



REVUE ICONOGRAPHIQUE / *Ostéoarticulaire*

Les fractures de contrainte

Stress fractures

V. Bousson*, M. Wybier, D. Petrover, C. Parlier, V. Chicheportiche, B. Hamzé, J.-M. Sverzut, E. Daguet, A. Wyler, J. Thabet, P. Bossard, J.-D. Laredo

Service de radiologie ostéoarticulaire, hôpital Lariboisière, 2, rue Ambroise-Paré, 75010 Paris, France

MOTS CLÉS

Fracture de contrainte ;
Ostéoporose ;
Biomécanique ;
Scanner ;
Imagerie par résonance magnétique

KEYWORDS

Stress fracture;
Osteoporosis;
Biomechanics;
CT;
MRI

Résumé En 1892, J. Wolff, chirurgien orthopédiste, expliqua que l'architecture interne et la forme des os reflétaient la direction des contraintes normales qui leur sont appliquées. L'imagerie, à rayons X ou par résonance magnétique (IRM), témoigne de cette faculté d'adaptation de l'os aux contraintes. L'imagerie montre aussi que cette dernière a des limites, l'excès de contrainte pouvant notamment entraîner la survenue d'une fracture.

© 2011 Elsevier Masson SAS et Éditions françaises de radiologie. Tous droits réservés.

Abstract In 1892, J. Wolff, an orthopedic surgeon, stated that the internal architecture and shape of a bone were related to the direction of stresses placed upon it. Conventional radiographs and MRI can demonstrate the adaptability of bones to stresses. Imaging also demonstrates that this adaptability has limitations, and that excessive stress may lead to fracture.

© 2011 Elsevier Masson SAS and Éditions françaises de radiologie. All rights reserved.

La théorie de la trajectoire propose que les travées osseuses soient alignées selon les principales directions de contrainte. Cette théorie a été développée dans les années 1870 par un anatomiste, GH Meyer [1], et un mathématicien, C Culmann [2] et adoptée par W Roux (*the functional adaptation concept*) [3]. Elle fut reprise et développée par le chirurgien orthopédiste J. Wolff en

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : valerie.bousson@lrb.aphp.fr (V. Bousson).

1892 [4], qui conclut que l'architecture interne d'un os et sa forme reflètent la direction des contraintes normales qui lui sont appliquées et que l'os s'adapte en permanence aux variations de ces contraintes [5]. Cette adaptation résulte du fait que le tissu osseux est vivant et qu'il est sensible à la contrainte (intensité, direction, rythme).

L'imagerie permet d'étudier sans aggraver l'os le processus de son adaptation aux contraintes. Les forces qui s'exercent sur le bras dominant d'un joueur de tennis provoquent un épaississement de l'os cortical du radius par rapport au côté opposé. En cas de coxa vara (angle cervicodiaphysaire plus petit que la normale), le cortex de la concavité de l'extrémité proximale du fémur, soumis à des contraintes en compression élevées, est anormalement épais, alors que l'augmentation des forces de tension du côté convexe provoque une « atrophie » corticale. La fracture de contrainte (*stress fracture* des anglophones) est la preuve que la faculté d'adaptation de l'os aux contraintes a des limites. Cependant, le terme de fracture traduit mal la physiopathologie de ce débordement. En effet, surviennent successivement une accélération locale du remodelage osseux, asymptomatique, puis une accumulation de microfractures et enfin une fracture proprement dite, plus ou moins étendue. L'incidence de ces fractures est liée à la pratique sportive et au degré de vieillissement de la population.

Considérations biomécaniques

Fractures de fatigue – fractures par insuffisance osseuse

Les fractures de contrainte constituent le point final d'un spectre de réponses de l'os à son environnement mécanique, spectre qui s'étend du simple remodelage jusqu'à la fracture [6,7]. En fonction de l'intensité des contraintes qui ont occasionné la fracture et des compétences mécaniques de l'os, on distingue deux types de fracture : les fractures de fatigue et les fractures par insuffisance [6,7].

