et la méthode DXA, qui mesure exclusivement en deux dimensions.

La tomодensitométrie mesure distinctement l'os cortical et l'os trabéculaire, éliminant les surestimations provoquées par les calcifications, par les apophyses et par les lames.

En raison également du coût, et des paramètres moins bons que ceux de la méthode DXA, le scanner de la colonne vertébrale ne constitue pas l'examen de première intention dans le diagnostic du risque ostéoporotique chez la femme ménopausique ou dans le suivi de l'efficacité d'un traitement.

1.5.2.2.2. L'ultrasonographie

La mesure de la masse osseuse à partir des ultrasons présente l'avantage de renseigner sur la densité minérale osseuse mais également sur la qualité de l'os (à savoir son architecture et son élasticité), tout en étant non irradiante, simple de réalisation et peu onéreuse.

Cette technique est appliquée au niveau de la rotule, du calcanéum, du tibia et des phalanges. La vitesse des ultrasons (exprimée en m/s) reflète ainsi la densité de l'os, ainsi que son élasticité.

L'atténuation des ultrasons appliqués au calcanéum montre des résultats semblables à ceux réalisés par DXA. Elle donnerait ainsi également des informations sur l'architecture de l'os spongieux (au niveau de l'espacement et de la continuité des travées). Les études montrent qu'il est possible de distinguer un sujet normal d'un sujet ostéoporotique et que la mesure ultrasonique au niveau du talon était prédictive du risque fracturaire du col fémoral avec un risque relatif équivalent à celui du DXA.

L'ultrasonographie reste cependant une technique avec des problèmes techniques de positionnement et de variabilité anatomique du calcanéum. De plus, les études ne permettent pas d'extrapoler les résultats dans le suivi thérapeutique de l'ostéoporose. Elle est plus utilisée ainsi à des fins de recherches cliniques.

1.6. Conclusion

En conclusion, l'OP est une pathologie systémique qui a de graves conséquences, et qui est à l'origine d'un risque de mortalité et de fractures supérieurs à la population générale. Beaucoup de méthodes ont été utilisées (aussi bien biologique que radiologique) pour permettre sa détection le plus précocement possible.

Cependant, bien qu'une référence existe avec l'absorptiométrie biphotonique à rayon X, l'indication de cet examen reste limitée et bon nombre de patients sont victimes de fractures car aucune détection précoce n'a eu lieu. Cette pathologie entraîne donc un problème de santé publique difficilement gérable.

L'OP présente pourtant des signes d'alarmes aussi bien cliniques que radiologiques qui pourraient interpeller l'ensemble des professions de santé.

Les chirurgiens-dentistes sont les professionnels de santé prescrivant le plus d'examen radiologiques, à travers l'utilisation de radiographies péri-apicales, de radiographies panoramiques ou encore de tomographie volumique à faisceau conique. Nous pouvons ainsi nous poser la question de savoir si cette ostéoporose pourrait toucher également les os au niveau de la cavité buccale (maxillaire, mandibule) ? Et, est-ce que cette atteinte des os de la cavité buccale est visualisable lors des radiographies effectuées en routine par les chirurgiens-dentistes ?

2. La relation entre densité osseuse systémique et la densité osseuse orale

L'ostéoporose se caractérise par une diminution de la densité minérale osseuse systémique (DMO) (1).

Classiquement, l'évaluation de la DMO, d'après les recommandations de l'ANAES, doit être effectuée en clinique humaine au niveau de deux sites de mesure : le rachis lombaire et l'extrémité supérieure du fémur. Dans certains cas l'interprétation de la mesure est impossible en ces sites, et une mesure du radius peut alors être réalisée (51).

Néanmoins, cette diminution de densité minérale osseuse a été également reportée dans le cadre de l'ostéoporose au niveau de l'ensemble des os du squelette (52).

Les relations entre l'ostéoporose et la diminution de la DMO de l'os alvéolaire ont également été étudiées aussi bien dans des modèles animaux (17,53–55) que chez l'homme (56–66). Dès 1960, GROEN et al (67), a décrit une relation entre la perte osseuse alvéolaire et l'ostéoporose.

Ainsi, les études permettent-elles de mettre en évidence une diminution significative de densité minérale osseuse de la mandibule évaluée par tomодensitométrie, en cas d'ostéoporose ? Comment est évaluée la DMO ? Ces méthodes sont-elles réalisables en clinique humaine ?

Les études chez l'animal (lapins, moutons, rats) ont pour avantage de standardiser les conditions expérimentales et d'évaluer strictement les liens entre la déficience hormonale ostéogénique (ovariectomie simulant une ostéoporose ménopausique ou non) et la baisse de densité minérale osseuse (17,53–55). Différents sites osseux (fémur, radius) ont pu être comparés *ex vivo* à la mandibule, à différents intervalles de temps soit par tomодensitométrie quantitative (QCT) soit par absorptiométrie biphotonique à rayon X (tableau n°2).

Etude	Population d'étude	Durée d'étude	Méthode d'évaluation	Résultats
TANAKA et al (2002) (55)	Rates adultes Ovariectomisées (n = 8) versus témoins sham (n = 8) Mandibule	60 jours	Histomorphométrie	Diminution significative des paramètres quantitatifs et qualitatifs osseux dans le groupe ovariectomisé
CAO et al (2001) (53)	Lapins femelles adultes (Ovariectomisées n=12) versus témoins sham (n=12). Mandibules édentées	4 et 12 semaines	QCT	Diminution significative de la DMO mandibulaire dans le groupe ovariectomisé. Diminution de la DMO augmente avec le temps.
JOHNSON et al (2002) (17)	Brebis femelles adultes Ovariectomisées (n=6) versus témoins sham (n=6). Radius/ulna et mandibule .	12 mois	QCT Dosage sanguins	Diminution significative de la DMO mandibulaire et du radius dans le groupe ovariectomisé.
KURODA et al (2003) (54)	Rates adultes ovariectomisées versus témoins sham. Fémurs et mandibules (condyle, région molaire)	109 jours	DXA QCT	Baisse de la DMO fémorale et condyalaire respectivement de 30% et de 12,5%, très faible au niveau molaire.

Tableau 2: Synthèse des études animales sur la relation entre DMO systémique et DMO mandibulaire (DMO = Densité Minérale Osseuse ; QCT = Tomodensitométrie quantitative ; DXA = Absorptiométrie biophotonique à rayons X)

La carence en œstrogène chez l'animal aboutirait à une baisse de la DMO de l'os trabéculaire/alvéolaire mandibulaire (17,53,55) et s'aggrave avec le temps (53). Cependant les variations de la DMO au niveau mandibulaire semblent être mineures dans le cas de la persistance d'une stimulation fonctionnelle liée à la présence des dents (occlusion) (53,54).

Qu'en est-il chez l'Homme ? Les variations de la DMO sont-elles détectables au niveau de l'os trabéculaire/alvéolaire de la mandibule ? Les stimulations mécaniques masquent-elles les effets de l'ostéoporose ? Existe-t-il des possibilités de l'utilisation d'une méthode de détection des variations de densité minérale osseuse ?

Des auteurs (57–66) ont essayé de proposer des études sur modèle humain pour tenter de prouver les liens entre la DMO d'os du squelette et de la mandibule. La principale difficulté est de réaliser des cohortes homogènes de patients pour une comparaison fiable entre ostéoporotiques et témoins. De plus, les méthodes d'analyse devront être pertinentes pour une utilisation en clinique humaine. Ainsi, les scores de la DMO évalués par ostéodensitométrie classique seront comparés à la DMO mandibulaire évaluée soit par absorptiométrie biphotonique (DPA) (56–58), soit par tomodynamométrie quantitative (59–61,63) ou soit par radiographies intra-orales (64,65).

L'ensemble des résultats est présenté dans le tableau n°3.

Auteurs	Population d'étude	Méthode d'évaluation	Résultats
VON WOWERN et al (1985) (56)	Prélèvements de mandibule et du radius	DPA	Corrélation positive entre les mesures de la masse osseuse mandibulaire et du radius
VON WOWERN et al (1988) (57)	Prélèvements de mandibule et des vertèbres	DPA	Absence de corrélation entre la DMO de la mandibule et des vertèbres.
KRIBBS et al (1990) (58)	50 femmes saines âgées de 20 à 90 ans	DPA	Corrélation positive entre la masse osseuse mandibulaire et la masse osseuse squelettique
KLEMETTI et al (1993) (59)	77 femmes ménopausées	QCT DXA	Corrélation positive entre la DMO mandibulaire mesuré par QCT et la DMO des autres sites osseux mesurés par DXA
CORTEN et al (1993) (60)	4 patients	DXA	Utilisation possible de la méthode DXA pour la mesure de la DMO mandibulaire
HORNER et al (1996) (61)	40 femmes	DXA	Corrélation positive entre la DMO mandibulaire par méthode DXA et la DMO des autres sites osseux Bonnes sensibilité (0,8) et spécificité (0,98) de la mesure au niveau du corps mandibulaire
STRECKFUS et al (1997) (62)	28 femmes de 23 à 78 ans	NP*	Corrélation positive entre la DMO de l'os alvéolaire et celle du second métacarpe
HORNER et DEVLIN (1998) (63)	NP*	DXA	Corrélation positive entre la DMO mandibulaire et la DMO des vertèbres lombaires, de celle de l'avant bras et du col du fémur.
SOUTHARD et al (2001) (64)	41 femmes caucasiennes en bon état général de 20 à 78 ans	DXA Radio intra-orales	Corrélation positive entre la DMO des procès alvéolaires maxillaires avec la DMO des procès mandibulaires mais aussi avec celles du fémur, des vertèbres et du radius.
SHROUT et al (2000) (66)	45 femmes ménopausées sans problème parodontal	NP*	Corrélation positive faible entre la DMO mandibulaire et la DMO du rachis lombaire et du fémur
JEFFCOAT et al (2000) (65)	158 femmes ménopausées âgées d'environ 62,2 ans (+/- 7,6 ans)	DXA Radio intra-orales	Corrélation positive entre la DMO mandibulaire et la DMO de la hanche.

Tableau 3: Synthèse des études humaines sur la relation entre DMO systémique et DMO mandibulaire (NP* = non précisé ; DMO = Densité Minérale Osseuse ; QCT = Tomodensitométrie quantitative ; DXA = Absorptiométrie biophotonique à rayons X ; DPA = Absorptiométrie biphotonique)

Tout d'abord, les études de VON WOWERN ont testé les relations entre les mesures ex vivo de la DMO mandibulaire avec d'autres sites osseux et ont montré une corrélation significative avec le radius (56) et une absence de corrélation avec les vertèbres (57).

Ensuite, la majorité des études in vivo établirait des corrélations entre la densité minérale osseuse mandibulaire et la densité minérale osseuse d'autres sites osseux (56–63). De nombreuses méthodes (DXA, DPA, QCT) semblent ainsi donner de bons résultats dans l'évaluation de la DMO. Néanmoins, ces études, le plus souvent transversales et difficilement comparables du fait de la variabilité des méthodes d'analyse et des caractéristiques des patients mériteraient d'être confirmées pour des études longitudinales avec des effectifs plus conséquents.

Enfin, l'utilisation des radiographies intra-orales a également été envisagée et mis en évidence une corrélation positive entre la DMO mandibulaire et de la hanche (65), son utilisation pour la détection des baisses de DMO squelettique pourrait donc être discuté. Cependant, là encore, l'étude note un faible échantillon et recommande donc une étude sur plus grande population pour confirmer cette tendance.

En conclusion, on peut affirmer qu'une association entre la DMO systémique et mandibulaire existe, et que la diminution de la DMO lors de l'ostéoporose serait non seulement présente au niveau des os du squelette mais également au niveau de l'os alvéolaire mandibulaire.

L'utilisation du site mandibulaire semble donc légitime dans l'utilisation clinique potentielle des radiographies dentaires comme outil de diagnostic de l'ostéoporose.

CE QU'IL FAUT RETENIR :

Les variations de la DMO mandibulaire est en corrélation avec la DMO des autres sites du squelette, c'est à dire que l'ostéoporose semble impacter non seulement les os longs et vertébraux mais également la mandibule.

Une méthode d'évaluation de la DMO mandibulaire pourrait donc permettre une amélioration de la prise en charge des patients souffrant d'ostéopénie ou d'ostéoporose en permettant une détection et une prise en charge plus précoce de la maladie.

3. La radiographie panoramique

3.1. Principes généraux

Le « panoramique dentaire » est une méthode d'exploration d'imagerie dentaire extra-orale, appelée également orthopantomogramme (OPT), qui à partir d'un seul film, et d'une faible exposition de dérouler l'image des arcades maxillaires et mandibulaire d'une articulation temporo-mandibulaire (ATM) à l'autre.

Le panoramique dentaire n'est pas un simple cliché de projection sur une plaque sensible, c'est une tomographie à coupe épaisse. La tomographie se définissant comme une technique permettant d'obtenir sur le cliché radiographique une image nette d'une seule coupe, plus ou moins épaisse, de l'objet examiné, en supprimant les superpositions gênantes.

C'est une zonographie courbe qui permet d'explorer uniquement les éléments dans l'épaisseur de la coupe. L'acquisition du cliché extra-buccal, se fait par rotation du tube à rayon X autour de l'élément à radiographier comme présenté illustration 7.

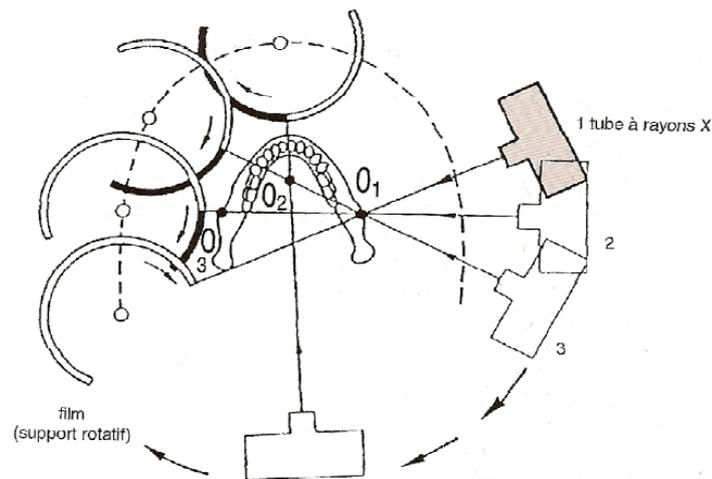


Illustration 7: Schématisation de l'orthopantomographie d'après PAATERO (1957) (166)

La radiographie panoramique constitue un examen de base de tout bilan maxillo-dentaire en permettant la visualisation globale de l'ensemble des structures dento-maxillaire.

A partir de la visualisation des structures osseuses, l'usage de la radiographie panoramique dentaire a été envisagé dans l'étude de la baisse de DMO mandibulaire chez les patients ostéoporotiques.

Selon HANS et al (68) ou encore ISHII et al (69), en raison d'une utilisation en routine en cabinet dentaire, le panoramique dentaire possède un faible coût et une alternative facilement accessible, en comparaison au DXA.

Ainsi, depuis le début des années 1990, de nombreuses études ont évalués la validité de l'utilisation du panoramique dentaire comme moyen de détection de l'ostéoporose (70–73). De nombreux indices radiomorphométriques, évaluables numériquement ou analogiquement ont été mis en corrélation avec la densité minérale osseuse.

La problématique est donc la suivante : Quelles sont ces indices radiomorphométriques ? Comment les évaluer ? Sont-ils pertinents dans la mise en évidence de la baisse de la densité minérale osseuse systémique ?

Ainsi, après description des principaux indices radiomorphométriques décrits dans la littérature, nous analyserons les différentes méthodes d'évaluation de ces indices, leur pertinence, puis nous nous intéresserons l'interprétation de ces indices dans la pratique courante du chirurgien-dentiste.

3.2. Les principaux indices radiomorphométrique utilisés

3.2.1. L'indice cortical mandibulaire (MCI)

L'indice cortical mandibulaire, ou « Mandibular Cortical Index » (MCI) est l'un des indices les plus utilisés pour détecter les modifications osseuses mandibulaire. Il se divise en 3 groupes (C1, C2, C3) décrit par KLEMETTI (74), en fonction de l'aspect de la corticale du bord inférieur de la mandibule en arrière du foramen mentonnier (illustrations n°8 et 9) :

- **C1** : La corticale de la mandibule est d'aspect normal avec une bonne épaisseur corticale (Illustration n°10)
- **C2** : Érosion de légère à modérée de la corticale, la surface corticale montrant des lacunes ponctuelles de résorption osseuse (Illustration n°11)
- **C3** : Erosion importante de la corticale qui paraît clairement poreuse avec absence d'épaisseur corticale par endroits (Illustration n°12)

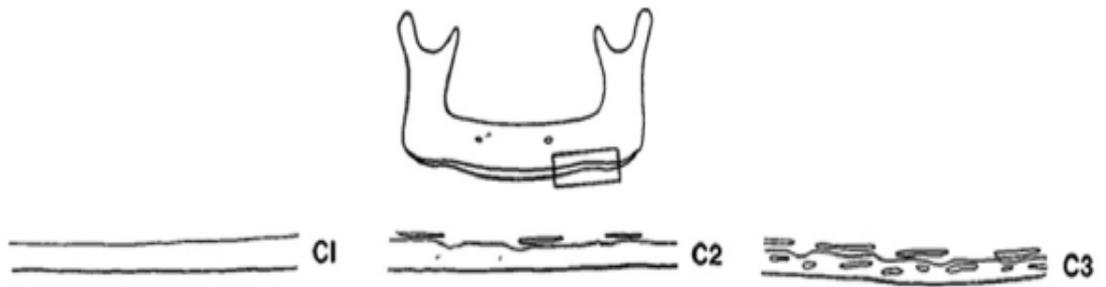


Illustration 8: Classification de Klemetti (d'après SHINTAKU)



Illustration 9: Radiographie panoramique montrant l'aspect de la corticale mandibulaire en arrière du foramen mentonnier d'après SHINTAKU



Illustration 10: Radiographie panoramique montrant un corps mandibulaire normal (C1) d'après KLEMETTI.



Illustration 11: Panoramique présentant un corps mandibulaire légèrement érodée (C2) d'après KLEMETTI



Illustration 12: Panoramique présentant un corps mandibulaire fortement érodée (C3) d'après KLEMETTI

3.2.2. L'indice Mentonnier

L'indice mentonnière, ou « Mental Index » (MI), « Mandibular Cortical Width » (MCW) ou « Mandibular Cortical Thickness » (MCT), est la mesure de la largeur de la région corticale au niveau foramen mentonnier, selon une technique initialement décrite par LEDGERTON (75).

Il est déterminé sur un axe perpendiculaire au rebord inférieur au corps mandibulaire passant par le foramen mentonnier (illustration n°13). Il évalue l'épaisseur corticale mandibulaire moyenne, avec une valeur de référence supérieure ou égale à 3,0 mm.



Illustration 13: Panoramique montrant la mesure de l'indice mentonnier (a) d'après LEDGERTON

3.2.3. L'indice antégoniaque (AI)

L'indice antégoniaque ou « antégoniac index » (AI), évoqué pour la première fois par DEVLIN et HORNER en 2002 (76), correspond à l'épaisseur corticale mandibulaire mesuré au niveau de la bissectrice entre le bord inférieur du corps mandibulaire et le bord antérieur du ramus mandibulaire (illustration n°14).