Fractures de fatigue

Une fracture de fatigue est la conséquence de l'application de contraintes anormales sur un os dont la résistance élastique est normale (Fig. 1–9). Il s'agit d'une lésion de surmenage. C'est l'application répétée de cette contrainte qui sera responsable de la fracture. L'os est un matériau solide et sa réponse à l'application d'une force est semblable à celle d'autres matériaux ; elle obéit à la loi de Wolff. L'application d'une force engendre une déformation de l'os. Jusqu'à un certain point, la déformation est dite élastique : lorsque la contrainte s'arrête, l'os peut reprendre sa forme initiale. Mais au-delà d'une certaine limite (limite d'élasticité), une contrainte plus forte cause une déformation plastique avec une modification permanente de la forme de l'os due à des microfractures au sein de l'os. Si la contrainte s'intensifie, le nombre et la longueur des microfractures augmentent ; les microfractures confluent jusqu'à donner une fracture plus ou moins complète : les dommages ont dépassé les capacités d'adaptation de l'os. La fracture de fatigue est une maladie locale de l'os consécutive à un surmenage, avec une phase initiale de modification

du remodelage osseux, avec résorption ostéoclastique qui affaiblit temporairement l'os.

Les fractures de fatigue affectent en priorité les os porteurs. Elles résultent d'activités variées, le siège de la fracture étant caractéristique d'une activité donnée [6,7], par exemple la base du deuxième ou du troisième métatarsien chez une danseuse de ballet [8]. Les fractures de fatigue touchent principalement le cortex, et notamment le cortex de la diaphyse des os longs, comme la diaphyse tibiale chez les coureurs de longue distance. D'autres sites classiques sont la diaphyse du fémur ou de la fibula et les diaphyses métatarsiennes (« fracture de marche ») (Fig. 1 et 2).

Fractures par insuffisance osseuse

Une fracture par insuffisance osseuse se produit lorsque les forces ont une intensité normale mais qu'elles s'appliquent à un os dont la compétence mécanique est diminuée (insuffisante) (Fig. 10–21). Les contraintes responsables de la fracture par insuffisance osseuse sont celles de la vie quotidienne. Les fractures par insuffisance osseuse sont associées à l'ostéoporose post-ménopausique, à la polyarthrite rhumatoïde, à la corticothérapie au long cours. Dans l'ostéoporose de type I, la carence œstrogénique post-ménopausique entraîne une perte rapide d'os trabéculaire, l'os cortical étant relativement épargné [9]. Les travées deviennent fines, se perforent, sont déconnectées les unes des autres. Le tissu osseux se maintient dans les régions critiques (sujettes aux contraintes les plus élevées) mais l'équilibre est précaire. Cela explique que l'os trabéculaire soit le siège principal des fractures de contrainte.

Les localisations habituelles sont les os supportant le poids du corps, les vertèbres, le sacrum (Fig. 10), le col du fémur (Fig. 13), les métaphyses tibiales proximale et distale (Fig. 19 et 20), le calcaneus. Les fractures par insuffisance osseuse sont en règle générale des fractures en compression.

En pratique

La distinction entre fracture de fatigue et fracture par insuffisance osseuse n'est pas aussi tranchée (Fig. 22–26). Dans les fractures de fatigue, un facteur de fragilité osseuse est souvent présent. La carence œstrogénique de jeunes femmes avec troubles menstruels ou aménorrhée a été documentée dans plusieurs études [10,11]. Les fractures sous-chondrales de la tête fémorale, rapportées chez de jeunes adultes après exercices militaires intensifs, l'ont été aussi en l'absence d'exercices intensifs [12] avec mise en évidence dans la zone de fracture de travées osseuses anormalement fines, déconnectées, peu nombreuses, traduisant une ostéopénie [12]. Les fractures sous-chondrales de la tête fémorale ont été décrites à la fois chez des femmes âgées ostéoporotiques (fracture par insuffisance) et chez des sujets jeunes (fracture de fatigue) [12]. À l'inverse, une note de fatigue est souvent observée dans les fractures par insuffisance, par exemple une longue promenade avant le début des douleurs.

Fractures par distraction/Fractures par compression

On peut aussi distinguer les fractures de contrainte en fonction de la direction des contraintes à l'origine de la fracture.



Figure 1. Fracture de fatigue de la diaphyse du deuxième métatarsien gauche. a : radiographie du pied gauche de face montrant un épaissement de la corticale médiale ; b : échographie, image longitudinale ; c : échographie, image transversale. La patiente avait été initialement adressée en échographie pour des douleurs de l'avant-pied. L'échographie montre la réaction périostée et un hématome à la surface du périoste ; d : fracture de fatigue de la diaphyse du deuxième métatarsien chez une autre patiente avec ici un cal à peine visible.

Ainsi, il existe des fractures par distraction et des fractures par compression. Les fractures par distraction surviennent le plus souvent sur les corticales convexes, comme la corticale antérieure du tibia (Fig. 9) ou la corticale supérieure du col fémoral. Quant aux fractures par compression, elles se produisent essentiellement dans la corticale postérieure du tibia, l'os spongieux du col fémoral (Fig. 10), les métaphyses tibiales (Fig. 19 et 20). Comparées aux fractures par compression, les fractures par distraction sont davantage sujettes au déplacement car les forces de tension agissent pour séparer les fragments. Le pronostic des fractures par distraction est donc moins bon et dépend du délai diagnostique.

Rôle des muscles

Les muscles jouent un rôle essentiel dans les fractures de contrainte, surtout dans les fractures de fatigue [7,13]. Les forces les plus importantes qui s'appliquent sur l'os résultent de la contraction des muscles, plutôt que de la gravité, et les os s'adaptent à la force des muscles [14]. L'augmentation de l'activité musculaire chez les sportifs occasionnels ou professionnels augmente à la fois la force musculaire et la force des os. L'adéquation est cependant imparfaite : les muscles s'adaptent plus vite et dans des proportions plus grandes que l'os, la conséquence étant un risque accru de fracture. Ce

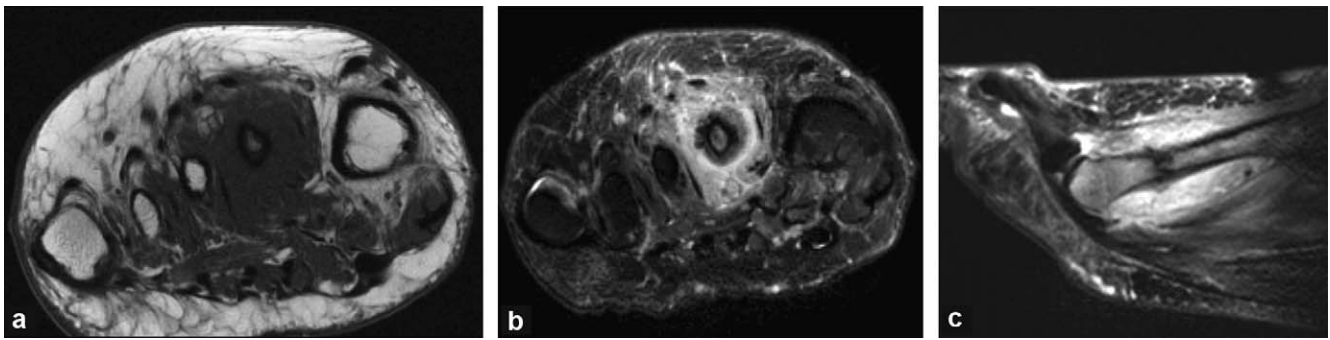


Figure 2. Fracture de fatigue complète de la diaphyse du deuxième métatarsien. a : IRM, image coronale T1 ; b : IRM, image coronale en densité de protons avec saturation du signal de la graisse ; c : image sagittale en densité de protons avec saturation du signal de la graisse. Les images montrent un œdème de la médullaire osseuse et des tissus mous. L'œdème est circonférentiel. La ligne en hyposignal correspond à la fracture complète de la diaphyse métatarsienne.

retard de l'adéquation osseuse sur le gain musculaire se révèle dans des circonstances telles que le changement de chaussures ou du terrain de course, circonstances connues pour favoriser la survenue d'une fracture de fatigue.