L'indice AI est mesuré bilatéralement et correspond à la moyenne, avec une valeur de référence supérieure ou égale à 3,2 mm.

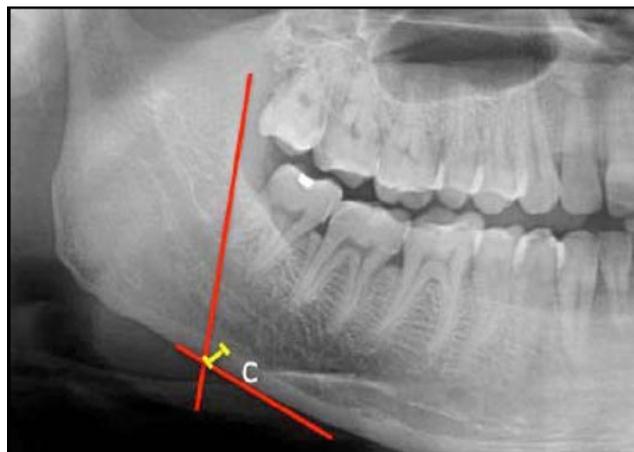
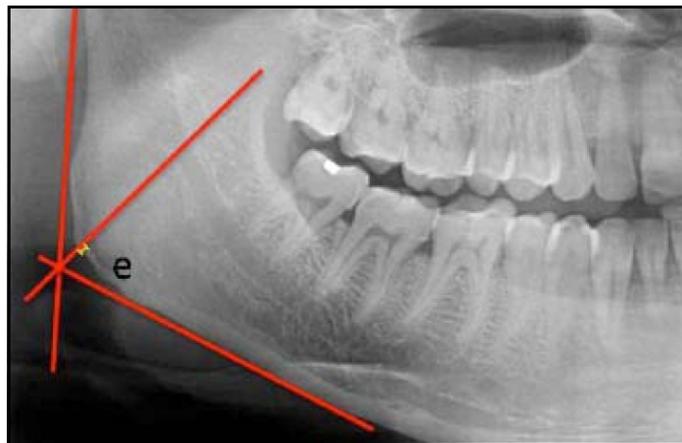


Illustration 14: Mesure de l'indice antégoniaque (C) d'après DEVLIN & HORNER

3.2.4. L'indice Goniaque (GI)

Décrit également par DEVLIN et HORNER (2002) (76), la mesure de l'indice goniaque (GI), ou « Goniac Index », équivaut à l'épaisseur corticale mandibulaire déterminée à partir de la bissectrice entre le bord inférieur du corps mandibulaire et le bord postérieur du ramus mandibulaire (illustration n°15).

La valeur de référence est supérieure ou égale à 1,2 mm.

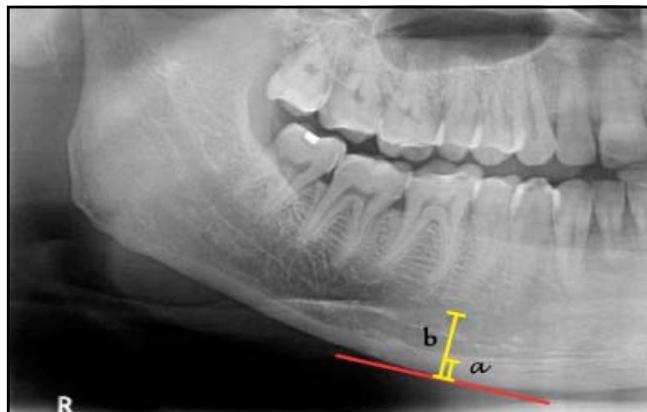


*Illustration 15: Mesure de l'indice goniaque (e)
d'après DEVLIN & HORNER*

3.2.5. L'indice Panoramique Mandibulaire (PMI)

Décrit par BENSON (1991) (77), repris ensuite par ANDRADE (2009) (78), l'indice panoramique mandibulaire (PMI) correspond au ratio entre l'épaisseur du corps mandibulaire et la distance entre le bord inférieur du corps mandibulaire et le milieu du foramen mentonnier (Illustration n°16).

La valeur de référence est supérieure ou égale à 0,3.



*Illustration 16: Calcul de l'indice panoramique mandibulaire d'après BENSON. (a):
Epaisseur mandibulaire, (b) :Distance entre le bord inférieur du corps mandibulaire
et le milieu du foramen mentonnier.*

3.2.6. La profondeur antégoniaque (AD)

La profondeur antégoniaque ou « Antegonial Depth » (AD) correspond à la distance, ou profondeur, sur une ligne perpendiculaire entre le point le plus haut de la concavité antégoniaque à la tangente du bord inférieur du corps mandibulaire (illustration n°17).

La valeur de référence est de $1,6 \pm 2$ mm.

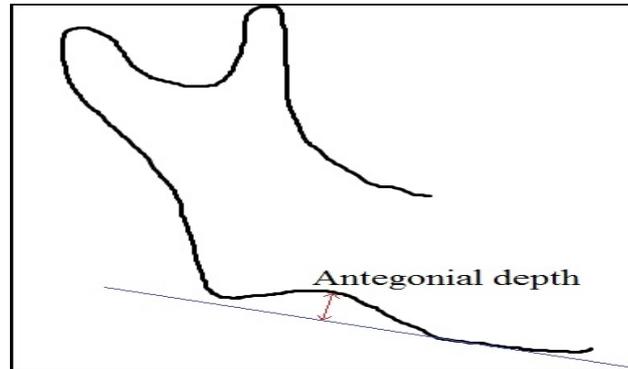


Illustration 17: Calcul de la profondeur antégoniaque

3.2.7. L'indice M/M Ratio

Décrit par VLASIADIS (2007) (79), le ratio M/M, ou « Mandibular Alveolar Bone Resorption Index », correspond au ratio entre la hauteur totale de la mandibule et la distance entre le bord inférieur du corps mandibulaire et le milieu du foramen mentonnier mesuré à partir de la perpendiculaire au rebord inférieur du corps mandibulaire (illustration n°18).

L'indice M/M est mesuré bilatéralement et correspond à la moyenne des deux côtés.

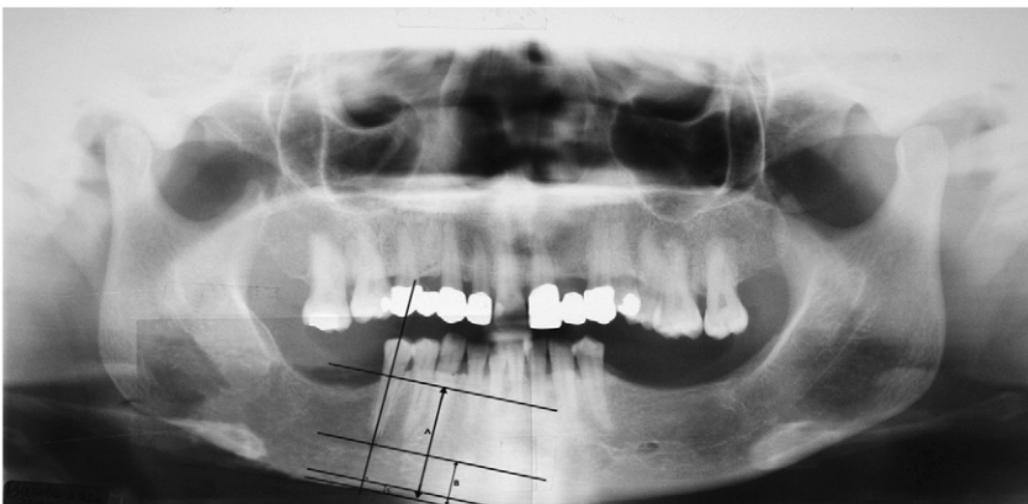


Illustration 18: Panoramique montrant la mesure du ratio M/M (VLASIADIS), (A) : Hauteur totale du corps mandibulaire, (B): Distance entre le bord inférieur du corps mandibulaire et le milieu du foramen mentonnier

3.2.8. L'angle goniale et l'angle antégoniaque

L'**angle goniale** correspond à l'angle entre le bord inférieur du corps mandibulaire et le bord postérieur du ramus mandibulaire (illustration n°19).

L'**angle antégoniaque** correspond à l'angle situé à la région antégoniaque formé par les 2 rebords inférieurs du corps mandibulaire à partir du point le plus déclive de l'encoche antégoniaque (illustration n°19).

Les angles goniale et antégoniaque sont mesurés bilatéralement et correspondent à la moyenne des deux côtés.

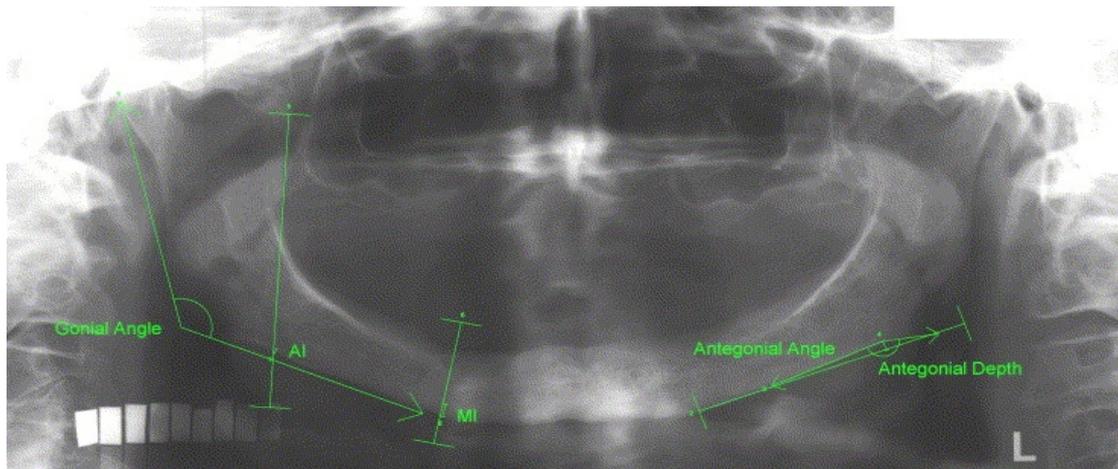


Illustration 19: Panoramique montrant la mesure de l'angle goniale, de l'angle antégoniaque, AI = indice antégoniaque, MI = indice mentonnier, d'après DEVLIN

3.2.9. Le « Pixel Intensity » (PI)

L'indice d'intensité de pixel, ou « Pixel Intensity » (PI), décrit par TOSONI et al (2006), correspond aux valeurs moyennes de niveau de gris de trois régions d'intérêt prédéfinies (ROI) sur un des côtés de la radiographie panoramique (illustration n°20). Le choix du côté est décidé selon des critères pour obtenir une meilleure résolution en évitant les structures indésirables tels que les dents ou les superpositions de structures anatomiques. Les niveaux de gris des pixels sont préalablement étalonnés par des valeurs de références connues (billes en aluminium placées en bouche) (80).

Les valeurs du PI normalisées (NPI) sont ensuite déterminées pour chaque région d'intérêt à partir d'un logiciel dédié en utilisant l'équation suivante :

$$\text{NPI} = \text{PI} / \text{CR}$$

Où PI = intensité de pixel moyenne de la ROI, et CR = intensité de pixels de la valeur de référence.

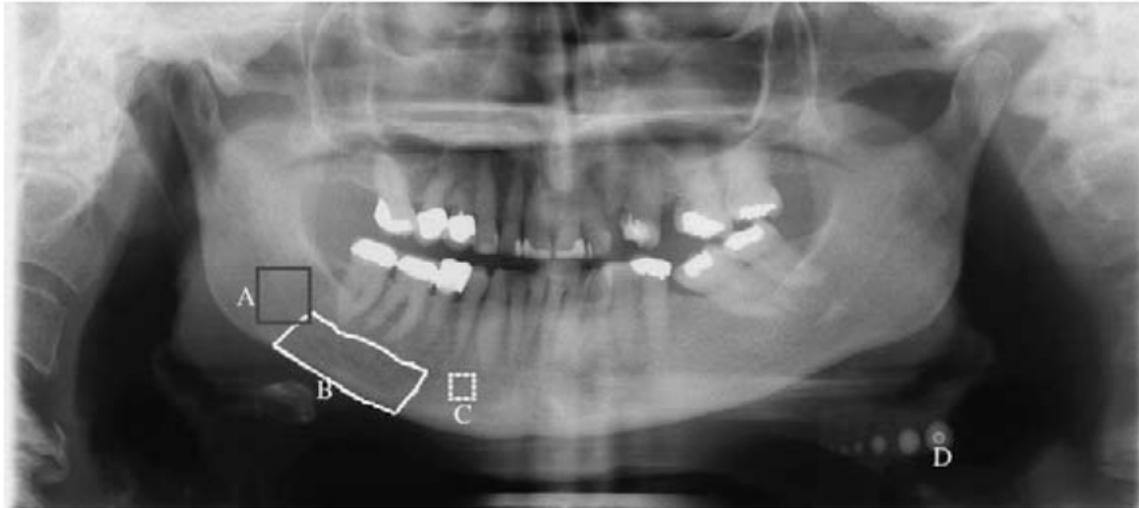


Illustration 20: Panoramique montrant les trois régions d'intérêts pour le calcul du PI d'après TOSONI. (A) Région d'intérêt (ROI) d'angle : carré en avant de l'angle mandibulaire, délimité par la partie supérieure de la corticale du corps mandibulaire et par le bord antérieur du ramus mandibulaire ; (B) ROI du corps mandibulaire : rectangle de forme irrégulière délimité par le bord inférieur du corps mandibulaire, le point le plus déclive de la concavité antégoniaque, la partie distale du foramen mentonnier et l'apex des dents ; (C) ROI canine / prémolaire : carré défini 2 mm en avant du foramen mentonnier et à 2 mm au dessus de la partie supérieure de la corticale du corps mandibulaire.

3.3. Les méthodes d'évaluation des indices radiomorphométriques

Au fur et à mesure du développement de l'informatique, différentes méthodes d'évaluation des indices radiomorphométriques se sont développés. La première à avoir vu le jour est la méthode d'évaluation analogique, initialement effectuée sous une lumière tamisée à la loupe avec une échelle millimétrique (illustration n°21) (74,77) ou avec un pied à coulisse (81). Cependant, les mesures étaient soumises à d'importantes variations inter et intra-observateurs (82).



Illustration 21: Image de la loupe utilisée pour la mise au point des mesure (BENSON)

C'est pourquoi, elle a été rapidement remplacée par des méthodes d'évaluation numérique, un système de diagnostic assisté par ordinateur (CAD) qui réduisent cette variabilité (83).

Les mesures radiomorphométriques de la mandibule par CAD sont effectuées par un radiologue ayant reçu une formation spécifique aux traitements d'image (illustration n°22).

Les mesures radiomorphométriques de la mandibule réalisé par CAD ont montré une bonne corrélation statistique avec les mesures de la DMO effectuées sur d'autres sites osseux (83–87). Néanmoins il semblerait que ces mesures mettent en évidence des diminutions de la DMO non retrouvées sur les autres sites osseux (sensibilité de 85%, spécificité de 60%) (84) . On peut donc s'interroger sur la pertinence des mesures radiomorphométriques ou sur leur capacité à détecter des variations précoces de DMO sur le site mandibulaire précédant des atteintes sur d'autres sites osseux.

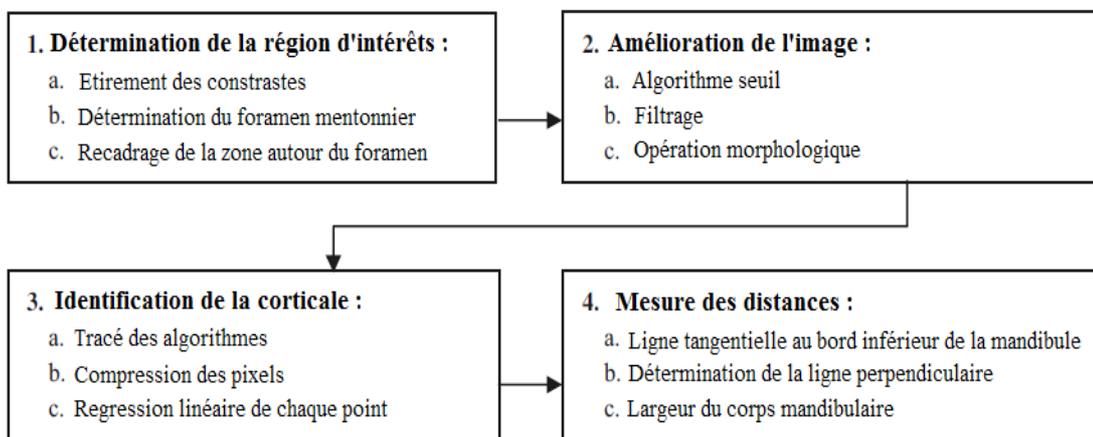


Illustration 22: Diagramme schématisant l'algorithme de mesure de la corticale mandibulaire (ARIFIN, 2006) (84)

Quelles sont donc, dans le cadre de l'ostéoporose, les corrélations de ces indices radiomorphométriques avec les marqueurs de remodelage osseux ? Avec la DMO ?

3.4. Revue de littérature sur les indices radiomorphométriques des orthopantomogrammes et la détection précoce de l'ostéoporose

Comme on a pu le voir, les indices sont nombreux. Mais sont-ils utiles dans la détection précoce de l'ostéoporose ? Le sont-ils tous ? Sont-ils fiables ?

3.4.1. Corrélation des indices du remodelage osseux avec les marqueurs biologiques

Les corrélations entre les mesures sur les indices radiomorphométriques des radiographies panoramiques dentaires et des marqueurs biochimiques du remodelage osseux ont été évaluées dans plusieurs études cliniques (39,88–90).

Ainsi, plusieurs indices radiomorphométriques (indice cortical mandibulaire, indice mentonnier) ont été comparés aux marqueurs de formation osseuse PICP et ALP et aux marqueurs de résorption osseuse ICTP chez la femme ménopausée (Tableau n°4).

Auteurs	Population d'étude	Moyen de comparaison	Résultats
MORITA et al (2009) (88)	238 personnes de plus de 80 ans (85 hommes et 153 femmes)	Comparaison de l'indice cortical mandibulaire et du MI avec les taux sériques de PICP et d'ICTP	Corrélation positive entre la catégorie d'érosion mandibulaire et le taux sérique de PICP chez les femmes mais non significative chez les hommes. Absence de corrélation entre l'érosion corticale et le MI avec le CIPT sérique
TAGUCHI et al (2003) (39)	82 femmes ménopausées de 46 à 68 ans	Comparaison du MCI et du MI avec les taux sériques de NTX et d'ALP	Corrélation positive significative entre la catégorie d'érosion corticale mandibulaire et le taux de NTX et de l'ALP Absence de corrélation entre le MI avec les taux de télépeptides N-ter et de phosphase alcaline
VLASIADIS et al (2008) (89)	NP*	Comparaison du MCI et du MI avec les taux sériques de NTX et d'ALP	Corrélation positive significative entre la catégorie d'érosion corticale mandibulaire et le taux de l'ALP Absence de corrélation entre le MCI et le MI avec le dosage du NTX
JOHARI KHATOON ABAD et al (2011) (90)	140 femmes ménopausées âgées de 44 à 82 ans	Comparaison du MCI et du MI avec les taux sériques de NTX et d'ALP	Absence de corrélation entre le MCI et le MI avec le dosage du NTX et d'ALP

Tableau 4: Synthèse des études cliniques sur l'influence des marqueurs osseux sur les indices radiomorphométriques (NP* = non précisé ; PICP : carboxy-terminal propeptide of type I collagen), ICTP : type I collagen carboxy-terminal *télopeptide*, NTX : *télopeptides N-ter du collagène de type I*, et ALP : *phosphase alcaline* ; MI = *indice mentonnier* ; MCI : *Indice cortical mandibulaire*)

En conclusion, l'ensemble des études montrent des résultats contradictoires dans les corrélations entre indices radiomorphométriques issus de la radiographie panoramique et marqueurs du remodelage osseux. Néanmoins la fiabilité des dosages sériques est très largement controversée (91), les facteurs de remodelage étant soumis à des variations journalières liées à l'heure de prélèvement ou la supplémentation en hormones. Ainsi, ces résultats ne témoignent pas forcément d'un manque de fiabilités des indices radiomorphométriques testés.