Cette théorie de l'unité os-muscle permet d'expliquer la survenue de fracture sur les os non porteurs (Fig. 27).

Aspects cliniques

Diagnostic clinique

La principale manifestation clinique est la douleur, qui est aggravée par l'activité et réduite par le repos. L'intensité des douleurs est variable, souvent modérée au début. Une fracture de contrainte peut être peu

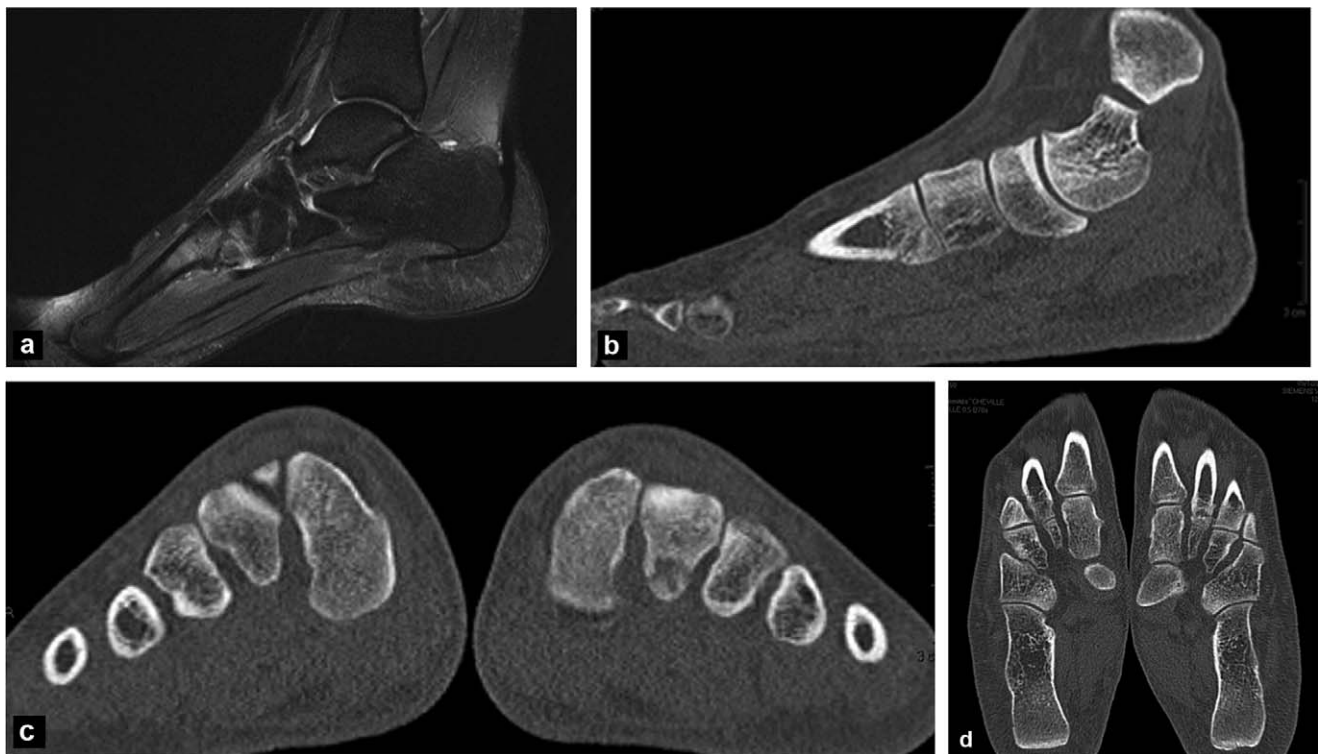


Figure 3. Fracture de fatigue de la base du deuxième métatarsien (trabéculaire) chez une femme de 28 ans. a : IRM, image sagittale en densité de protons avec saturation du signal de la graisse ; b : scanner, image sagittale en fenêtre osseuse ; c : scanner, image coronale en fenêtre osseuse ; d : scanner, image axiale en fenêtre osseuse. Les images montrent une solution de continuité au sein de l'os trabéculaire de la base du deuxième métatarsien gauche avec résorption des berges du foyer de fracture. L'IRM montre l'œdème osseux, le trait de fracture n'est pas facile à individualiser.