3.4.2. Corrélation avec la DMO

3.4.2.1. Revue de littérature concernant le MCI

L'indice cortical mandibulaire (MCI) a été le premier indice testé dans l'évaluation des patients à risque d'ostéoporose. De nombreux auteurs ont testé les corrélations du MCI avec la DMO (63,74,92–99).

La DMO a été déterminée par tomodensitométrie osseuse (quantitative monophasique ou méthode DXA) au niveau du col fémoral et des vertèbres lombaires (L2-L4) ou de la mandibule chez la femme ménopausée. Trois catégories (normal, ostéopénique, ostéoporotique) ont été définis dans chaque région du squelette.

La morphologie du corps mandibulaire a été évaluée sur des radiographies panoramiques, et classés en trois groupes (C1, C2, C3) comme décrit précédemment selon la classification de KLEMETTI.

Les résultats sont présentés tableau n°5.

Auteurs	Population d'étude	Résultats
KLEMETTI et al (1997) (74)	77 femmes ménopausées dont l'âge varie de 48 à 56 ans	La sévérité des changements dans le corps mandibulaire est significativement liée à la densité minérale osseuse de la mandibule (p = 0,002)
HORNER et al (1998) (63)	40 femmes édentées	MCI est significativement corrélé (P <0,005) à la DMO mandibulaire Mauvaise concordance intra-observateur dans l'évaluation du MCI
BOLLEN et al (2000) (92)	93 cas de fractures ostéoporotiques et 394 cas témoins	Il existe deux fois plus de survenue d'une fracture ostéoporotique en cas d'appartenance à C2 et 8 fois plus en cas d'appartenance à C3.
ZLATARIC et al (2003) (93)	40 patients âgés de 56 à 84 ans et 96 patientes âgées de 48 à 86 ans	MCI significativement corrélée à la DMO mandibulaire (P<0,01) Le sous-groupe C3 avait des valeurs de DMO significativement plus faibles Accords inter et intra observateur du MCI excellent
HALLING et al (2005) (94)	211 patients (102 hommes et 109 femmes)	Odds ratio de 8,04 (p<0,001) pour la catégorie ostéoporotique de DMO dans le groupe C2 (Sensibilité de 50% et spécificité de 89%)
TAGUCHI et al (2006) (95)	158 femmes japonaises saines ménopausées de 46 ans à 64 ans	La sensibilité et la spécificité, pour identifier les femmes à faible DMO étaient respectivement de 72,6% et 74,0% dans la population saine et respectivement de 86,7% et 65,6% pour les femmes atteintes d'ostéoporose.
MARANDI et al (2010) (96)	67 femmes âgées de plus de 35 ans	Corrélation entre l'attribution à un sous-groupe du MCI et la baisse de DMO
KHOJASTE HPOUR et al (2013) (97)	119 femmes ménopausiques	La spécificité et la sensibilité pour identifier les femmes à faible DMO respectivement de 69,4% et 80,7% pour les vertèbres lombaires, et de 67,7% et 81,5% pour le col fémoral.
CALCIOLA RI et al (2015) (98)	Méta-analyse de 19 études	La sensibilité et la spécificité du MCI pour détecter les femmes à faible DMO étaient respectivement de 78,9% et 56,2%

Tableau 5: Synthèse des études cliniques sur la relation entre l'indice cortical mandibulaire (MCI) et la densité minérale osseuse (DMO) évaluée par absorptiométrie biphotonique à rayon X

La présence d'érosion et de porosité au niveau de la corticale de la mandibule est statistiquement associé dans les études à la baisse de la DMO (74, 92-98). De plus, ces érosions et porosités augmenteraient considérablement le risque de fracture ostéoporotique chez les femmes (92). Il est donc un outil indispensable dans l'arsenal de prévention des risques d'ostéoporose avec des précautions quant à la méthode employée et surtout quant aux méthodes analogiques d'évaluation du fait d'une reproductibilité faible (63). Les méthodes par CAD sont donc à privilégier ; l'utilisation d'une classification du corps mandibulaire sur les radiographies panoramiques peut également être utile pour les praticiens dans l'évaluation de la qualité locale de l'os cortical.

Ainsi, un patient, subissant une panoramique dentaire dans un contrôle de routine pourrait idéalement obtenir une analyse numérique de son corps mandibulaire et dans le cas où une catégorie C3 de l'indice cortical mandibulaire serait identifiée, le patient pourrait être adressé à des rhumatologues compétents pour effectuer un examen densitométrique par DXA.

3.4.2.2. L'indice Mentonnier (MI ou MCW)

L'utilité de l'indice mentonnier MI évalué par radiographie panoramique dans le diagnostic de l'ostéoporose chez la femme ménopausée ou chez l'homme (69,70,76,89,98,100–103) a été évaluée en comparant les scores du MI avec la DMO mesurée par DXA (Tableau n°6).

Auteurs	Population d'étude	Résultats
TAGUCHI et al (1996) (70)	95 femmes ménopausées et 29 femmes non-ménopausées	Corrélation négative significative entre l'indice MCW du corps mandibulaire et la DMO de L3 ($p < 0,001$) Corrélations entre l'épaisseur et la morphologie de la corticale mandibulaire et la DMO de L3 ($p < 0,05$)
HORNER et al (2002) (76)	135 femmes en début de ménopause, âgées entre 45 et 55 ans	MI est significativement corrélé avec la DMO Un MI < 3 mm chez une femme est associée à une faible DMO
LEE et al (2005) (100)	100 femmes âgées de 50-84 ans	Sensibilité (53%), spécificité (82%), bonne valeur prédictive (74%) pour identifier les sujets avec une DMO faible mesurée au niveau vertébral ou fémoral
ISHII et al (2007) (69)	354 femmes ménopausées	Corrélation négative significative entre le MCW et la DMO fémorale
VLASIADIS et al (2008) (89)	141 femmes ménopausées, âgées entre 38 et 81 ans	Une diminution de MCW de 1mm augmente la probabilité d'ostéopénie ou ostéoporose à 47% ($p < 0,05$)
DAGISTAN et al (2010) (102)	40 individus de sexe masculin (20 normal et 20 à l'ostéoporose)	Les valeurs du MI ($P < 0,001$) étaient significativement plus faible dans le groupe des patients atteints d'ostéoporose
HEKMATIN et al (2013) (104)	52 femmes ménopausées	Corrélation significative entre la DMO et MCW ($r = 0,945$) ($P = 0.000$) Corrélation significative entre le T-score et MCW ($r = 0,835$) ($P = 0.000$)
NAGI et al (2014) (103)	120 femmes ménopausées (60 normales et 60 ostéoporotiques), âgées entre 50 et 75 ans	Diminution significative de la DMO et du MI chez les patients ostéoporotiques par rapport aux sujets sains ($p < 0,001$).
CALCIOLARI et al (2015) (98)	Méta-analyse de 19 études	La sensibilité et la spécificité du MI pour détecter les femmes à faible DMO étaient respectivement de 80,6% et 64,3%

Tableau 6: Synthèse des études cliniques chez l'homme sur la relation entre l'indice

mentonnier (MI ou MCW) et la densité minérale osseuse (DMO) mesurée par absorptiométrie biophotonique à rayon X

Les patients ostéoporotiques ayant une faible DMO, présentent également une plus faible épaisseur corticale mandibulaire dans la région du foramen mentonnier par rapports aux sujets sains (70,98,102-103). De plus, la diminution du MI est statistiquement associé à la baisse de la DMO (69,70,76,89,98,104). Une valeur de l'indice mentonnier inférieure à 3 mm est associée à une diminution de la DMO (76). Cependant, certains auteurs se contredisent quant à la valeur seuil de l'indice mentonnier à laquelle une densitométrie par méthode DXA serait indispensable comme WHITE (105), qui propose la valeur seuil de 4 mm.

Ainsi, il semble important d'utiliser l'indice mentonnier et une valeur seuil de référence d'épaisseur corticale afin de pouvoir réorienter un patient pour une consultation spécialisé en rhumatologie.

3.4.2.3. L'indice Antégoniaque et l'indice Gonjaque

Décrit par LEDGERTON en 1999 (75), ces indices antégoniaque et gonjaque ont également beaucoup été étudié afin d'étudier sa validité et sa pertinence clinique.

Ainsi certains auteurs se sont proposé de mettre en lumière le lien entre l'indice antégoniaque ou l'indice gonjaque mesurées sur les radiographies panoramiques et la densité minérale osseuse du squelette. Le but étant de montrer qu'une baisse de l'indice est corrélée à une densité osseuse du squelette réduite.

De la même façon que précédemment les indices gonjaques et antégonjaques ont été comparés à la DMO réalisée au niveau du col du fémur, du rachis lombaire et de l'avant-bras (76,102,106,107) (Tableau n°7).

Auteurs	Population d'étude	Résultats
DELVIN et al (2002) (76)	64 femmes	Absence de corrélation de façon significative entre l'indice antégoniaque ou l'indice goniale et la catégorie de faible DMO du squelette (T-score <ou = -1).
DUTRA et al (2006) (107)	52 patientes édentées	AI significativement diminué chez les personnes ayant une faible DMO (P <0,05) Après ajustement du vieillissement, aucune différence entre les groupes (P > 0,05).
LEITE et al (2010) (106)	351 femmes ménopausées	Corrélations positives significatives (P <0,001) entre l'AI et la DMO au niveau du rachis lombaire, du col du fémur et de la hanche totale (respectivement r = 0,429, 0,497, 0,447)
DAGISTAN et al (2010) (102)	40 individus de sexe masculin (20 sujets sains et 20 ostéoporotiques)	AI et GI significativement diminués (P <0,01) dans le groupe des patients atteints d'ostéoporose comparativement aux sujets sains

Tableau 7: Synthèse des études cliniques chez l'Homme sur la relation entre le l'indice goniale (AI) et de l'indice goniale (GI) avec la densité minérale osseuse (DMO) mesurée par absorptiométrie biphotonique à rayon X

Les résultats sur les liens entre les indices AI et GI sont contradictoires puisque certains auteurs trouvent des corrélations (76) et d'autres non (107, 106). Les différences observées seraient liées à l'âge (107).

Aucune preuve fiable n'a donc réellement été mise en évidence à ce jour dans l'utilisation de l'indice antégoniaque ou de l'utilisation de l'indice goniale dans le dépistage précoce de l'ostéoporose. Plus encore, l'âge serait un facteur influençant les valeurs des indices radiomorphométriques comme nous le développerons ci-après (paragraphe 3.5.1).

3.4.2.4. L'indice panoramique mandibulaire

Les études portant sur les liens entre le PMI et la DMO évaluée au niveau du col du fémur et des vertèbres lombaires (L2-L4) (96,98,99,102,108–111), sont résumées dans le tableau n°8.

Auteurs	Population d'étude	Résultats
WATSON et al (1995) (108)	62 femmes (33 cas / 39 contrôles), âgées entre 54 et 71 ans	Absence de différence dans le PMI moyen entre les cas et le groupe témoins
GULSAHI et al (2008) (110)	1.863 patients, 698 (37,5%) des hommes et 1165 (62,5%) des femmes âgées de plus de 20 ans	La probabilité d'appartenance à la catégorie ostéoporotique chez les patients avec un PMI de <0,30 est 9,78 fois plus élevé que chez les patients avec un PMI de > ou = 0,30.
MARANDI et al (2010) (96)	67 femmes âgées de plus de 35 ans	Les mesures du PMI ne sont pas significativement corrélées à la DMO
DAGISTAN et al (2010) (102)	40 individus de sexe masculin (20 sujets sains et 20 ostéoporotiques)	Diminution significative du PMI (P <0,05) dans le groupe des patients atteints d'ostéoporose comparativement aux sujets sains
DAMILAKIS et al (2011) (111)	151 femmes ménopausées âgées de 38 à 80 ans	Absence de corrélation de manière significative entre le PMI et la détection des sujets ostéopéniques et ostéoporotiques
CALCIOLARI et al (2015) (98)	Méta-analyse de 19 études	Sensibilité et spécificité du PMI pour détecter les femmes à faible DMO respectivement de 72,3% et 73,3%

Tableau 8: Synthèse des études cliniques chez l'Homme sur la relation entre l'indice panoramique mandibulaire (PMI) et la densité minérale osseuse (DMO) évaluée par absorptiométrie biphotonique à rayon X

De façon quasi-unanime, les études s'accordent sur le fait que l'indice panoramique mandibulaire ne peut être utilisé comme prédicteur de la baisse de densité minérale osseuse (96,98,102,108, 110-111).

3.4.2.5. La profondeur antégoniaque, l'angle goniale et l'angle antégoniaque

A ce jour les études sur ces indices radiomorphométriques et les liens avec la DMO sont peu nombreuses. Les 3 indices décrits par DUTRA et al, en 2006 (107), puis par LEITE et al (2010) (106), ont été étudié par ces auteurs afin d'évaluer leur corrélation avec la DMO de femmes ostéopéniques et ostéoporotiques (tableau n°9).

Auteurs	Population d'étude	Résultats
DUTRA et al (2006) (107)	52 patientes édentées	La profondeur antégoniaque significativement plus élevée chez les sujets ostéoporotique et ostéopéniques ($P < 0,05$). Les sujets avec une profondeur antegonial supérieure à 1,6 mm sont 4,4 fois plus susceptibles d'appartenir au groupe des patients ostéoporotiques. L' angle goniale n'a pas de corrélation avec toute la densité minérale osseuse squelettique L' angle antégoniaque significativement plus faible chez les personnes ayant une faible masse osseuse ($P < 0,05$).
LEITE et al (2010) (106)	351 femmes ménopausées	Corrélations négatives significatives de la profondeur antégoniaque à hauteur de -0,211 à la colonne lombaire, -0,156 au col fémoral, et de -0,201 à la hanche totale. Aucune corrélation entre l' angle goniale et la DMO squelettique. Corrélation de l' angle antégoniaque avec la DMO au niveau du rachis lombaire ($r = 0,006$) et de la hanche totale ($r = 0,168$), mais pas au niveau du col fémoral.
GEARY et al (2015) (112)	273 sujets	Aucune corrélation entre l' angle goniale et l'angle antégoniaque avec la DMO a été mis en évidence.

Tableau 9: Synthèse des études cliniques sur la relation entre la profondeur antégoniaque, l'angle goniale et l'angle antégoniaque avec la densité minérale osseuse (DMO) mesurée par absorptiométrie biphotonique à rayon X.

Une corrélation négative entre la profondeur antégoniaque et la baisse de la DMO a pu être observée (106,107). L'angle antégoniaque semble significativement plus faible chez les personnes ayant une faible masse osseuse (107) mais les résultats sont à la fois controversés (112) et dépendant du site osseux où la DMO a été évaluée (106). Par contre, l'angle goniale ne semble pas être avoir de liens avec la DMO et serait un mauvais indicateur de baisse de la DMO (106,107,112).

Néanmoins des études sur de plus vaste population sont à réaliser afin de confirmer ces tendances, et notamment pour valider la pertinence de la mesure de la profondeur antégoniaque.

3.4.2.6. Le MM Ratio

VLASIADIS et al (2007) (79), et DAMILAKIS et al (111), en 2011, avaient pour but dans leurs études d'évaluer la validité du M/M ratio comme prédicteur de l'ostéoporose chez les femmes ménopausées.

L'évaluation du M/M ratio a été effectuée chez femmes ménopausées d'âge varié (tableau n°10).

Auteurs	Population d'étude	Résultats
VLASIADIS et al (2007) (79)	133 femmes ménopausées âgées entre 38 et 80 ans	Absence de corrélation entre le M/M ratio et la densité minérale osseuse chez les femmes ménopausées
DAMILAKIS et al (2011) (111)	151 femmes ménopausées âgées de 38 à 80 ans	Absence de corrélation de manière significative entre le M / M ratio et la détection des sujets ostéopéniques et ostéoporotiques

Tableau 10: Synthèse des études cliniques sur la relation entre le « M/M ratio » et la densité minérale osseuse par absorptiométrie biphotonique à rayon X

De façon quasi-unanime malgré le peu d'étude réalisé, les études s'accordent sur le fait que la mesure du M/M ratio ne peut être utilisée comme prédicteur de la baisse de densité minérale osseuse.

3.4.2.7. L'indice d'intensité de Pixel (PI)

TOSONI et al (80), puis OLIVEIRA et al (113), ont été les premiers à décrire cet indice et à étudier son utilité pour décrire la baisse de densité minérale osseuse.

Ainsi, le PI déterminé dans des régions d'intérêt mandibulaires préétablies (région de l'angle mandibulaire, région du corps de la mandibule, région canine/prémolaire) ont été comparés chez des populations de femmes ménopausées saines, ostéopéniques ou ostéoporotiques.

La DMO effectués au niveau du rachis lombaire et du col fémoral a été utilisé comme examen de référence sur chaque patient (tableau n°11).

Auteurs	Population d'étude	Résultats
TOSONI et al (2006) (80)	54 femmes saines ou ostéoporotiques	Corrélation significative entre les mesures de PI dans la région Canine/Prémolaire et la DMO (P <0,01) Diminution significative du PI au niveau de la région canine/prémolaire dans le groupe ostéoporotique par rapport aux sujets sains (P = 0,049)
OLIVEIRA et al (2013) (113)	63 femmes ménopausées (ostéoporotique ou non)	PI significativement différents (p <0,05) entre les patients sains et les patients ostéoporotiques, bilatéralement au niveau de l'angle mandibulaire, à gauche pour le corps mandibulaire.

Tableau 11: Synthèse des études cliniques sur la relation entre l'indice d'intensité de pixel (PI) et la densité minérale osseuse (DMO) mesurée par absorptiométrie biphotonique à rayon X

Chez les patients ostéoporotiques, une diminution significative du PI est observée au niveau la zone canine/prémolaire (80) et de l'angle mandibulaire (113). De plus, le PI évalué au niveau la zone canine/prémolaire semble bien corrélé à la DMO (80). Néanmoins des études supplémentaires sont à réaliser pour confirmer l'utilisation du PI comme témoin de la DMO sur les panoramiques dentaires.

Après l'étude de tous ces indices, une autre problématique vient se poser : est-ce que les indices radiomorphométriques peuvent être influencés par certains critères (âge, sexe, ethnie, classe sociale et état dentaire notamment) ? Y aurait-il des facteurs confondants dans l'évaluation de la DMO ? Ou des facteurs influençant les indices radiomorphométriques et la DMO ?

3.5. L'influence des indices radiomorphométrique

De nombreuses études ont cherché à évaluer l'influence de critères individuels sur les indices radiomorphométriques tels que l'âge, le sexe, la classe sociale, l'ethnie ou l'état dentaire.

3.5.1. L'âge

L'âge a été le paramètre le plus documenté. Ainsi de nombreux auteurs, ont évalué les corrélations entre les différents indices radiomorphométriques et l'âge (75,110,114–118).

Ces études ont testé l'influence de l'âge sur les différents indices radiomorphométriques à partir de cohorte de patients d'âge varié ou regroupés par catégorie d'âge (tableau n°12).

Auteurs	Population d'étude	Moyen de comparaison	Résultats
LEDGERTON et al (1999) (75)	500 femmes de 25 à 74 ans	Comparaison de l'âge et de GI, MI, PMI, AI, MCI	Corrélation négative entre l'âge et les indices radiomorphométriques
KNEZOVIC ZLATARIC et al (2002) (114)	136 patients classés en 3 catégories d'âge	Comparaison de l'âge avec MI, GI, AI, PMI, MCI	MI, PMI, MCI, AI et GI ont montré une tendance générale à la baisse avec l'âge, de façon significative
DUTRA et al (2005) (115)	312 patients (199 femmes, 113 hommes) âgés de 40 à 79 ans	Comparaison de l'âge avec MI et AI	Faible corrélation significative entre les indices et les patients âgés entre 40 et 59 ans. Pour les patients de plus de 60 ans, la corrélation est faible.
GULSAHI et al (2008) (110)	1863 patients, de plus de 20 ans	Comparaison de l'âge et du MCI	L'érosion de la mandibule augmente avec l'âge et la probabilité d'avoir une érosion grave (C3) est d'autant plus élevée avec les tranches d'âge élevé
YUZUGULLU et al (2009) (116)	NP*	Comparaison de l'âge et du MCI	Augmentation du nombre d'érosion grave pour les plus de 60 ans.
ALONSO et al (2011) (117)	1287 patients répartis par groupe d'âge	Comparaison de l'âge et du GI et MI	Les épaisseurs goniques ou mentonnières sont d'autant plus faibles que l'âge augmente
BAJORIA et al (2015) (118)	23 patients d'âge varié	Comparaison de l'âge avec le PMI, MI, MCI, AI, GI	Corrélation négative de tous les indices avec l'âge

Tableau 12: Synthèse des études cliniques sur l'influence de l'âge sur les indices radiomorphométriques (NP* = non précisé ; PMI = indice panoramique mandibulaire : MCI = indice cortical mandibulaire : GI = indice gonique : AI = indice antégonique : MI = indice mentonnier)

Les variations observées des indices radiomorphométriques mandibulaires sont donc en corrélation avec l'âge. Les auteurs considèrent que la diminution progressive de la DMO est observée au cours du temps et avec l'âge (75,110,115–118). L'évaluation des indices radiomorphométriques pourrait ainsi être utilisée dans le dépistage de diminution sévère de la DMO survenant à un âge précoce.

3.5.2. Le sexe

De la même façon, l'influence du sexe sur les indices radiomorphométriques a également été évaluée (114,115,118,119) (tableau n°13).

Auteurs	Population d'étude	Moyen de comparaison	Résultats
KNEZOVIC ZLATARIC et al (2002) (114)	40 hommes et 96 femmes	Comparaison de l'ensemble des indices et du sexe	Différence significative de la valeur des indices en fonction du sexe (plus faible chez la femme)
DUTRA et al (2005) (115)	199 femmes et 113 hommes	Comparaison du MI et AI avec le sexe	Corrélation significative entre les indices radiomorphométriques et le sexe du patient. Les indices étaient plus faibles chez la femme.
HASTAR et al (2011) (119)	239 hommes et 248 femmes	Comparaison du MCI, MI et PMI avec le sexe	MCI, MI et PMI sont significativement plus bas chez la femme que chez l'homme
BAJORIA et al (2015) (118)	23 patients de sexe varié	Comparaison du sexe avec le PMI, MI, MCI, AI, GI	Les indices radiomorphométriques sont significativement plus faibles chez la femme que chez l'homme, indépendamment de l'âge.

Tableau 13: Synthèse des études cliniques sur l'influence du sexe sur les indices radiomorphométriques (PMI = indice panoramique mandibulaire : MCI = indice cortical mandibulaire : GI = indice goniale : AI = indice antégoniale : MI = indice mentonnier)

Les indices radiomorphométriques sont influencés par le sexe, avec en particulier une diminution des indices radiomorphométriques chez la femme. Ces différences liées au sexe peuvent aisément s'expliquer d'une part par une masse osseuse globalement plus développée chez l'homme et d'autre part par un remodelage osseux plus important chez la femme du fait des variations hormonales plus importantes. Ainsi, les variations hormonales liées à la ménopause peuvent expliquer les écarts d'indices entre l'homme et la femme. De ce fait, il semble d'autant plus pertinent d'utiliser l'apport des indices radiomorphométriques dans l'évaluation de la DMO avec un souci tout particulier quant au sexe de l'individu.

3.5.3. Influence de l'état dentaire

Des études ont également cherché à établir un lien entre les indices radiomorphométriques et la dentition (75,110,115,119,120). On retrouve ces résultats dans le tableau n°14.

Auteurs	Population d'étude	Moyen de comparaison	Résultats
LEDGERTON et al (1999) (75)	NP	Comparaison de l'ensemble des indices et de l'état dentaire	Diminution des indices radiomorphométriques en fonction de l'édentement
DUTRA et al (2005) (115)	199 femmes et 113 hommes en 3 catégories : dentés, partiellement dentés et édentés	Comparaison du MI et AI avec le sexe	L'édentement total est statistiquement corrélé à une diminution du MI et du AI chez la femme. Mais aucune corrélation n'est retrouvée entre les catégories de patients dentés ou partiellement dentés
GULSAHI et al (2008) (110)	1863 patients classés en 3 parties selon leur édentement (dentés, partiellement dentés ou édentés totaux)	Comparaison du MCI avec l'état dentaire	Une érosion grave de la mandibule (C3) est significativement observée chez les individus édentés près de 30 fois plus comparativement aux individus dentés, alors qu'elle n'est observée chez les individus partiellement dentés que près de 3 fois plus comparativement aux individus dentés.
HASTAR et al (2011) (119)	487 patients en 3 groupes : dentés, dentés partiels ou édentés	Comparaison du PMI, MCI et MI avec l'état dentaire	Les indices radiomorphométriques sont significativement diminués en fonction du statut d'édentement de l'individu
IMIRZALIOGLU et al (2012) (120)	1863 patients classés en 3 parties selon leur édentement (dentés, partiellement dentés ou édentés totaux)	Comparaison du PMI, MCI et MI avec l'état dentaire	Les indices radiomorphométriques sont significativement diminués en fonction du statut d'édentement de l'individu

Tableau 14: Synthèse des études cliniques sur l'influence du sexe sur les indices radiomorphométriques (NP = non précisé : PMI = indice panoramique mandibulaire : MCI = indice cortical mandibulaire : GI = indice goniale : AI = indice antégoniale : MI = indice mentonnier)*

Les études tendent à prouver une baisse de la valeur des indices en fonction de la présence de dents, indépendamment de l'âge (75,110,115,119,120). Ainsi la présence de dents et les stimulations biomécaniques liées à la mastication impactent considérablement les indices radiomorphométriques. Il semblerait donc que ces indices radiomorphométriques ne seraient pas fiables et peu pertinents concernant les individus édentés dans l'évaluation de la DMO, les stimuli fonctionnels étant une source de variation majeure masquant les variations liées au statut ostéoporotique (54).

Cependant, certaines études insistent sur l'utilité de multiplier les études pour mettre en évidence et de mieux comprendre ce lien.

3.5.4. Influence de la classe sociale et de l'ethnie.

LEDGERTON et al, a évalué le lien entre les indices radiomorphométriques et l'appartenance à une classe sociale, ou l'appartenance à une ethnie, par leur étude longitudinale de 500 panoramiques de femmes (75).

Aucun lien n'a été mis en évidence entre l'appartenance à une classe sociale ou l'appartenance à une quelconque ethnie et la modification des indices radiomorphométriques.

3.6. Conclusion

La perte osseuse associée à l'ostéoporose est observable à l'ensemble du squelette. La colonne vertébrale, la hanche et l'avant-bras sont choisis comme sites classiquement utilisés pour la mesure de la DMO, principalement en raison de l'accessibilité et de la plus grande vulnérabilité aux fractures.

Les mesures des caractéristiques radiomorphométriques à la mandibule présentent l'avantage d'être collectées sur les radiographies effectuées en routine lors de consultation bucco-dentaire, en ouvrant ainsi la possibilité de dépister des cas ostéoporose avant la survenue de fracture, même lorsque la personne ne s'estime pas concernée par un potentiel risque d'ostéoporose.

Les mesures automatiques en utilisant une analyse d'image par ordinateur permettrait dans ces cas de procéder en routine à cette analyse sans affecter le déroulement normal d'un examen dentaire.

Cependant, pour nuancer la performance des indices radiomorphométriques, il faut garder à l'esprit les impératifs de critères d'acquisitions et de mesures standardisées afin de diminuer au maximum la variabilité inter et intra-observateurs de l'évaluation et de l'interprétation. De plus, il faut garder en mémoire que l'orthopantomogramme est une analyse bidimensionnelle ne témoignant que d'une partie de la mandibule. Enfin, des protocoles dans la coordination des soins et dans la responsabilité de la découverte fortuite sont à envisager dans la perspective d'une utilisation potentielle des indices radiomorphométriques évalués par la radiographie panoramique.

Malgré ces aspects, les études menées sur les mesures sur les radiographies panoramiques dentaires, à travers les différents indices radiomorphométriques, ont montré qu'ils pouvaient être de bons prédicteurs de la densité minérale osseuse du squelette.

Bien sûr, les patients dont on suspectera une diminution de la masse osseuse devraient être par la suite orientés vers une consultation spécialisée en rhumatologie afin d'explorer la densité minérale osseuse par DXA. Cela nécessiterait une communication renforcée entre les dentistes, les radiologues, les rhumatologues et les médecins généralistes. Mais comme les patients consultent leur dentiste régulièrement, il est l'occasion pour le dentiste d'être plus étroitement impliqué dans le suivi de la santé et du bien-être général du patient.

CE QU'IL FAUT RETENIR :

A partir de la radiographie panoramique dentaire, deux **indices radiomorphométriques** semblent pertinent dans l'évaluation de la densité minérale osseuse : l'indice cortical mandibulaire (MCI) et l'indice mentonnier (MI). Au cours de l'ostéoporose, des modifications radiologiques sont en effet observables au niveau de la corticale mandibulaire et témoignent d'érosion ou de diminution de la hauteur de corticale au niveau du foramen mentonnier. D'autres indices existent mais nécessitent d'avantage d'études à ce jour afin de préciser leur pertinence dans l'ostéoporose.

Ces indices radiomorphométriques pourraient donc être utilisé en pratique courante par les praticiens chirurgien-dentistes et servir de signe d'appel d'une potentielle ostéoporose alors non dépistée. Ces praticiens pourraient dans ce cas référer le patient auprès des rhumatologues pour une analyse absorptiométrique biphotonique à rayons X et permettre alors une prise en charge plus précoce de la pathologie.

4. Les radiographies intra-orales

La radiographie intra-orale tient une place importante dans la pratique quotidienne du chirurgien-dentiste. Elle est l'examen complémentaire de première intention dans de nombreux cas permettant l'infirmer ou la confirmation d'un diagnostic cliniquement établi. Elle donne également des informations sur l'anatomie coronaire et radiculaire d'une dent, ainsi que sur les tissus environnants, sur l'os alvéolaire.

4.1. Principes généraux

Un cliché intra-oral est une projection radiologique d'une dent et de son parodonte (ligament, os) adjacent sur un film de taille réduite, permettant une étude détaillée des structures.

Les techniques intra-orales incluent toutes les radiographies de la denture à savoir :

- La radiographie rétro-alvéolaire
- La radiographie rétro-coronaire (bite-wing)
- Le mordue occlusal

Pour simplifier le résumé de la littérature, nous les désignerons sous l'appellation de radiographies intra-orales.

La méthode conventionnelle est basée sur l'exposition (rayons X) d'un film de petite taille de très haute définition sans écran, en situation intra-orale en regard de la dent explorée.

Les clichés intra-oraux apportent une **meilleure précision**, une **meilleure netteté**, des **mesures fidèles**, sans apporter de déformation, en comparaison à l'orthopantomogramme. (121). Elle est **simple d'utilisation** par la présence d'angulateur pour maintenir le film en bouche, ce qui permet de **standardiser la prise** de cliché permettant une **reproductibilité** et une comparaison des clichés (122).

4.2. Les principaux indices radiomorphométrique utilisés

Utilisées en routine en chirurgie-dentaire, les liens entre les modifications de la densité osseuse radiologiquement visible et la baisse de densité minérale osseuse du squelette ont été évalués depuis plusieurs années (123–127)

De nombreux indices ont été décrit, notamment l'indice de la trabéculatation osseuse, l'indice de l'épaisseur alvéolaire interdentaire, l'indice de la masse osseuse alvéolaire mandibulaire, l'indice de dimension fractale et l'indice d'intensité de pixel.

Mais ces indices sont-ils pertinents dans la mise en évidence des variations de la densité minérale osseuse de la mandibule ? Comment les évaluer et les appliquer cliniquement ?

4.2.1. L'évaluation de la trabéculatation osseuse

L'évaluation des trabéculatations est effectuée à partir de la classification de LINDH (128)

Trois aspects de trabéculatations sont ainsi décrits au niveau des prémolaires mandibulaires (illustration n°23) :

- **A** : Trabéculatations denses (valeur numérique de 3)
- **B** : Trabéculatations intermédiaires (valeur numérique de 2) avec présence de petites interruptions dans le réseau trabéculaire similaires au défaut de la moelle osseuse
- **C** : Trabéculatations clairsemées (valeur numérique de 1)



Illustration 23: Images de référence présentant les différentes trabéculatations : (A) Trabéculatation dense, (B) trabéculatation intermédiaires, (C) trabéculatation clairsemée d'après LINDH (128)

4.2.2. La masse osseuse alvéolaire mandibulaire (MABM) par analyse photodensitométrique

Décrite par JONASSON (124), la densité optique de la radiographie s'évalue au niveau de la prémolaire de deux façons :

- *Première méthode* : en tant que moyenne de la densité optique de l'os alvéolaire à 6 localisations (3 de chaque côté) au niveau de la racine de la première prémolaire
- *Deuxième méthode* : en tant que mesure de la densité optique de l'os alvéolaire en un emplacement correspondant à la zone de mesure, 6 mm apicalement à la jonction amélocémentaire entre les prémolaires mandibulaires (illustration n°24)

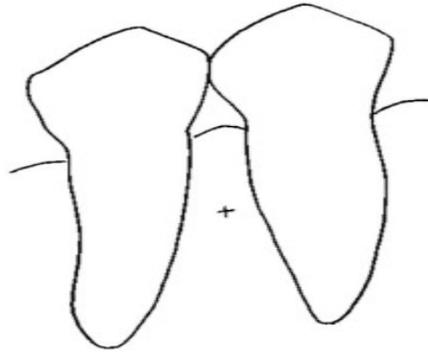


Illustration 24: Schématisation de l'emplacement de la mesure de la masse osseuse alvéolaire mandibulaire d'après JONASSON

4.2.3. L'indice d'intensité de pixel

Décrit, par LAW et al (129), l'indice d'intensité de pixel correspond à une mesure de niveau de gris et pourrait être une méthode simple et utile pour évaluer et mesurer la densité osseuse au niveau des maxillaires.

L'analyse se fait par un logiciel par mesure des niveaux de gris au niveau de deux zones d'intérêt (ROI) de 1 cm² et du calcul d'une moyenne entre la densité du tissu dentaire et la densité du tissu osseux :

- La région 1 (utilisé pour la densité osseuse) : correspond à une zone délimitée entre les racines des prémolaires au niveau de la partie apicale
- La région 2 (utilisé pour la densité dentaire) : correspond à une zone délimitée de dentine et émail sain

4.2.4. L'indice de dimension fractale

Une dimension fractale, décrite par MANDELBROT (130), est « *une grandeur qui a vocation à traduire la façon qu'à un ensemble fractal de remplir l'espace, à toutes les échelles* ».

Pour l'**analyse de la dimension fractale** ou « Fractal Dimension » (FD) de la mandibule, des régions osseuses d'intérêts (ROI) doivent être déterminées radiographiquement, puis transformées et traitées avec un logiciel spécifique. Leur numérisation doit être considérée sous forme d'une matrice de pixels avec une échelle d'intensité en niveau de gris qui permet de mettre en évidence une surface irrégulière quantifiable par dimension fractale.

Les variations de la dimension fractale à partir d'une série de radiographies intra-orales d'une même ROI peuvent ainsi refléter les changements dans le contenu minéral osseux.

On décrit habituellement deux zones de ROI dans le calcul de l'indice de dimension fractale :

- L'angle mandibulaire
- La région Canine / Prémolaire

4.3. Revue de littérature sur les indices radiomorphométriques des radiographies rétro-alvéolaires et la détection précoce de l'ostéoporose

4.3.1. L'indice d'évaluation de la trabéculatation osseuse

L'évaluation de la trabéculatation a été menée au sein de cohortes d'hommes (125,126) ou de femmes (124-127,131) par des radiographies intra-orales péri-apicales et corrélée à une analyse de la DMO par DXA (tableau n°15).

Auteurs	Population d'étude	Résultats
JONASSON et al (2001) (124)	80 femmes dentées	Corrélation entre la DMO et les différents types de trabéculations (r=0,62, P<0,001)
LEE et al (2005) (126)	37 femmes et 29 hommes	Corrélation entre la structure trabéculaire et la DMO fémorale et lombaire.
JONASSON et al (2007) (125)	42 hommes et 42 femmes (de 18 à 84 ans)	Corrélation entre la structure trabéculaire et la DMO chez les femmes, mais absence de corrélation chez les hommes
LINDH et al (2008) (127)	600 femmes âgées de 45 à 70 ans	La sensibilité et la spécificité de la mise en évidence d'une structure trabéculaire clairsemée sont respectivement de 28,2% et de 90,8% pour l'identification des faibles DMO
VERHEIJ et al (2009) (131)	671 femmes de 45 à 71 ans	La sensibilité et la spécificité de la structure trabéculaire sont respectivement de 71% et de 72% pour l'identification des faibles DMO

Tableau 15: Synthèse des études cliniques sur la relation entre la structure trabéculaire osseuse par radiographies rétro-alvéolaires et la densité minérale osseuse (DMO) mesurée par absorptiométrie biphotonique à rayon X

Les études concluent sur le fait que l'évaluation visuelle de la structure trabéculaire lors des radiographies péri-apicales au niveau des régions prémolaires est corrélée à la DMO mandibulaire en particulier chez les femmes (124-126) et serait une méthode potentielle pour identifier les femmes à risque d'ostéoporose. L'utilisation de cet indice dans le

dépistage des faible DMO aurait une bonne spécificité (127,131) mais la sensibilité de cet indicateur serait médiocre (127). Ainsi, la mise en évidence d'une structure trabéculaire altérée (trabéculatation clairsemée) témoignerait d'une faible DMO et inciterait à adresser le patient à une consultation en rhumatologie.