Figure 4. Fracture de fatigue de la tête du deuxième métatarsien chez une infirmière. a : radiographie de face ; b : IRM, image axiale T1 ; c : IRM, image axiale en densité de protons avec saturation du signal de la graisse. En radiographie, il y a un méplat de la tête du deuxième métatarsien. Les images IRM montrent une fracture sous-chondrale de l'épiphyse et un œdème osseux.

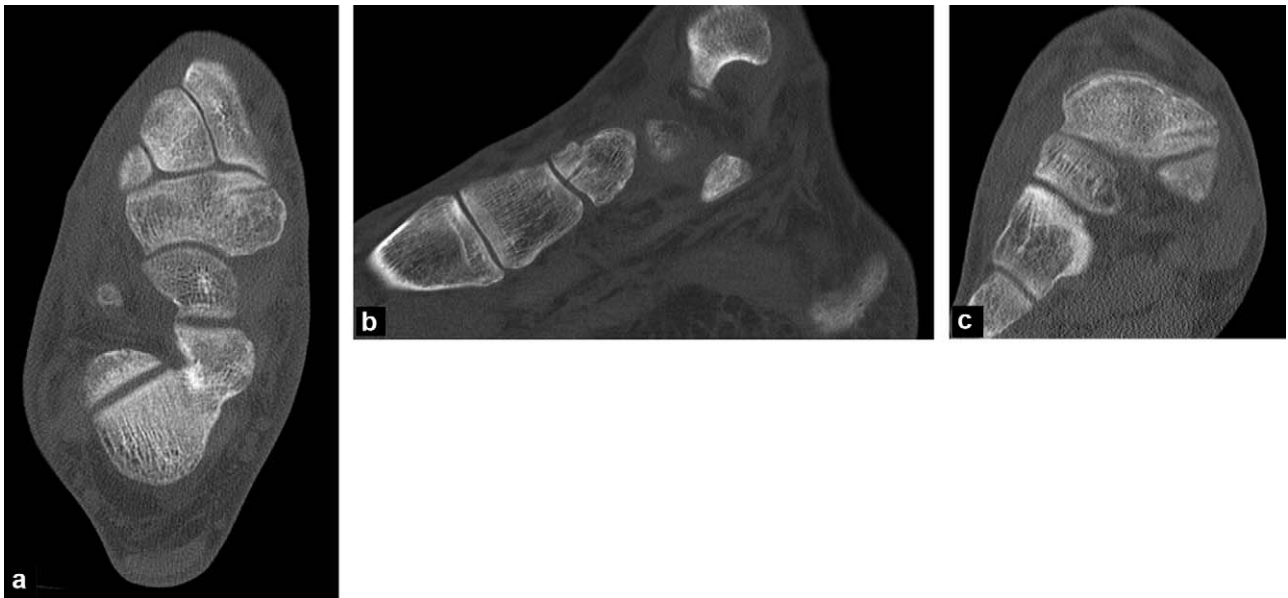


Figure 5. Fracture de fatigue de l'os naviculaire chez un danseur de 37 ans. a : scanner, image axiale en fenêtre osseuse ; b : scanner, image sagittale en fenêtre osseuse ; c : scanner, image coronale en fenêtre osseuse. Image claire linéaire au sein d'une zone de condensation.

symptomatique avant que l'os ne soit séparé en deux fragments.

Les fractures de contrainte surviennent en des sites prévisibles, ce qui est un puissant élément d'orientation diagnostique. Les fractures de fatigue surviennent dans des régions soumises à de fortes contraintes liées à une activité spécifique, les fractures par insuffisance en des sites supportant le poids du corps et affectés par la perte osseuse trabéculaire (rachis thoracolumbaire, sacrum, métaphyse des os des membres inférieurs).