4.3.2. La masse osseuse alvéolaire mandibulaire (MABM) par analyse photodensitométrique

Seul un auteur (JONASSON et al en 2001) s'est proposé d'étudier cet indice. A partir des radiographies intra-orales, les valeurs de densité optique sur une population de femmes dentées étaient prises et une analyse de la DMO par méthode DXA était effectuée.

Les résultats (tableau n°16) ont ainsi pu montrer une corrélation significative entre la DMO et cette masse osseuse alvéolaire mandibulaire par analyse photodensitométrique.

Auteurs	Population d'étude	Résultats
JONASSON et al (2001) (124)	80 femmes dentées	La DMO du squelette et le MABM sont corrélés ($r = 0,46$, $P < 0,001$)

Tableau 16: Synthèse des études cliniques sur la relation entre la masse osseuse alvéolaire mandibulaire (MABM) par analyse photodensitométrique et la densité minérale osseuse (DMO)

JONASSON et al, conclue sur l'intérêt d'études de plus grandes envergures sur cet indice potentiellement utilisable pour la détection précoce de l'ostéoporose.

4.3.3. L'indice d'intensité de pixel (PI)

L'indice PI a été évalué in vitro (mandibules humaines) (131) et dans des populations de femmes ménopausées ostéoporotiques ou non (129,132) et les liens avec la DMO testés (tableau n°17).

Auteurs	Population d'étude	Résultats
LAW et al (1996) (129)	NP*	Le PI est significativement efficace pour la distinction des radiographies du groupe ostéoporotique par rapport au groupe contrôle
HEDSTROM et al (2010) (132)	215 femmes ménopausées de 60 à 74 ans	Corrélation significative entre le PI mandibulaire et la DMO du talon gauche (P = 0,001). La sensibilité, la spécificité, la valeur prédictive positive et négative du PI sont respectivement de 74%, de 50%, de 77% et de 46% pour la détection d'une faible DMO
de Molon et al (2013) (133)	15 mandibules sèches humaines	Absence de variations du PI

Tableau 17: Synthèse des études cliniques sur la relation entre l'intensité de pixel (PI) et la densité minérale osseuse (DMO) par mesure absorptiométrie biphotonique à rayon X (NP : Non précisé dans l'étude)*

De la même manière que l'indice fractale, le PI s'il semble être en lien avec la baisse de la DMO (129,132), son utilisation nécessite la réalisation d'études complémentaires visant à valider son utilisation.

4.3.4. L'indice de dimension fractale

Les liens entre l'indice de dimension fractale et la DMO ont été préalablement vérifiés sur des prélèvements de mandibule (134,135). Dans ces études, les auteurs ont cherchés à confirmer l'impact d'une diminution de la DMO par des méthodes chimiques (déminéralisation) sur les variations de l'indice de dimension fractale (134, 135).

D'autres études cliniques ont évalué les corrélations entre l'indice de dimension fractale et la DMO mesuré classiquement par DXA (64,134–137)

L'ensemble des résultats est présentés ci-après (tableau n° 18).

Auteurs	Population d'étude	Résultats
RUTTIMANN et al (1992) (134)	10 prélèvements anatomiques de mandibules avant/après déminéralisation partielle	La dimension fractale augmente significativement après déminéralisation ($p < 0,0005$) La dimension fractale varie en fonction des emplacements anatomiques ($p < 0,01$)
RUTTIMANN et al (1992) (134)	6 femmes saines et 6 femmes ménopausées	Augmentation significative de la dimension fractale en fonction du statut ménopausique L'indice de dimension fractale augmente chez les femmes plus âgées ($p < 0,01$)
SOUTHARD et al (1996) (135)	10 échantillons d'os alvéolaire maxillaire humain	Forte corrélation entre la déminéralisation généralisée et la diminution de la dimension fractale ($r = -0,94$ moyenne, $p \leq 0,0037$)
SOUTHARD et al (2001) (64)	37 femmes dentées blanches en bonne santé	Corrélations entre la dimension fractale et la DMO du processus alvéolaire mandibulaire ($r = 0,44$, $P \leq 0,05$) Absence de corrélation au niveau du processus alvéolaire maxillaire
YASAR et al (2006) (137)	48 femmes ménopausées de 40 à 64 ans	Absence de différences significatives de la dimension fractale entre les femmes ostéoporotiques et saines

Tableau 18: Synthèse des études cliniques sur la relation entre la dimension fractale et les changements de densité minérale osseuse (DMO) mesuré par absorptiométrie biphotonique à rayon X

Les relations entre l'indice de dimension fractale et la DMO sont controversées : certains auteurs semblent trouver une des variations en fonction du statut ménopausique (134) alors que d'autres non (137). Les résultats ne sont pas également similaires concernant les corrélations de la DMO en fonction du type osseux maxillaire ou mandibulaire (64).

En conclusion, l'indice fractal nécessite d'avantage d'études pour pouvoir justifier d'un éventuel intérêt thérapeutique dans la détection de la baisse de densité minérale osseuse.

4.4. Conclusion

En conclusion, les indices radiomorphométriques mesurés à partir des radiographies dentaires type rétro-alvéolaire ne sont que peu documentés. Seuls quelques-uns semblent efficace (indice de trabéculatation osseuse, indice d'épaisseur alvéolaire inter-dentaire) alors que d'autres nécessitent d'être d'avantage étudiés pour en déterminer la pertinence et leur possibilité d'être appliqué à une démarche de dépistage des faibles densités minérales osseuses.

De plus, ces indices possèdent de nombreuses limites telles que les différentes angulations des clichés intra-oraux ou leur mauvaise sensibilité.

C'est pourquoi, ces indices ne peuvent pas, actuellement, être utilisés comme source possible de détection de la baisse de densité osseuse et du risque accru d'ostéoporose.

CE QU'IL FAUT RETENIR :

Encore très peu documenté comparé aux indices radiomorphométriques issus de l'orthopantomogramme, les indices issus des radiographies intra-orales pourraient être également utile comme base de détection précoce d'un changement dans l'aspect de la mandibule.

Deux indices (l'indice de l'évaluation de la trabéculatation osseuse et l'épaisseur alvéolaire inter-dentaire) sont pour l'instant les deux seuls indices dont les résultats sont favorables.

A l'instar des indices des panoramiques dentaires, les indices des radiographies intra-orales sont soumis à des protocoles standardisés. La réalisation d'un protocole global tendrait à améliorer les résultats des études.

En attendant, les indices issus des radiographies intra-orales ne peuvent à l'heure actuelle être utilisés comme base de détection précoce de l'ostéoporose.

5. Le Cone-Beam Computed Tomographie (CBCT)

5.1. Principes généraux

La tomographie est « *un système de radiographie qui donne non pas une vue globale d'une région ou du corps mais une image de coupe selon un plan, vertical, horizontal ou oblique et qui permet de détailler certains organes ou certaines tumeurs* »

La tomographie volumique à faisceau conique, ou TVFC, est également connue sous le nom de Cone Beam Computer Tomographie (CBCT), et présente un faisceau de rayon X conique. Le principe de base consiste en l'analyse, par un système de détection, de faisceau de rayon X, de forme conique, atténué par l'objet traversé.

Lorsque le tube et le système de détection tournent autour du sujet, des analyses, que ça soit des prises de vues, des clichés ou des projections, sont réalisés dans les différents plans de l'espace permettant une reconstruction volumique d'un cylindre contenant la structure étudié, par transmission des données à un ordinateur.

Le volume étudié se compose de voxels dont le côté est de la taille d'un pixel, mesuré en micromètres (μm), chaque voxel obtenu mesurant entre 70 et 500 μm de côté (taille du pixel). A la différence du scanner où la reconstruction tridimensionnelle s'effectue à partir de coupe 2D, le CBCT permet une acquisition 3D (voxels cubiques isométriques) et produit des coupes 2D à partir de l'acquisition 3D. Les déformations des images 3D sont donc moins importantes avec les acquisitions CBCT comparativement au scanner. De plus, il présente l'avantage d'avoir un coût plus faible, d'être plus rapide et d'irradiation moins importante que le scanner (138–140).

Il serait également plus précis, grâce à une résolution spatiale plus élevée et la présence de moins d'artefacts (141) idéal pour les examens dento-maxillo-facial (142). De plus, le CBCT serait d'une plus grande fiabilité, reproductibilité, indépendamment de l'expérience de l'examineur (143).

Le CBCT est ainsi actuellement une technique de référence en odontostomatologie quand une image tridimensionnelle est nécessaire car il possède de nombreuses indications. C'est le cas, en **Implantologie** (localisation des zones anatomiques), en **Chirurgie** (Pour l'avulsion des dents de sagesse complexe, désinclusions, images claires et denses des maxillaires, pathologies osseuses des ATM, sinusites), en **ODF** (pour les pathologies orthodontiques et malformatives), en **Traumato** (pour les fractures dentoalvéolaires ou

maxillaires), en **Endo** (anatomie canalaire complexes, lésions inflammatoire péri-apicale d'origine endodontique), en **Paro**.

Enfin, le CBCT présente l'avantage d'une véritable discrimination de la microarchitecture osseuse et non seulement de l'évaluation de la teneur en minéraux, comme c'est le cas dans l'absorptiométrie biphotonique à rayon X.

Ces nombreuses indications et ses avantages nous poussent à nous demander si la réalisation d'un Cone-Beam, de pratique courante en chirurgie-dentaire, peut être utilisée également dans l'évaluation de la baisse de la densité minérale osseuse, c'est à dire dans la prédiction de l'ostéoporose.

En particulier, nous chercherons à déterminer si le CBCT pourrait être utilisé comme moyen fiable d'évaluation de la densité minérale osseuse mandibulaire et squelettique, évaluant ainsi l'ostéoporose à partir d'une tomographie des maxillaires. Ensuite, nous verrons si les outils nécessaires pour les analyses de base, telles que la reconstruction multi-planaire, peuvent servir également à la mesure de différents indices tomographiques ainsi qu'à la mesure de la densité radiographique de l'os.

5.2. Le CBCT dans la détection de l'ostéoporose

5.2.1. La détection de la DMO à partir du Cone-Beam

Après l'avènement de la possibilité de décrire la DMO à partir du scanner, le CBCT a été proposé comme méthode de diagnostic pour la détermination de la densité minérale osseuse. En effet, les niveaux de gris obtenu par CBCT témoignent de la densité de minéralisation osseuse (144) et les résultats obtenus sont fortement corrélés aux mesures obtenues par CT dans des sites maxillaires identiques (144–148)

Ainsi, les mesures de la densité minérale osseuse effectuées par CBCT ont été comparées à celles effectuées par absorptiométrie biphotonique à rayons X sur d'autres sites osseux chez l'Homme (149,150) ou in vitro (151) (tableau n°20).

Auteurs	Population d'étude	Méthode d'évaluation	Résultats
MARQUEZAN et al (2012) (151)	20 bovins femelles avec analyse CBCT de la mandibule et DEXA de la crête iliaque	Comparaison DMO du CBCT et méthode DXA	Forte corrélation ($r=0,866$, $P=0,000$) des mesures de la DMO de la mandibule par CBCT et des crêtes iliaques par DXA
BARNGKHEI et al (2014-2015) (149,150)	38 femmes ménopausées ayant subi une méthode DXA de la hanche et des vertèbres lombaires	Comparaison DMO du CBCT et méthode DXA	Corrélation des mesures de la DMO de l'ensemble des zones de la mandibule par CBCT avec les mesures du col fémoral ($r=0,5$, $P=0,05$) et du rachis lombaire ($r=0,6$, $P=0,05$) par DXA

Tableau 19: Synthèse des études cliniques sur la relation entre la densité minérale osseuse (DMO) évalué par Cone Beam (CBCT) et la DMO évalué par absorptiométrie biphotonique à rayon X (DXA)

De fortes corrélations sont retrouvées entre les valeurs de DMO obtenues par CBCT et les valeurs obtenues par DXA (149-151). Le CBCT serait donc considéré comme un outil diagnostique pertinent dans l'évaluation de la densité osseuse dans l'ostéoporose.

5.2.2. Les principaux indices radiomorphométrique utilisés lors tomographie par ordinateur (CTI) et la dimension fractale

Dans le but d'étudier la variation de densité minérale osseuse chez les patients ostéoporotiques, des indices tomographiques par ordinateur ont été définis (152,153)

4 indices tomographiques ont été décrits :

- L'indice tomodensitométrique mandibulaire supérieur (CTI (S))
- L'indice tomodensitométrique mandibulaire inférieur (CTI (I))
- L'indice tomographique de l'indice mentonnier (CTMI)
- L'indice tomographique de l'indice cortical mandibulaire (CTCI)

Ces indices nécessitent une orientation préalable des coupes mandibulaire afin de permettre une mesure reproductible. Les différents axes x, y et z sont déterminés afin de calibrer la position de la mandibule en fonction du centre du foramen mentonnier et selon l'orientation du corps mandibulaire (152,153).

Ainsi sur l'image coronaire, on peut mesurer différents paramètres (illustration n°25) :

- La distance "S" du bord supérieur du foramen mentonnier au bord inférieur de la mandibule

- La distance "I" du bord inférieur du foramen mentonnier au bord inférieur de la mandibule
- L'épaisseur de la corticale (W)

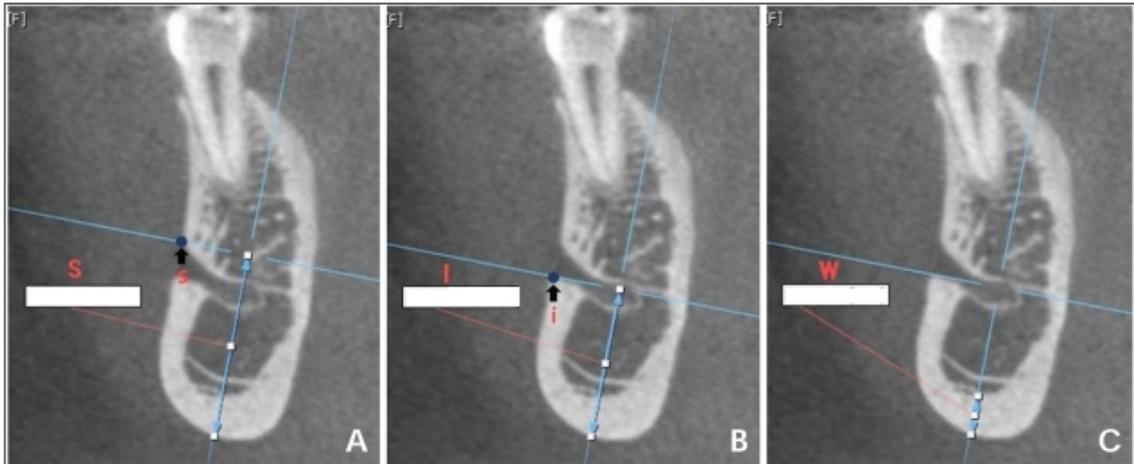


Illustration 25: Image tomodensitométrique montrant la mesure des paramètres « S », « I » et « W » d'après KWANG-JOON KOH

5.2.2.1. Le CTI (S) : Computed Tomography Mandibular Index (Superior)

L'indice tomodensitométrique mandibulaire supérieur, ou CTI (S) correspond au rapport entre la largeur de la corticale mandibulaire inférieure (W) et la distance entre le bord supérieur du foramen mentonnier et le bord inférieur de la mandibule (S).

$$\text{CTI (S)} = W / S$$

5.2.2.2. Le CTI (I) : Computed Tomography Mandibular Index (Inferior)

L'indice tomodensitométrique mandibulaire inférieur, ou CTI (I) correspond au rapport entre la largeur de la corticale mandibulaire (W) et la distance entre le bord inférieur du foramen mentonnier et le bord inférieur de la mandibule (I).

$$\text{CTI (i)} = W / I$$

5.2.2.3. Le CTMI : Computed Tomography Mental Index

L'indice tomographique de l'indice mentonnier correspond à la largeur de la corticale mandibulaire inférieure (W).

$$\text{CTMI} = W$$

5.2.2.4. Le CTCI : Computed Tomography Cortical Index

L'indice tomographique de l'indice cortical mandibulaire correspond au type de forme corticale du corps de la mandibule : type 1, type 2, type 3 (illustration n°26).

Les types de corticale mandibulaire inférieure ont été classés subjectivement comme suit :

- Type 1 : La corticale mandibulaire apparaît normale et régulière
- Type 2 : La corticale mandibulaire présente des défauts semi-lunaires sur une ou deux des couches corticales
- Type 3: La couche corticale présente de nombreux défauts et est clairement poreuse

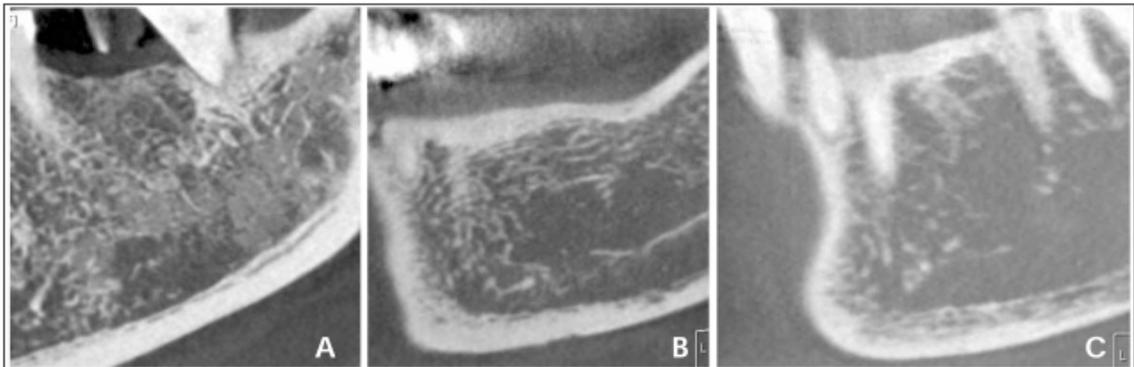


Illustration 26: Image tomodensitométrique montrant la forme de la corticale mandibulaire selon le type 1 (A), le type 2 (B) et le type 3 (C) d'après KWANG-JOON KOH

5.2.2.5. La dimension fractale

La dimension fractale, définie par MANDELBROT en 1984 (130), permet de quantifier le degré d'irrégularité et de fragmentation d'une surface. La dimension fractale est aussi une mesure de la façon dont un ensemble géométrique occupe l'espace.

5.2.3. Revue de littérature sur les indices radiomorphométriques du CBCT et la détection précoce de l'ostéoporose

L'influence de l'ostéoporose sur les indices radiomorphométriques du CBCT n'a, à ce jour, que peu été décrite soit ex vivo à partir d'échantillons d'os mandibulaires (153) ou in vivo sur une population de femmes ménopausées ostéoporotiques ou non (152).

Néanmoins, certains indices radiomorphométriques semblent être corrélés à la densité minérale osseuse dans ces études (tableau n°20).

Auteurs	Population d'étude	Méthode d'évaluation	Résultats
KOH et al (2011) (152)	21 femmes ménopausées ostéoporotiques et 21 femmes ménopausées en bonne santé	Evaluation indices par CBCT et DMO par méthode DXA	Les indices CTI (S), CTI (I) et CTCI du groupe ostéoporotique étaient significativement différent du groupe non ostéoporotique. Absence de significativité pour le CTMI.
HUA et al (2009) (153)	19 échantillons d'os mandibulaires	Evaluation de la dimension fractale par CBCT et de la DMO par méthode DXA	La DMO et la dimension fractale sont corrélées (P <0,05).