Dans les fractures de fatigue, l'interrogatoire met en évidence une activité intense et répétée, inhabituelle, un changement du terrain de course, des chaussures, du rythme ou de l'intensité de l'activité.

Dans les fractures par insuffisance, la fragilité osseuse est la conséquence d'une ostéoporose, d'un traitement par corticothérapie, d'une polyarthrite rhumatoïde (fragilité d'origine plurifactorielle), d'une irradiation (Fig. 15). L'interrogatoire retrouve fréquemment une marche prolongée ou une chute peu traumatisante dans les jours précédant la fracture.

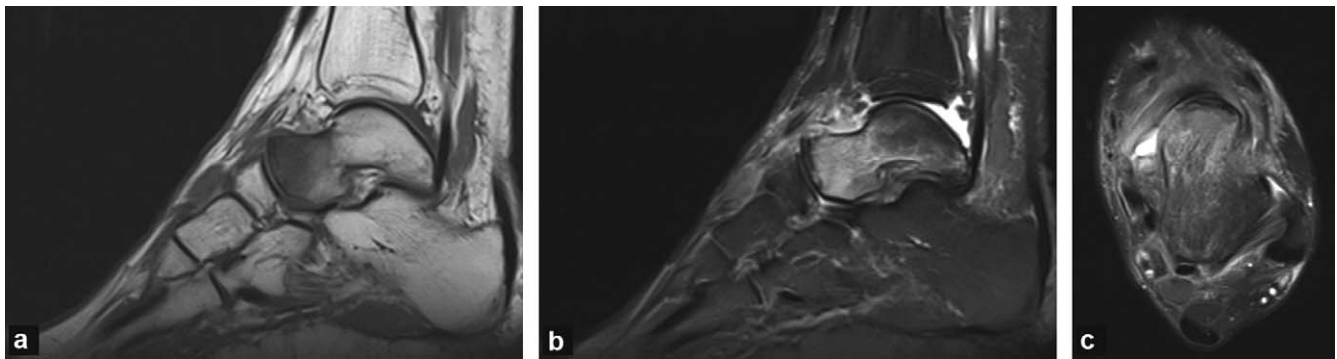


Figure 6. Fracture de fatigue de la tête du talus. a : IRM, image sagittale T1 ; b : IRM, image sagittale en densité de protons avec saturation du signal de la graisse ; c : IRM, image axiale en densité de protons avec saturation du signal de la graisse. La fracture est visible sous forme d'une image linéaire en hyposignal T1 sous-chondrale parallèle à la surface articulaire talo-naviculaire. Œdème périlésionnel osseux et des tissus mous.

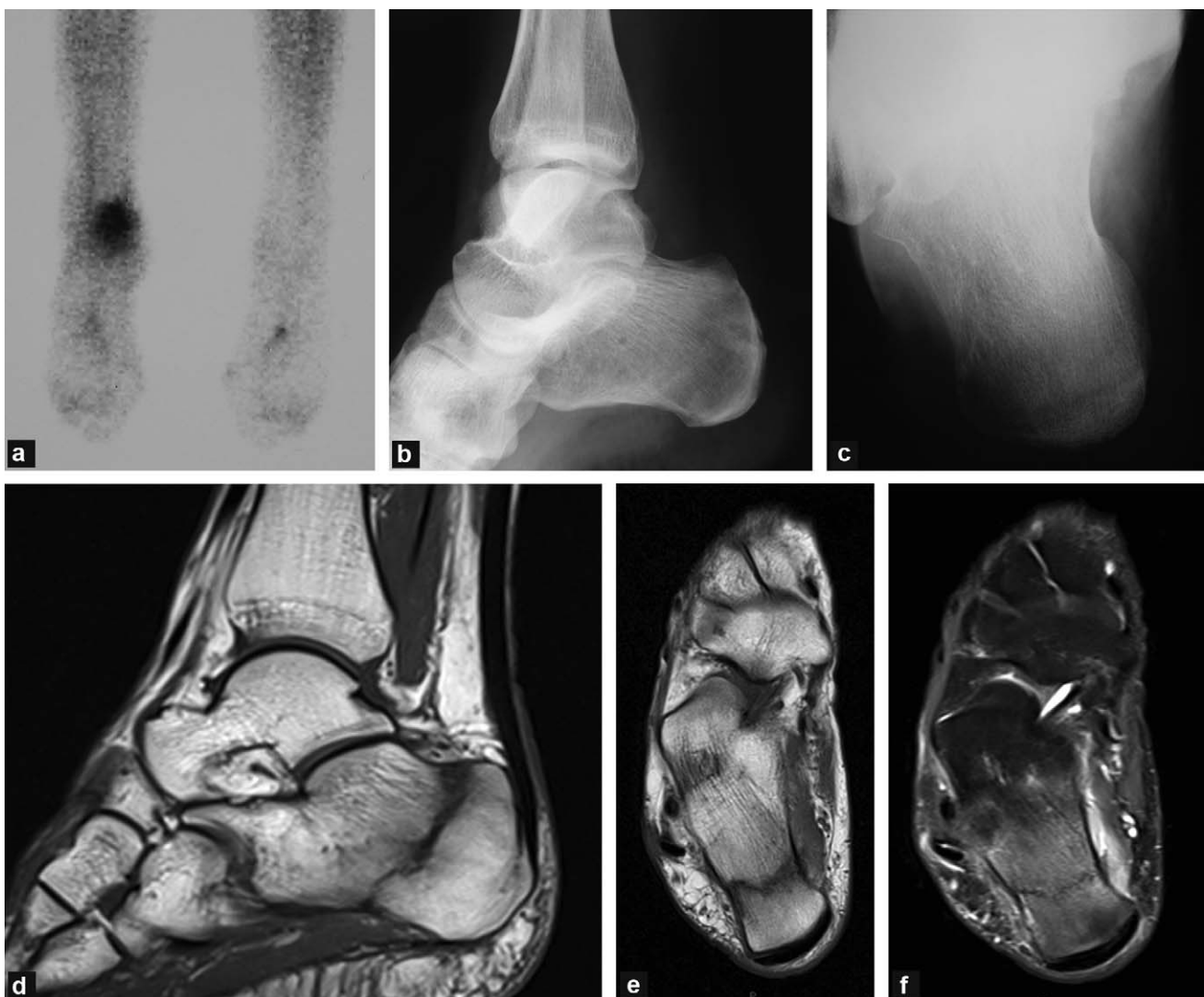


Figure 7. Fracture de fatigue du calcaneus chez une femme de 40 ans, vendeuse, durant la période des soldes. a : scintigraphie au ^{99m}Tc . Il existe une hyperfixation intense du calcaneus ; b : radiographie de profil réalisée dix jours avant la scintigraphie. La tubérosité calcanéenne est de densité hétérogène sans fracture évidente ; c : radiographie, incidence rétrotibiale réalisée dix jours avant la scintigraphie. Solution de continuité complète du calcaneus ; d : IRM, image sagittale T1 ; e : IRM, séquence axiale T1 ; f : IRM, image sagittale en densité de protons avec saturation du signal de la graisse. Fracture complète du calcaneus avec une ligne perpendiculaire à l'axe des travées principales. Œdème de l'os et des tissus mous.



Figure 8. Fracture de fatigue complète du tibia chez un jeune patient de 16 ans. La radiographie montre une ligne dense de la métaphyse tibiale proximale, à point de départ cortical et étendue à l'os trabéculaire.

À l'examen clinique des fractures de fatigue sur os périphérique, un œdème, une douleur exquise à la palpation, une tuméfaction dure peuvent être mis en évidence selon le stade évolutif.

Imagerie des fractures de contrainte

Caractéristiques communes

Radiographies

Les radiographies ont une sensibilité limitée pour les fractures de contrainte (Fig. 1, 4, 7, 8, 11, 13, 18, 19, 21–24, 27, 28). Elles sont souvent normales au début et positives moins d'une fois sur deux à une phase plus tardive [6,7] (Fig. 1, 4, 7–9, 11, 13, 18, 19, 22).