Tableau 20: Synthèse des études cliniques sur la relation entre les indices tomodensitométriques (CTI (S) : Computed Tomography Mandibular Index (Superior) ; CTI (I) : Computed Tomography Mandibular Index (Inferior) ; CTCI : Computed Tomography Cortical Index ; CTMI : Computed Tomography Mental Index) évalués par Cone-Beam (CBCT) et la densité minérale osseuse (DMO) évalué par l'absorptiométrie biphotonique à rayon X (DXA)

La perspective d'utilisation de ces indices radiomorphométriques, dans l'évaluation de la qualité de l'os constituerait donc une perspective intéressante dans la détection de l'ostéoporose à partir de l'imagerie tridimensionnelle.

5.2.4. Précaution d'utilisation du CBCT

De nombreuses études ont mis en évidence des facteurs qui pourraient conduire à des incohérences dans l'évaluation des niveaux de gris sur les images de Cone Beam limitant ainsi son utilisation dans l'évaluation de la DMO.

5.2.4.1. Les erreurs « physiques » indépendante du CBCT

L'utilisation d'un champ de rayon X est inhérente à des principes physiques difficilement et contrôlables et générant des erreurs dans l'évaluation de niveaux de gris. Ces erreurs sont secondaires aux principes physiques suivants :

- Les **changements brusques de coefficient d'atténuation** comme les artefacts dû aux structures métalliques (154–156)
- Le **phénomène de durcissement du faisceau de rayons X** (altérations variables d'intensité du spectre d'énergie lors de l'impact au niveau du détecteur) **(154,157)**
- Le **rayonnement diffusé** à l'origine de l'apparition de valeurs de gris plus sombres (154,156–159)
- **La projection discontinue des données** : lorsque le champ de vision est plus petit que l'objet balayé, une bande lumineuse périphérique est créée à proximité du champ de vision, à l'origine d'approximations.

5.2.4.2. Les erreurs dues aux caractéristiques du CBCT

Outre la présence d'artefacts et de l'incohérence des valeurs de gris attribué aux phénomènes physiques du CBCT, la **variation dans les dispositifs de mesure** des niveaux de gris (146,160,161), les **différents paramètres d'acquisition d'images** (160), et la relation entre l'objet évalué et le champ de vision (159–161), peuvent également influencer les images obtenues en raison des modifications des variables associées à une faible reproductibilité des niveaux de gris.

En raison principalement de la nécessité d'intégration de ces nombreuses caractéristiques, il existe dans la plupart des cas une absence de contrôle de manière adéquate dans les études de fiabilité des valeurs de densité dans CBCT.

5.2.4.3. Les erreurs dues à la localisation de la zone étudiée

Un autre facteur qui peut être liée à la variabilité des valeurs de gris dans CBCT est la localisation de la région d'intérêt (zone spécifique de mesure de la densité) dans le champ de vision (160). Cette variabilité est produite lorsque la densité a été déterminée à différents endroits d'une structure homogène, d'autant plus que le même objet est scanné à plusieurs reprises dans différentes positions au sein d'un champ de vision soumis à des conditions d'exposition identique.

5.2.4.4. Les erreurs dues à la taille du champ de vision

Décrit par KATSUMATA (161), ils peuvent être également à l'origine d'erreur d'évaluation des niveaux de gris.

En effet, la diminution des valeurs de gris dans le plus petit champ de vision peut être expliqué par la réduction du diamètre du faisceau de rayons X afin d'irradier seulement la région d'intérêt. Cette limitation du faisceau de rayons X peut conduire à la diminution de la quantité de photons de faible énergie et à l'augmentation de la capacité de pénétration de rayons X, ce qui entraîne une réduction relative de la valeur de l'atténuation des rayons X et des niveaux de gris.

5.2.4.5. La correction des erreurs

Malgré les nombreuses variables qui peuvent affecter la qualité d'image et la détermination des valeurs de gris dans les examens de CBCT, de grands efforts ont été accomplis dans l'obtention valide de niveaux de gris dans ces images notamment par des méthodes de correction mathématique (162).

Néanmoins, en l'absence du respect d'impératifs stricts dans les configurations d'acquisitions d'images ou des algorithmes de correction, et en la nécessité de standardiser l'acquisition des images (niveaux de gris étalonnés), le CBCT utilisé en routine en dentisterie ne permet pas à ce jour une utilisation fiable dans l'évaluation de l'ostéoporose.

5.3. Conclusion

Le développement de la tomodensitométrie à faisceau conique a conduit à une utilisation fréquente de ces images en dentisterie pour l'évaluation des structures odontostomatologique du massif facial et des structures dentaires.

Pourtant, il n'existe pas à ce jour de précautions d'utilisation du CBCT pour l'évaluation de la densité minérale osseuse des structures osseuses cranio-faciales, bien que cette technique a été décrite avec succès.

Selon les études disponibles à ce jour, on peut conclure que le CBCT ne doit pas être considéré comme examen de choix pour la détermination de la densité minérale osseuse des tissus osseux et mous, en l'absence de précaution d'emploi (utilisation dédiée, calibration préalable par des valeurs standards connues).

Néanmoins, c'est un examen qui semble prometteur pour déterminer de façon sensible la baisse de densité minérale osseuse, notamment à partir des indices radiomorphométriques. Ces derniers restent néanmoins à évaluer par des analyses supplémentaires avec de plus larges effectifs.

CE QU'IL FAUT RETENIR :

Le CBCT ayant connu un essor considérable ces dernières années, semble efficace pour évaluer la densité minérale osseuse et donne des résultats en forte corrélation avec les scores obtenues par l'absorptiométrie biphotonique à rayon X.

De la même façon, les indices radiomorphométriques CBCT se sont révélés être un bon indicateur des variations de la densité minérale osseuse et constitueraient une alternative séduisante dans le diagnostic des patients à faible DMO et dans la détection précoce de l'ostéoporose.

Cependant les études trop peu nombreuses et le manque de consensus écartent ce jour les possibilités d'utilisation en routine de ces techniques en chirurgie-dentaire, malgré un avenir prometteur dans l'évaluation clinique de la qualité osseuse.

Conclusion

L'ostéoporose est une pathologie générale complexe touchant principalement les femmes âgées suite à la ménopause. L'espérance de vie ayant fortement augmenté au cours des dernières décennies, la fréquence de survenue ne peut qu'augmenter avec des incidences sur la qualité de vie, notamment sur le risque de fracture.

Sa détection tardive, par l'absorptiométrie biphotonique à rayon X, outil de référence à ce jour, ouvre de nouvelles réflexions quant aux alternatives de mise en évidence précoce et d'anticipation du diagnostic.

Notamment, l'ostéoporose provoque des changements quantitatifs et qualitatifs non seulement au niveau du squelette mais également au niveau de la mandibule. Ces changements morphologiques et en particulier la perte osseuse mandibulaire peuvent être réperables radiologiquement, et analysés à partir de logiciel adapté.

La vocation de cette thèse est d'envisager le chirurgien-dentiste en tant qu'acteur dans le dépistage précoce de l'ostéoporose permettant une prise en charge précoce plus rapide des patients.

Le chirurgien-dentiste pratiquant des radiographies en routine dans le cadre de sa pratique, des indices radiomorphométriques issus des radiographies rétro-alvéolaires, de l'orthopantomogramme et du Cone-Beam, ont été décrits comme solutions potentielles pour anticiper et repérer les diminutions de la densité minérale osseuse, signes d'appels d'une pathologie ostéoporotique sous-jacente.

Plusieurs études ont montré que certains indices radiomorphométriques sont des bons prédicateurs de la baisse de la densité minérale osseuse. En particulier, l'évaluation de l'aspect ou de l'épaisseur corticale mandibulaire effectuée par l'orthopantomogramme (indice cortical mandibulaire MCI et l'indice mentonnier MI) semblent pertinents dans l'évaluation de la densité minérale osseuse mandibulaire. Une analyse systématique de ces paramètres lors de la réalisation des clichés radiologiques auraient donc un intérêt thérapeutique dans le dépistage et la prévention de l'ostéoporose. Bien sûr, les patients dont on suspectera une diminution de la densité minérale osseuse devraient être par la suite orientés vers leur médecin généraliste ou vers une consultation spécialisée auprès d'un rhumatologue afin d'explorer la densité minérale osseuse par DXA.

Cela nécessiterait une communication renforcée entre les dentistes, les radiologues, les rhumatologues et les médecins généralistes. Mais comme les patients consultent leur chirurgien-dentiste régulièrement, il est l'occasion pour le dentiste d'être plus étroitement impliqué dans le suivi de la santé et du bien-être général du patient.

Cependant, à ce jour, l'absence d'études clinique de grandes envergures, mais surtout l'absence d'un consensus sur les normes et les protocoles précis empêchent l'utilisation correcte et pertinente de ces indices radiomorphométriques comme potentiel outil diagnostique. Les perspectives d'avenir d'utilisation des radiographies dentaires semblent pourtant séduisantes dans la démarche de dépistage de l'ostéoporose.

Références bibliographiques

1. HAS - Prévention, diagnostic et traitement de l'ostéoporose [Internet]. [cité 14 juill 2016]. Disponible sur: <http://www.grio.org/documents/rcd-2-1263308592.pdf>
2. Marcelli C, Collège Français des Enseignants en Rhumatologie. Rhumatologie. « Item 56 : Ostéoporose ». 4e éd. Issy-les-Moulineaux : Elsevier Masson ; 2011 :4-19. In.
3. Simon. L et coll « Rhumatologie » Editions Masson Paris, 1993. In.
4. Meunier PJ. Introduction : les défis épidémiologiques et thérapeutiques de l'ostéoporose. Rev Rhum. juin 2005;72:S1-3.
5. Marcus,Feldman, Nelson, and Rosen. Osteoporosis. Third Edition, Vol 2, Elsevier 2008, 2016p, p1437-1445. ISBN-10: 0123705444.
6. Clunie G, Keen R. « Ostéoporose. » Elsevier 2009. 198p. ISBN-10: 2810101183.
7. Eastell R. « Osteoporosis ». The Medicine Publishing Company Ltd. 2005.
8. Haute Autorité de Santé - Ostéodensitométrie sur 2 sites par méthode biphotonique [Internet]. [cité 14 juill 2016]. Disponible sur: http://www.has-sante.fr/portail/jcms/r_1498710/fr/osteodensitometrie-sur-2-sites-par-methode-biphotonique
9. Desmond Curran « Épidémiologie des fractures liées à l'ostéoporose en France : revue de la littérature » Doi : 10.1016/j.rhum.2010.03.010.
10. Svedbon A. Epidemiology and Economic Burden of Osteoporosis in France Arch Osteoporos (2013) 8:137.
11. WASNICH R.D. Epidemiology of osteoporosis. Primer on the Metabolic Bone Diseases and Disorders of Mineral Metabolism. 1999:249-51,4th Ed.
12. CAWSTON H. et al. Epidemiological burden of postmenopausal osteoporosis in France from 2010 to 2020: estimations from a disease model. Arch Osteoporos. 2012;7:237-246.
13. Mark Manuel. Tissu osseux. Institut d'Embryologie Faculté de Médecine et Hôpital Universitaire de Strasbourg Institut de Génétique et de Biologie Moléculaire et Cellulaire.
14. Arana-Chavez VE, Bradaschia-Correa V. Clastic cells: mineralized tissue resorption in health and disease. Int J Biochem Cell Biol. mars 2009;41(3):446-50.
15. Pacifici R. Chapter 41 - Postmenopausal Osteoporosis: How the Hormonal Changes of Menopause Cause Bone Loss. In: Kelsey RMF, éditeur. Osteoporosis (Second Edition) [Internet]. San Diego: Academic Press; 2001 [cité 8 nov 2015]. p. 85-101. Disponible sur: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124708624500428>
16. Johnson RB, Gilbert JA, Cooper RC, Dai X, Newton BI, Tracy RR, et al. Alveolar bone loss one year following ovariectomy in sheep. J Periodontol. sept

1997;68(9):864-71.

17. Johnson RB, Gilbert JA, Cooper RC, Parsell DE, Stewart BA, Dai X, et al. Effect of estrogen deficiency on skeletal and alveolar bone density in sheep. *J Periodontol.* avr 2002;73(4):383-91.
18. Brown JP, Albert C, Nassar BA, Adachi JD, Cole D, Davison KS, et al. Bone turnover markers in the management of postmenopausal osteoporosis. *Clin Biochem.* juill 2009;42(10-11):929-42.
19. Ejiri S, Tanaka M, Watanabe N, Anwar RB, Yamashita E, Yamada K, et al. Estrogen deficiency and its effect on the jaw bones. *J Bone Miner Metab.* 2008;26(5):409-15.
20. Beatrice Bouvard. Ostéoporose cortisonique et autres ostéoporoses secondaires. *Tissues and Organs.* Université d'Angers, 2011. In.
21. Kageyama G. [The Diagnosis and Treatment of Osteoporosis]. *Rinsho Byori.* mai 2015;63(5):570-9.
22. Roux C, Orcel P. « Steroid induced osteoporosis: prevention and treatment. » *Rev Med Interne.* 2003 Jun;24(6):384-8. In.
23. Briot K, Roux C. « Ostéoporose cortico-induite. » *Rev Méd Int* 2013;34:315-23.
24. Hébuterne, X « Traité de nutrition de la personne âgée » Editions SPRINGER, 2009.
25. Haute Autorité de Santé - Ostéoporose [Internet]. [cité 11 juill 2016]. Disponible sur: http://www.has-sante.fr/portail/jcms/c_1194578/fr/osteoporose
26. Orcel P. « Facteurs de risque identifiés dans l'ostéoporose ». Paris, disponible sur <<http://www.grio.org/documents/frax-tool-200-1264066147.pdf>>.
27. Dargent-Molina P, Piault S, Breart G. « Identification of women at increased risk of osteoporosis: No need to use different screening tools at different ages. » *Maturitas* 2006;54(1):55-64.
28. Dreux, C., Delmas, P. Les méthodes de mesure de la densité minérale osseuse (DMO) et des marqueurs du remodelage osseux dans le dépistage de l'ostéoporose. *Bull Acad Nat Med.* 2001;185:S169.
29. Dreux C et Menkes CJ. « Méthodes de mesure de la densité minérale osseuse (DMO) et examens biologiques dans la prise en charge de l'ostéoporose », Rapport pour l'Académie Nationale de Médecine. *Bull Acad natl méd.* 2006;190(6):1275-1290.
30. Garnero P., Delmas P.D. 1993. Assessment of the serum levels of bone alkaline phosphatase with a new immunoradiometric assay in patients with metabolic bone disease. *J Clin Endocrinol Metab* 77 : 1046-1053.
31. Garnero P., Grimaux M., Demiaux B., Preaudat C., Seguin P., Delmas P.D. 1992. Measurements of serum osteocalcin with a human specific two site immunoradiometric assay. *J Bone Miner Res* 77 :1389-1397.

32. Okabe R, Ueda M. [New biochemical markers of bone turnover]. *Nihon Rinsho Jpn J Clin Med.* mars 2002;60 Suppl 3:249-55.
33. Garnero P., Sornay-Rendu E., Chapuy M.C., Delmas P.D. 1996. Increased bone turnover in late postmenopausal women is a major determinant of osteoporosis. *J Bone Miner Res* 11 : 337-349.
34. Makker A, Singh MM, Mishra G, Singh BP, Jain GK, Jadhav S. Relationship between bone turnover biomarkers, mandibular bone mineral density, and systemic skeletal bone mineral density in premenopausal and postmenopausal Indian women. *Menopause N Y N.* juin 2012;19(6):642-9.
35. Kaczmarek A, Nowak A, Leszczynski P. Bone Mineral Density and Biochemical Markers of Bone Metabolism in Women Engaging in Recreational Horseback Riding. *J Phys Act Health.* 28 oct 2015;
36. Younes.M, Hachfi H., Neffati Hassine; Intérêt des marqueurs du remodelage osseux dans le diagnostic de l'ostéoporose et la prédiction du risque de fracture. *La tunisie Medicale* (2014) ; vol 92 (n°05) : 304-310 [Internet]. [cité 7 nov 2015]. Disponible sur: http://www.latunisiemedicale.com/article-medicale-tunisie_2550_fr
37. Parfitt A.M., et al. 1987. Procollagen type I carboxyterminal extension peptide in serum as a marker of collagen biosynthesis in bone. Correlation with iliac bone formation rates and comparison with total alkaline phosphatase. *J Bone Miner Res* 2 : 247-436.
38. Chapurlat RD, Garnero P, Brárt G, Meunier PJ, Delmas PD. Serum type I collagen breakdown product (serum CTX) predicts hip fracture risk in elderly women:: The EPIDOS study. *Bone.* août 2000;27(2):283-6.
39. Taguchi A, Sanada M, Krall E, Nakamoto T, Ohtsuka M, Suei Y, et al. Relationship between dental panoramic radiographic findings and biochemical markers of bone turnover. *J Bone Miner Res Off J Am Soc Bone Miner Res.* sept 2003;18(9):1689-94.
40. Taguchi A, Ohtsuka M, Nakamoto T, Suei Y, Kudo Y, Tanimoto K, et al. Detection of post-menopausal women with low bone mineral density and elevated biochemical markers of bone turnover by panoramic radiographs. *Dento Maxillo Facial Radiol.* déc 2008;37(8):433-7.
41. Gerdhem P, Ivaska KK, Alatalo SL, Halleen JM, Hellman J, Isaksson A, et al. Biochemical markers of bone metabolism and prediction of fracture in elderly women. *J Bone Miner Res.* 2004;19(3):386-93.
42. Luukinen H, Kakonen S-M, Pettersson K, Koski K, Laippala P, Lovgren T, et al. Strong prediction of fractures among older adults by the ratio of carboxylated to total serum osteocalcin. *J Bone Miner Res.* 2000;15(12):2473-8.
43. Riggs BL, Khosla S, Melton III LJ. Sex steroids and the construction and conservation of the adult skeleton. *Endocr Rev.* 2002;23(3):279-302.
44. Riggs BL. The mechanisms of estrogen regulation of bone resorption. *J Clin Invest.* 15 nov 2000;106(10):1203-4.

45. World Health Organization. « Prevention and management of osteoporosis. » Genève: WHO [www.who.int]; 2003.
46. Agence nationale d'accréditation et d'évaluation en santé. Les indications des mesures quantitatives du tissu osseux : actualisation. Paris: Anaes [www.has-sante.fr]; 2000.
47. Agence nationale d'accréditation et d'évaluation en santé. « L'ostéoporose chez les femmes ménopausées et chez les sujets traités par corticoïdes : méthodes diagnostiques et indications. » Paris: Anaes [www.has-sante.fr]; 2001.
48. Damilakis J, Maris TG, Karantanas AH. An update on the assessment of osteoporosis using radiologic techniques. *Eur Radiol.* juin 2007;17(6):1591-602.
49. Rey P. et al « Measurement of forearm bone mineral density by X-ray absorptiometry : comparison with other skeletal sites. » *Rev Rhum* 61, 1994 : 548-554.
50. Nahum. H « Traité d'imagerie médicale - Volume 2 » Editions MÉDECINE SCIENCES PUBLICATIONS / LAVOISIER, 2014. In.
51. VIGNOT E, DELMAS P. du bon usage de l'ostéodensitométrie : le remboursement presque calqué sur les indications. 2007.
52. Kanis JA, Borgstrom F, De Laet C, Johansson H, Johnell O, Jonsson B, et al. Assessment of fracture risk. *Osteoporos Int J Establ Result Coop Eur Found Osteoporos Natl Osteoporos Found USA.* juin 2005;16(6):581-9.
53. Cao T, Shirota T, Yamazaki M, Ohno K, Michi KI. Bone mineral density in mandibles of ovariectomized rabbits. *Clin Oral Implants Res.* déc 2001;12(6):604-8.
54. Kuroda S, Mukohyama H, Kondo H, Aoki K, Ohya K, Ohyama T, et al. Bone mineral density of the mandible in ovariectomized rats: analyses using dual energy X-ray absorptiometry and peripheral quantitative computed tomography. *Oral Dis.* janv 2003;9(1):24-8.
55. Tanaka M, Ejiri S, Toyooka E, Kohno S, Ozawa H. Effects of ovariectomy on trabecular structures of rat alveolar bone. *J Periodontal Res.* avr 2002;37(2):161-5.
56. von Wovern N. Dual-photon absorptiometry of mandibles: in vitro test of a new method. *Scand J Dent Res.* avr 1985;93(2):169-77.
57. von Wovern N, Storm TL, Olgaard K. Bone mineral content by photon absorptiometry of the mandible compared with that of the forearm and the lumbar spine. *Calcif Tissue Int.* mars 1988;42(3):157-61.
58. Kribbs PJ, Chesnut CH, Ott SM, Kilcoyne RF. Relationships between mandibular and skeletal bone in a population of normal women. *J Prosthet Dent.* janv 1990;63(1):86-9.
59. Klemetti E, Vainio P, Lassila V, Alhava E. Cortical bone mineral density in the mandible and osteoporosis status in postmenopausal women. *Scand J Dent Res.* août 1993;101(4):219-23.
60. Corten FG, van 't Hof MA, Buijs WC, Hoppenbrouwers P, Kalk W, Corstens FH.

Measurement of mandibular bone density ex vivo and in vivo by dual-energy X-ray absorptiometry. *Arch Oral Biol.* mars 1993;38(3):215-9.

61. Horner K, Devlin H, Alsop CW, Hodgkinson IM, Adams JE. Mandibular bone mineral density as a predictor of skeletal osteoporosis. *Br J Radiol.* nov 1996;69(827):1019-25.
62. Streckfus CF, Johnson RB, Nick T, Tsao A, Tucci M. Comparison of alveolar bone loss, alveolar bone density and second metacarpal bone density, salivary and gingival crevicular fluid interleukin-6 concentrations in healthy premenopausal and postmenopausal women on estrogen therapy. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* nov 1997;52(6):M343-351.
63. Horner K, Devlin H. The relationships between two indices of mandibular bone quality and bone mineral density measured by dual energy X-ray absorptiometry. *Dento Maxillo Facial Radiol.* janv 1998;27(1):17-21.
64. Southard TE, Southard KA, Lee A. Alveolar process fractal dimension and postcranial bone density. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology.* avr 2001;91(4):486-91.
65. Jeffcoat MK, Lewis CE, Reddy MS, Wang CY, Redford M. Post-menopausal bone loss and its relationship to oral bone loss. *Periodontol 2000.* juin 2000;23:94-102.
66. Shroot MK, Hildebolt CF, Potter BJ, Brunsdan TK, Pilgram TK, Dotson M, et al. Comparison of morphological measurements extracted from digitized dental radiographs with lumbar and femoral bone mineral density measurements in postmenopausal women. *J Periodontol.* mars 2000;71(3):335-40.
67. Groen JJ, Duyvensz F, Halsted JA. Diffuse alveolar atrophy of the jaw (non-inflammatory form of paradental disease) and pre-senile osteoporosis. *Gerontol Clin (Basel).* 1960;2:68-86.
68. Hans D, Arlot ME, Schott AM, Roux JP, Kotzki PO, Meunier PJ. Do ultrasound measurements on the os calcis reflect more the bone microarchitecture than the bone mass?: a two-dimensional histomorphometric study. *Bone.* mars 1995;16(3):295-300.
69. Ishii K, Taguchi A, Nakamoto T, Ohtsuka M, Sutthiprapaporn P, Tsuda M, et al. Diagnostic efficacy of alveolar bone loss of the mandible for identifying postmenopausal women with femoral osteoporosis. *Dento Maxillo Facial Radiol.* janv 2007;36(1):28-33.
70. Taguchi A, Suei Y, Ohtsuka M, Otani K, Tanimoto K, Ohtaki M. Usefulness of panoramic radiography in the diagnosis of postmenopausal osteoporosis in women. Width and morphology of inferior cortex of the mandible. *Dento Maxillo Facial Radiol.* nov 1996;25(5):263-7.
71. Dervis E. Oral implications of osteoporosis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* sept 2005;100(3):349-56.
72. Devlin H, Horner K. Diagnosis of osteoporosis in oral health care. *J Oral Rehabil.* févr 2008;35(2):152-7.

73. Graham J. Detecting low bone mineral density from dental radiographs: a mini-review. *Clin Cases Miner Bone Metab.* 2015;12(2):178-82.
74. Klemetti E, Kolmakow S. Morphology of the mandibular cortex on panoramic radiographs as an indicator of bone quality. *Dento Maxillo Facial Radiol.* janv 1997;26(1):22-5.
75. Ledgerton D, Horner K, Devlin H, Worthington H. Radiomorphometric indices of the mandible in a British female population. *Dento Maxillo Facial Radiol.* mai 1999;28(3):173-81.
76. Devlin H, Horner K. Mandibular radiomorphometric indices in the diagnosis of reduced skeletal bone mineral density. *Osteoporos Int J Establ Result Coop Eur Found Osteoporos Natl Osteoporos Found USA.* mai 2002;13(5):373-8.
77. Benson BW, Prihoda TJ, Glass BJ. Variations in adult cortical bone mass as measured by a panoramic mandibular index. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* mars 1991;71(3):349-56.
78. Andrade, K.M., Mazzetto, M.O., & Watanabe, P.C.A. (2009). A precisão do Índice Panorâmico Mandibular na detecção de pacientes com osteopenia e osteoporose. *Anais da 31ª JORP, FORP/USP.*
79. Vlasidis KZ, Skouteris CA, Velegrakis GA, Fragouli I, Neratzoulakis JM, Damilakis J, et al. Mandibular radiomorphometric measurements as indicators of possible osteoporosis in postmenopausal women. *Maturitas.* 20 nov 2007;58(3):226-35.
80. Tosoni GM, Lurie AG, Cowan AE, Burlison JA. Pixel intensity and fractal analyses: detecting osteoporosis in perimenopausal and postmenopausal women by using digital panoramic images. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* août 2006;102(2):235-41.
81. Govindraj P, Chandra P. Radiomorphometric Indices of the Mandible – An Indicator of Osteoporosis. *J Clin Diagn Res JCDR.* mars 2014;8(3):195-8.
82. Devlin CV, Horner K, Devlin H. Variability in measurement of radiomorphometric indices by general dental practitioners. *Dento Maxillo Facial Radiol.* mars 2001;30(2):120-5.
83. Devlin H, Allen PD, Graham J, Jacobs R, Karayianni K, Lindh C, et al. Automated osteoporosis risk assessment by dentists: A new pathway to diagnosis. *Bone.* avr 2007;40(4):835-42.
84. Arifin AZ, Asano A, Taguchi A, Nakamoto T, Ohtsuka M, Tsuda M, et al. Computer-aided system for measuring the mandibular cortical width on dental panoramic radiographs in identifying postmenopausal women with low bone mineral density. *Osteoporos Int J Establ Result Coop Eur Found Osteoporos Natl Osteoporos Found USA.* 2006;17(5):753-9.
85. Nakamoto T, Taguchi A, Ohtsuka M, Sueti Y, Fujita M, Tsuda M, et al. A computer-aided diagnosis system to screen for osteoporosis using dental panoramic radiographs. *Dento Maxillo Facial Radiol.* juill 2008;37(5):274-81.

86. Kavitha MS, Asano A, Taguchi A, Kurita T, Sanada M. Diagnosis of osteoporosis from dental panoramic radiographs using the support vector machine method in a computer-aided system. *BMC Med Imaging*. 16 janv 2012;12:1.
87. López-López J, Álvarez-López JM, Jané-Salas E, Estrugo-Devesa A, Ayuso-Montero R, Velasco-Ortega E, et al. Computer-aided system for morphometric mandibular index computation (Using dental panoramic radiographs). *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*. juill 2012;17(4):e624-32.
88. Morita I, Nakagaki H, Taguchi A, Kato K, Murakami T, Tsuboi S, et al. Relationships between mandibular cortical bone measures and biochemical markers of bone turnover in elderly Japanese men and women. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology*. nov 2009;108(5):777-83.
89. Vlasiadis KZ, Damilakis J, Velegarakis GA, Skouteris CA, Fragouli I, Goumenou A, et al. Relationship between BMD, dental panoramic radiographic findings and biochemical markers of bone turnover in diagnosis of osteoporosis. *Maturitas*. 20 mars 2008;59(3):226-33.
90. Johari Khatoonabad M, Aghamohammadzade N, Taghili H, Esmaeili F, Jabbari Khamnei H. Relationship Among Panoramic Radiography Findings, Biochemical Markers of Bone Turnover and Hip BMD in the Diagnosis of Postmenopausal Osteoporosis. *Iran J Radiol*. mars 2011;8(1):23-8.
91. osteoporose-texte_long.pdf [Internet]. [cité 14 juill 2016]. Disponible sur: http://www.conseil-scientifique.lu/fileadmin/files/GT_analyses_laboratoires/osteoporose-texte_long.pdf
92. Bollen AM, Taguchi A, Hujoel PP, Hollender LG. Case-control study on self-reported osteoporotic fractures and mandibular cortical bone. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. oct 2000;90(4):518-24.
93. Zlatarić DK, Celebić A. Clinical bone densitometric evaluation of the mandible in removable denture wearers dependent on the morphology of the mandibular cortex. *J Prosthet Dent*. juill 2003;90(1):86-91.
94. Halling A, Persson GR, Berglund J, Johansson O, Renvert S. Comparison between the Klemetti index and heel DXA BMD measurements in the diagnosis of reduced skeletal bone mineral density in the elderly. *Osteoporos Int J Establ Result Coop Eur Found Osteoporos Natl Osteoporos Found USA*. août 2005;16(8):999-1003.
95. Taguchi A, Tsuda M, Ohtsuka M, Kodama I, Sanada M, Nakamoto T, et al. Use of dental panoramic radiographs in identifying younger postmenopausal women with osteoporosis. *Osteoporos Int J Establ Result Coop Eur Found Osteoporos Natl Osteoporos Found USA*. 2006;17(3):387-94.
96. Marandi S, Bagherpour A, Imanimoghaddam M, Hatef M, Haghighi A. Panoramic-Based Mandibular Indices and Bone Mineral Density of Femoral Neck and Lumbar Vertebrae in Women. *J Dent Tehran Iran*. 2010;7(2):98-106.
97. Khojastehpour L, Mogharrabi S, Dabbaghmanesh MH, Iraj Nasrabadi N. Comparison of the Mandibular Bone Densitometry Measurement Between Normal, Osteopenic and

- Osteoporotic Postmenopausal Women. *J Dent Tehran Iran*. mai 2013;10(3):203-9.
98. Calciolari E, Donos N, Park JC, Petrie A, Mardas N. Panoramic Measures for Oral Bone Mass in Detecting Osteoporosis A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Dent Res*. 1 mars 2015;94(3 suppl):17S-27S.
99. Singh SV, Aggarwal H, Gupta V, Kumar P, Tripathi A. Measurements in Mandibular Pantomographic X-rays and Relation to Skeletal Mineral Densitometric Values. *J Clin Densitom Off J Int Soc Clin Densitom*. 28 avr 2015;
100. Lee K, Taguchi A, Ishii K, Sueti Y, Fujita M, Nakamoto T, et al. Visual assessment of the mandibular cortex on panoramic radiographs to identify postmenopausal women with low bone mineral densities. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. août 2005;100(2):226-31.
101. Dutra V, Susin C, da Costa NP, Veeck EB, Bahlis A, Fernandes A da RC. Measuring cortical thickness on panoramic radiographs: a validation study of the Mental Index. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. nov 2007;104(5):686-91.
102. Dagistan S, Bilge O. Comparison of antegonial index, mental index, panoramic mandibular index and mandibular cortical index values in the panoramic radiographs of normal males and male patients with osteoporosis. *Dentomaxillofacial Radiol*. juill 2010;39(5):290-4.
103. Nagi R, Devi B.K. Y, Rakesh N, Reddy SS, Santana N, Shetty N. Relationship Between Femur Bone Mineral Density, Body Mass Index and Dental Panoramic Mandibular Cortical Width in Diagnosis of Elderly Postmenopausal Women With Osteoporosis. *J Clin Diagn Res JCDR*. août 2014;8(8):ZC36-ZC40.
104. Hekmatin E, Ahmadi SS, Ataiekhorsgani M, Feizianfard M, Jafaripozve S, Jafaripozve N. Prediction of lumbar spine bone mineral density from the mandibular cortical width in postmenopausal women. *J Res Med Sci Off J Isfahan Univ Med Sci*. nov 2013;18(11):951-5.
105. White SC. Oral radiographic predictors of osteoporosis. *Dento Maxillo Facial Radiol*. mars 2002;31(2):84-92.
106. Leite AF, Figueiredo PT de S, Guia CM, Melo NS, de Paula AP. Correlations between seven panoramic radiomorphometric indices and bone mineral density in postmenopausal women. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology*. mars 2010;109(3):449-56.
107. Dutra V, Devlin H, Susin C, Yang J, Horner K, Fernandes ARC. Mandibular morphological changes in low bone mass edentulous females: evaluation of panoramic radiographs. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. nov 2006;102(5):663-8.
108. Watson EL, Katz RV, Adelezzi R, Gift HC, Dunn SM. The measurement of mandibular cortical bone height in osteoporotic vs. non-osteoporotic postmenopausal women. *Spec Care Dent Off Publ Am Assoc Hosp Dent Acad Dent Handicap Am Soc Geriatr Dent*. juin 1995;15(3):124-8.

109. Mahl CRW, Licks R, Fontanella VRC. Comparison of morphometric indices obtained from dental panoramic radiography for identifying individuals with osteoporosis/osteopenia. *Radiol Bras.* juin 2008;41(3):183-7.
110. Gulsahi A, Yüzügüllü B, Imirzalioglu P, Genç Y. Assessment of panoramic radiomorphometric indices in Turkish patients of different age groups, gender and dental status. *Dento Maxillo Facial Radiol.* juill 2008;37(5):288-92.
111. Damilakis J, Vlasiadis K. Have panoramic indices the power to identify women with low BMD at the axial skeleton? *Phys Medica PM Int J Devoted Appl Phys Med Biol Off J Ital Assoc Biomed Phys AIFB.* janv 2011;27(1):39-43.
112. Geary S, Selvi F, Chuang S-K, August M. Identifying dental panoramic radiograph features for the screening of low bone mass in postmenopausal women. *Int J Oral Maxillofac Surg.* mars 2015;44(3):395-9.
113. Oliveira ML, Pedrosa EFNC, Cruz AD, Haiter-Neto F, Paula FJA, Watanabe PCA. Relationship between bone mineral density and trabecular bone pattern in postmenopausal osteoporotic Brazilian women. *Clin Oral Investig.* nov 2013;17(8):1847-53.
114. Knezović Zlatarić D, Celebić A, Lazić B, Baucić I, Komar D, Stipetić-Ovcaricek J, et al. Influence of age and gender on radiomorphometric indices of the mandible in removable denture wearers. *Coll Antropol.* juin 2002;26(1):259-66.
115. Dutra V, Yang J, Devlin H, Susin C. Radiomorphometric indices and their relation to gender, age, and dental status. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* avr 2005;99(4):479-84.
116. Yüzügüllü B, Gulsahi A, Imirzalioglu P. Radiomorphometric indices and their relation to alveolar bone loss in completely edentulous Turkish patients: a retrospective study. *J Prosthet Dent.* mars 2009;101(3):160-5.
117. Alonso MBCC, Cortes ARG, Camargo AJ, Arita ES, Haiter-Neto F, Watanabe PCA. Assessment of Panoramic Radiomorphometric Indices of the Mandible in a Brazilian Population. *ISRN Rheumatol [Internet].* 2011 [cité 7 nov 2015];2011. Disponible sur: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3263751/>
118. Bajoria AA, ML A, Kamath G, Babshet M, Patil P, Sukhija P. Evaluation of Radiomorphometric Indices in Panoramic Radiograph – A Screening Tool. *Open Dent J.* 31 juill 2015;9:303-10.
119. Hastar E, Yilmaz HH, Orhan H. Evaluation of Mental Index, Mandibular Cortical Index and Panoramic Mandibular Index on Dental Panoramic Radiographs in the Elderly. *Eur J Dent.* janv 2011;5(1):60-7.
120. Imirzalioglu P, Yuzugullu B, Gulsahi A. Correlation between residual ridge resorption and radiomorphometric indices. *Gerodontology.* juin 2012;29(2):e536-542.
121. Teman, G., Lacan, A. and Sarrazin, L., *Imagerie maxillo-faciale pratique*, ed. Q.International. 2002.

122. Haring, J. and Howerton, L., Dental radiography, principles and techniques., ed.Saunders/Elsevier. 2006.
123. Jonasson G, Kiliaridis S, Gunnarsson R. Cervical thickness of the mandibular alveolar process and skeletal bone mineral density. *Acta Odontol Scand.* juin 1999;57(3):155-61.
124. Jonasson G, Bankvall G, Kiliaridis S. Estimation of skeletal bone mineral density by means of the trabecular pattern of the alveolar bone, its interdental thickness, and the bone mass of the mandible. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology.* sept 2001;92(3):346-52.
125. Jonasson G, Jonasson L, Kiliaridis S. Skeletal bone mineral density in relation to thickness, bone mass, and structure of the mandibular alveolar process in dentate men and women. *Eur J Oral Sci.* avr 2007;115(2):117-23.
126. Lee BD, White SC. Age and trabecular features of alveolar bone associated with osteoporosis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology.* juill 2005;100(1):92-8.
127. Lindh C, Horner K, Jonasson G, Olsson P, Rohlin M, Jacobs R, et al. The use of visual assessment of dental radiographs for identifying women at risk of having osteoporosis: the OSTEODENT project. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology.* août 2008;106(2):285-93.
128. Lindh C, Petersson A, Rohlin M. Assessment of the trabecular pattern before endosseous implant treatment: Diagnostic outcome of periapical radiography in the mandible. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology.* sept 1996;82(3):335-43.
129. Law AN, Bollen AM, Chen SK. Detecting osteoporosis using dental radiographs: a comparison of four methods. *J Am Dent Assoc* 1939. déc 1996;127(12):1734-42.
130. Mandelbrot BB. *The fractal geometry of nature.* New York: WH Freeman, 1983:15, 353-65.
131. Verheij JGC, Geraets WGM, van der Stelt PF, Horner K, Lindh C, Nicopoulou-Karayianni K, et al. Prediction of osteoporosis with dental radiographs and age. *Dento Maxillo Facial Radiol.* oct 2009;38(7):431-7.
132. Hedström L, Baigi A, Bergh H. The relation between bone mineral density in the heel and pixel intensity in the mandibular jaw bone among elderly women. *Dento Maxillo Facial Radiol.* oct 2010;39(7):409-13.
133. de Molon RS, Batitucci RG, Spin-Neto R, Paquier GM, Sakakura CE, Tosoni GM, et al. Comparison of changes in dental and bone radiographic densities in the presence of different soft-tissue simulators using pixel intensity and digital subtraction analyses. *Dento Maxillo Facial Radiol.* 2013;42(9):20130235.
134. Ruttimann UE, Webber RL, Hazelrig JB. Fractal dimension from radiographs of peridental alveolar bone: A possible diagnostic indicator of osteoporosis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* juill 1992;74(1):98-110.

135. Southard TE, Southard KA, Jakobsen JR, Hillis SL, Najim CA. Fractal dimension in radiographic analysis of alveolar process bone. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology*. nov 1996;82(5):569-76.
136. Majumdar S, Lin J, Link T, Millard J, Augat P, Ouyang X, et al. Fractal analysis of radiographs: assessment of trabecular bone structure and prediction of elastic modulus and strength. *Med Phys*. juill 1999;26(7):1330-40.
137. Yaşar F, Akgünlü F. The differences in panoramic mandibular indices and fractal dimension between patients with and without spinal osteoporosis. *Dento Maxillo Facial Radiol*. janv 2006;35(1):1-9.
138. Mozzo P, Procacci C, Tacconi A, Martini PT, Andreis IA. A new volumetric CT machine for dental imaging based on the cone-beam technique: preliminary results. *Eur Radiol*. 1998;8(9):1558-64.
139. Ludlow JB, Ivanovic M. Comparative dosimetry of dental CBCT devices and 64-slice CT for oral and maxillofacial radiology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. juill 2008;106(1):106-14.
140. White SC, Pharoah MJ. The evolution and application of dental maxillofacial imaging modalities. *Dent Clin North Am*. oct 2008;52(4):689-705, v.
141. Naitoh M, Katsumata A, Mitsuya S, Kamemoto H, Ariji E. Measurement of mandibles with microfocus x-ray computerized tomography and compact computerized tomography for dental use. *Int J Oral Maxillofac Implants*. avr 2004;19(2):239-46.
142. Suomalainen A, Kiljunen T, Käser Y, Peltola J, Kortensniemi M. Dosimetry and image quality of four dental cone beam computed tomography scanners compared with multislice computed tomography scanners. *Dento Maxillo Facial Radiol*. sept 2009;38(6):367-78.
143. Tomasi C, Bressan E, Corazza B, Mazzoleni S, Stellini E, Lith A. Reliability and reproducibility of linear mandible measurements with the use of a cone-beam computed tomography and two object inclinations. *Dento Maxillo Facial Radiol*. mai 2011;40(4):244-50.
144. Valiyaparambil JV, Yamany I, Ortiz D, Shafer DM, Pendrys D, Freilich M, et al. Bone quality evaluation: comparison of cone beam computed tomography and subjective surgical assessment. *Int J Oral Maxillofac Implants*. oct 2012;27(5):1271-7.
145. Aranyarachkul P, Caruso J, Gantes B, Schulz E, Riggs M, Dus I, et al. Bone density assessments of dental implant sites: 2. Quantitative cone-beam computerized tomography. *Int J Oral Maxillofac Implants*. juin 2005;20(3):416-24.
146. Mah P, Reeves TE, McDavid WD. Deriving Hounsfield units using grey levels in cone beam computed tomography. *Dentomaxillofacial Radiol*. sept 2010;39(6):323-35.
147. Nomura Y, Watanabe H, Honda E, Kurabayashi T. Reliability of voxel values from cone-beam computed tomography for dental use in evaluating bone mineral density. *Clin Oral Implants Res*. mai 2010;21(5):558-62.

148. Parsa A, Ibrahim N, Hassan B, Motroni A, van der Stelt P, Wismeijer D. Reliability of voxel gray values in cone beam computed tomography for preoperative implant planning assessment. *Int J Oral Maxillofac Implants*. déc 2012;27(6):1438-42.
149. Barnkgkei I, Al Haffar I, Khattab R. Osteoporosis prediction from the mandible using cone-beam computed tomography. *Imaging Sci Dent*. déc 2014;44(4):263-71.
150. Barnkgkei I, Joury E, Jawad A. An innovative approach in osteoporosis opportunistic screening by the dental practitioner: the use of cervical vertebrae and cone beam computed tomography with its viewer program. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol*. nov 2015;120(5):651-9.
151. Marquezan M, Lau TCL, Mattos CT, da Cunha AC, Nojima LI, Sant'Anna EF, et al. Bone mineral density. *Angle Orthod*. 20 juill 2011;82(1):62-6.
152. Koh K-J, Kim K-A. Utility of the computed tomography indices on cone beam computed tomography images in the diagnosis of osteoporosis in women. *Imaging Sci Dent*. sept 2011;41(3):101-6.
153. Hua Y, Nackaerts O, Duyck J, Maes F, Jacobs R. Bone quality assessment based on cone beam computed tomography imaging. *Clin Oral Implants Res*. août 2009;20(8):767-71.
154. Schulze R, Heil U, Gross D, Bruellmann DD, Dranischnikow E, Schwanecke U, et al. Artefacts in CBCT: a review. *Dento Maxillo Facial Radiol*. juill 2011;40(5):265-73.
155. Reeves T, Mah P, McDavid W. Deriving Hounsfield units using grey levels in cone beam CT: a clinical application. *Dentomaxillofacial Radiol*. sept 2012;41(6):500-8.
156. Pauwels R, Stamatakis H, Bosmans H, Bogaerts R, Jacobs R, Horner K, et al. Quantification of metal artifacts on cone beam computed tomography images. *Clin Oral Implants Res*. août 2013;24 Suppl A100:94-9.
157. Pauwels R, Nackaerts O, Bellaiche N, Stamatakis H, Tsiklakis K, Walker A, et al. Variability of dental cone beam CT grey values for density estimations. *Br J Radiol*. janv 2013;86(1021):20120135.
158. Katsumata A, Hirukawa A, Okumura S, Naitoh M, Fujishita M, Arijji E, et al. Effects of image artifacts on gray-value density in limited-volume cone-beam computerized tomography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. déc 2007;104(6):829-36.
159. Bryant JA, Drage NA, Richmond S. Study of the scan uniformity from an i-CAT cone beam computed tomography dental imaging system. *Dento Maxillo Facial Radiol*. oct 2008;37(7):365-74.
160. Nackaerts O, Maes F, Yan H, Couto Souza P, Pauwels R, Jacobs R. Analysis of intensity variability in multislice and cone beam computed tomography. *Clin Oral Implants Res*. août 2011;22(8):873-9.
161. Katsumata A, Hirukawa A, Okumura S, Naitoh M, Fujishita M, Arijji E, et al. Relationship between density variability and imaging volume size in cone-beam

- computerized tomographic scanning of the maxillofacial region: an in vitro study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* mars 2009;107(3):420-5.
162. Altunbas C, Lai C-J, Zhong Y, Shaw CC. Reduction of ring artifacts in CBCT: detection and correction of pixel gain variations in flat panel detectors. *Med Phys.* sept 2014;41(9):91913.
163. c1.jpg (Image JPEG, 796 × 302 pixels) [Internet]. [cité 23 août 2016]. Disponible sur: <http://urofrance.org/fileadmin/documents/data/PU/2004/PU-2004-00140719/Images/c1.jpg>
164. Vertébroplastie-Indications [Internet]. [cité 23 août 2016]. Disponible sur: <http://www.vertebroplastie.tidam.fr/indications.htm>
165. Pre-requis et objectifs [Internet]. [cité 23 août 2016]. Disponible sur: <http://campus.cerimes.fr/rhumatologie/enseignement/rhumato4/site/html/>
166. Paatero YV. Pantomography of spherical layers. *Acta Radiol.* sept 1957;48(3):181-7.

Index des illustrations

Index des illustrations

Illustration 1: Composition d'un tissu osseux d'après Mark (13).....	20
Illustration 2: Les cellules du tissu osseux (d'après Mark).....	22
Illustration 3: Les différentes étapes du remodelage osseux (d'après Mark (13)).....	24
Illustration 4: Exemple de perte osseuse avec à gauche un os trabéculaire normal et à droite un os trabéculaire ostéoporotique avec un amincissement de l'épaisseur des travées représentées par les flèches (163).....	25
Illustration 5: Aspect peigné des vertèbres (164).....	27
Illustration 6: Evolution de la densité minérale osseuse (DMO) chez l'homme et la femme au cours de la vie en fonction de l'âge d'après le COFER (165).....	31
Illustration 7: Schématisation de l'orthopantomographie d'après PAATERO (1957) (166).....	41
Illustration 8: Classification de Klemetti (d'après SHINTAKU).....	43
Illustration 9: Radiographie panoramique montrant l'aspect de la corticale mandibulaire en arrière du foramen mentonnier d'après SHINTAKU.....	43
Illustration 10: Radiographie panoramique montrant un corps mandibulaire normal (C1) d'après KLEMETTI.....	43
Illustration 11: Panoramique présentant un corps mandibulaire légèrement érodée (C2) d'après KLEMETTI.....	44
Illustration 12: Panoramique présentant un corps mandibulaire fortement érodée (C3) d'après KLEMETTI.....	44
Illustration 13: Panoramique montrant la mesure de l'indice mentonnier (a) d'après LEDGERTON.....	45
Illustration 14: Mesure de l'indice antégoniaque (C) d'après DEVLIN & HORNER.....	45
Illustration 15: Mesure de l'indice gonjaque (e) d'après DEVLIN & HORNER.....	46
Illustration 16: Calcul de l'indice panoramique mandibulaire d'après BENSON. (a): Epaisseur mandibulaire, (b) :Distance entre le bord inférieur du corps mandibulaire et le milieu du foramen mentonnier.....	46
Illustration 17: Calcul de la profondeur antégoniaque.....	47
Illustration 18: Panoramique montrant la mesure du ratio M/M (VLASIADIS), (A) : Hauteur totale du corps mandibulaire, (B): Distance entre le bord inférieur du corps mandibulaire et le milieu du foramen mentonnier.....	47
Illustration 19: Panoramique montrant la mesure de l'angle gonjaque, de l'angle antégoniaque, AI = indice antégoniaque, MI = indice mentonnier, d'après DEVLIN.....	48
Illustration 20: Panoramique montrant les trois régions d'intérêts pour le calcul du PI d'après TOSONI. (A) Région d'intérêt (ROI) d'angle : carré en avant de l'angle mandibulaire, délimité par la partie supérieure de la corticale du corps mandibulaire et par le bord antérieur du ramus mandibulaire ; (B) ROI du corps mandibulaire : rectangle de forme irrégulière délimité par le bord inférieur du corps mandibulaire, le point le plus déclive de la concavité antégoniaque, la partie distale du foramen mentonnier et l'apex des dents ; (C) ROI canine / prémolaire : carré défini 2 mm en avant du foramen mentonnier et à 2 mm au dessus de la partie supérieure de la corticale du corps mandibulaire.....	49
Illustration 21: Image de la loupe utilisée pour la mise au point des mesure (BENSON).....	49
Illustration 22: Diagramme schématisant l'algorithme de mesure de la corticale mandibulaire (ARIFIN, 2006) (84).....	50
Illustration 23: Images de référence présentant les différentes trabéculations : (A) Trabéculations dense, (B) trabéculations intermédiaires, (C) trabéculations clairsemées d'après LINDH (128).....	68

Illustration 24: Schématisation de l'emplacement de la mesure de l'épaisseur alvéolaire interdentaire d'après JONASSON.....	69
Illustration 25: Image tomodensitométrique montrant la mesure des paramètres « S », « I » et « W » d'après KWANG-JOON KOH.....	79
Illustration 26: Image tomodensitométrique montrant la forme de la corticale mandibulaire selon le type 1 (A), le type 2 (B) et le type 3 (C) d'après KWANG-JOON KOH.....	80

Index des tableaux

Index des tableaux

Tableau 1: Évaluation de la sensibilité et de la spécificité des différents marqueurs osseux de l'ostéoporose.....	29
Tableau 2: Synthèse des études animales sur la relation entre DMO systémique et DMO mandibulaire (DMO = Densité Minérale Osseuse ; QCT = Tomodensitométrie quantitative ; DXA = Absorptiométrie biptonique à rayons X).....	37
Tableau 3: Synthèse des études humaines sur la relation entre DMO systémique et DMO mandibulaire (NP* = non précisé ; DMO = Densité Minérale Osseuse ; QCT = Tomodensitométrie quantitative ; DXA = Absorptiométrie biptonique à rayons X ; DPA = Absorptiométrie biptonique).....	38
Tableau 4: Synthèse des études cliniques sur l'influence des marqueurs osseux sur les indices radiomorphométriques (NP* = non précisé ; PICP : carboxy-terminal propeptide of type I collagen), ICTP : type I collagen carboxy-terminal telopeptide, NTX : télopeptides N-ter du collagène de type I, et ALP : phosphase alcaline ; MI = indice mentonnier ; MCI : Indice cortical mandibulaire).....	51
Tableau 5: Synthèse des études cliniques sur la relation entre l'indice cortical mandibulaire (MCI) et la densité minérale osseuse (DMO) évaluée par absorptiométrie biptonique à rayon X.....	53
Tableau 6: Synthèse des études cliniques chez l'homme sur la relation entre l'indice mentonnier (MI ou MCW) et la densité minérale osseuse (DMO) mesurée par absorptiométrie biptonique à rayon X.....	54
Tableau 7: Synthèse des études cliniques chez l'Homme sur la relation entre le l'indice goniale (AI) et de l'indice goniale (GI) avec la densité minérale osseuse (DMO) mesurée par absorptiométrie biptonique à rayon X.....	56
Tableau 8: Synthèse des études cliniques chez l'Homme sur la relation entre l'indice panoramique mandibulaire (PMI) et la densité minérale osseuse (DMO) évaluée par absorptiométrie biptonique à rayon X.....	57
Tableau 9: Synthèse des études cliniques sur la relation entre la profondeur antégoniale, l'angle goniale et l'angle antégoniale avec la densité minérale osseuse (DMO) mesurée par absorptiométrie biptonique à rayon X.....	58
Tableau 10: Synthèse des études cliniques sur la relation entre le « M/M ratio » et la densité minérale osseuse par absorptiométrie biptonique à rayon X.....	59
Tableau 11: Synthèse des études cliniques sur la relation entre l'indice d'intensité de pixel (PI) et la densité minérale osseuse (DMO) mesurée par absorptiométrie biptonique à rayon X.....	59
Tableau 12: Synthèse des études cliniques sur l'influence de l'âge sur les indices radiomorphométriques (NP* = non précisé ; PMI = indice panoramique mandibulaire : MCI = indice cortical mandibulaire : GI = indice goniale : AI = indice antégoniale : MI = indice mentonnier).....	61
Tableau 13: Synthèse des études cliniques sur l'influence du sexe sur les indices radiomorphométriques (PMI = indice panoramique mandibulaire : MCI = indice cortical mandibulaire : GI = indice goniale : AI = indice antégoniale : MI = indice mentonnier).....	62
Tableau 14: Synthèse des études cliniques sur l'influence du sexe sur les indices radiomorphométriques (NP* = non précisé : PMI = indice panoramique mandibulaire : MCI = indice cortical mandibulaire : GI = indice goniale : AI = indice antégoniale : MI = indice mentonnier).....	63

Tableau 15: Synthèse des études cliniques sur la relation entre la structure trabéculaire osseuse par radiographies rétro-alvéolaires et la densité minérale osseuse (DMO) mesurée par absorptiométrie biphotonique à rayon X.....	70
Tableau 16: Synthèse des études cliniques sur la relation entre la masse osseuse alvéolaire mandibulaire (MABM) par analyse photodensitométrique et la densité minérale osseuse (DMO).....	71
Tableau 17: Synthèse des études cliniques sur la relation entre l'intensité de pixel (PI) et la densité minérale osseuse (DMO) par mesure absorptiométrie biphotonique à rayon X (NP* : Non précisé dans l'étude).....	72
Tableau 18: Synthèse des études cliniques sur la relation entre la dimension fractale et les changements de densité minérale osseuse (DMO) mesuré par absorptiométrie biphotonique à rayon X.....	73
Tableau 19: Synthèse des études cliniques sur la relation entre la densité minérale osseuse (DMO) évalué par Cone Beam (CBCT) et la DMO évalué par absorptiométrie biphotonique à rayon X (DXA).....	78
Tableau 20: Synthèse des études cliniques sur la relation entre les indices tomодensitométriques (CTI (S) : Computed Tomography Mandibular Index (Superior) ; CTI (I) : Computed Tomography Mandibular Index (Inferior) ; CTCI : Computed Tomography Cortical Index ; CTMI : Computed Tomography Mental Index) évalués par Cone-Beam (CBCT) et la densité minérale osseuse (DMO) évalué par l'absorptiométrie biphotonique à rayon X (DXA).....	81

Détection précoce de l'ostéoporose à partir des radiographies dentaires /
BEIRNAERT-CHARTREL Gaël.- p. 105 : ill. 26 ; réf. 166.

Domaines : Sciences biologiques ; Pathologie générale ; Radiologie

Mots clés Rameau: Ostéoporose ; Diagnostic ; Radiographie ; Dents ; Tomographie volumétrique à faisceau conique ; Imagerie ; Densitométrie osseuse

Mots clés FMeSH: Diagnostic par imagerie ; Orthopantomogramme ; Radiographie Dentaire ; Cone-Beam ; Absorptiométrie photonique ; Densitométrie ; Ostéoporose ; Tomodensitométrie à faisceau conique

Résumé de la thèse :

L'ostéoporose est une maladie diffuse du squelette, responsable d'une fragilité osseuse, d'une augmentation du risque de fracture, d'une hausse de la mortalité et, à la base par conséquent d'un problème majeur de santé publique. Son diagnostic est souvent tardif et fait le plus souvent à la suite de fractures osseuses.

L'objectif de ce travail est, au travers d'une revue de la littérature, d'évaluer les possibilités de détection précoce de densité minérale osseuse liée à l'ostéoporose., à travers les différentes techniques d'imagerie, prescrites en routine, en chirurgie-dentaire.

Après de brefs rappels sur la physiologie osseuse et l'ostéoporose, les différents indices radiomorphométriques existant au niveau des orthopantomogrammes, des radiographies intra-orales et du Cone-Beam sont décrits. Nous évaluons ensuite les corrélations entre ces indices radiomorphométriques et la densité minérale osseuse évaluée par l'absorptiométrie biphotonique à rayon X, technique de référence dans la détection de l'ostéoporose.

Les perspectives d'avenir d'utilisation des différentes techniques d'imagerie bucco-dentaire et des indices radiomorphométriques semblent séduisantes dans la démarche de dépistage de l'ostéoporose et dans l'amélioration de la prise en charge des patients souffrant à bas bruit de l'ostéoporose.

JURY :

Président : Monsieur le Professeur Guillaume PENEL

Asseseurs : Monsieur le Docteur Laurent NAWROCKI

Madame le Docteur Cécile OLEJNIK

Monsieur le Docteur Xavier COUTEL