Lorsque la fracture siège en os cortical, les modifications initiales sont une discrète diminution de densité et un aspect un peu flou du cortex. Ensuite, l'apposition fusiforme d'une lamelle épaisse d'os nouvellement formé par le périoste et la réaction endostée conduisent à la condensation et à l'épaississement du cortex. Une ligne claire correspondant à la fracture est parfois visible au sein de la densification réactionnelle (« cheveu sur de la porcelaine »).

Dans l'os spongieux, les fractures de contrainte sont également difficiles à diagnostiquer. La fracture est visible assez tardivement comme une bande dense qui devient plus nette avec le temps (Fig. 13 et 19). Cet aspect est dû à l'impaction des travées (fractures en compression) et au cal de réparation.

Comme les radiographies sont le plus souvent normales, les patients symptomatiques sont explorés avec des

méthodes plus sensibles comme la scintigraphie osseuse ou l'imagerie par résonance magnétique (IRM).

Scintigraphie au ^{99m}Tc

L'hyperfixation scintigraphique est précoce, prolongée et intense (Fig. 7 et 9). Elle est évocatrice par sa forme (par exemple hyperfixation allongée de la corticale diaphysaire d'un os long), par la multiplicité (plusieurs os du membre inférieur) ou par le caractère bilatéral et symétrique des foyers d'hyperfixation (atteinte bilatérale de la métaphyse proximale du tibia, atteinte des deux calcaneus).

Imagerie par résonance magnétique

L'IRM est très sensible à l'œdème ou à l'hémorragie de la moelle osseuse lors d'une fracture ainsi qu'à l'accumulation de liquide au contact du périoste, surtout en pondération T2 avec saturation du signal de la graisse (Fig. 2–4, 6, 7, 9, 14, 15, 17, 20, 23–26). Cela s'est notamment vérifié au tibia chez les coureurs symptomatiques [15]. Fredericson et al. ont décrit les cinq aspects IRM suivants de réaction du tibia aux contraintes : stade 0 : normal ; stade 1 : œdème périosté sans anomalie du signal de la médullaire osseuse ; stade 2 : œdème du périoste et de la médullaire osseuse visible seulement sur les séquences T2 ; stade 3 : œdème du périoste et de la médullaire osseuse visible sur les séquences T2 et sur les séquences T1 ; stade 4 : outre les anomalies de signal périostées et médullaires en T2 et en T1, une ligne de fracture est visible [15]. Cette graduation de la gravité peut être utilisée aussi pour d'autres régions anatomiques. Elle peut être utile en clinique pour établir la durée du repos nécessaire avant le retour aux activités sportives [15]. Les coureurs de haut niveau qui ne veulent ou ne peuvent pas s'arrêter se laissent plus facilement convaincre de la nécessité du repos devant les images d'IRM. Cependant, les images de réactions osseuses à la contrainte se voient également chez des coureurs de longue distance non symptomatiques. L'examen clinique est donc nécessaire à l'interprétation des images [16].

Scanner

Le rôle du scanner dans l'évaluation des lésions de contrainte est limité aux cas difficiles à prouver par radiographies et IRM (Fig. 3, 5, 9, 10, 12, 15–17, 21, 26, 27). Pour le cortex, le scanner montre des images évidentes de fracture transverse ou longitudinale difficiles mettre en évidence en IRM (Fig. 21) [17]. Il a d'ailleurs été montré que le scanner était plus sensible que l'IRM pour le diagnostic des fractures corticales longitudinales [18]. La qualité des images scanographiques actuelles a contribué à faire comprendre la physiopathologie des fractures de contrainte, notamment dans le syndrome de contrainte tibiale médiale (*medial tibial stress syndrome* ou *shin splints*) [19]. Ce syndrome, défini par une douleur persistante de la face médiale du tibia distal, a été attribué pendant de nombreuses années à une inflammation du périoste. Il est actuellement considéré comme une réaction douloureuse de l'os à un excès de contraintes. Dans ce syndrome, les biopsies de corticale tibiale ont révélé une augmentation de la porosité [20], tandis qu'une étude densitométrique (absorptiométrie biphotonique) a montré une diminution

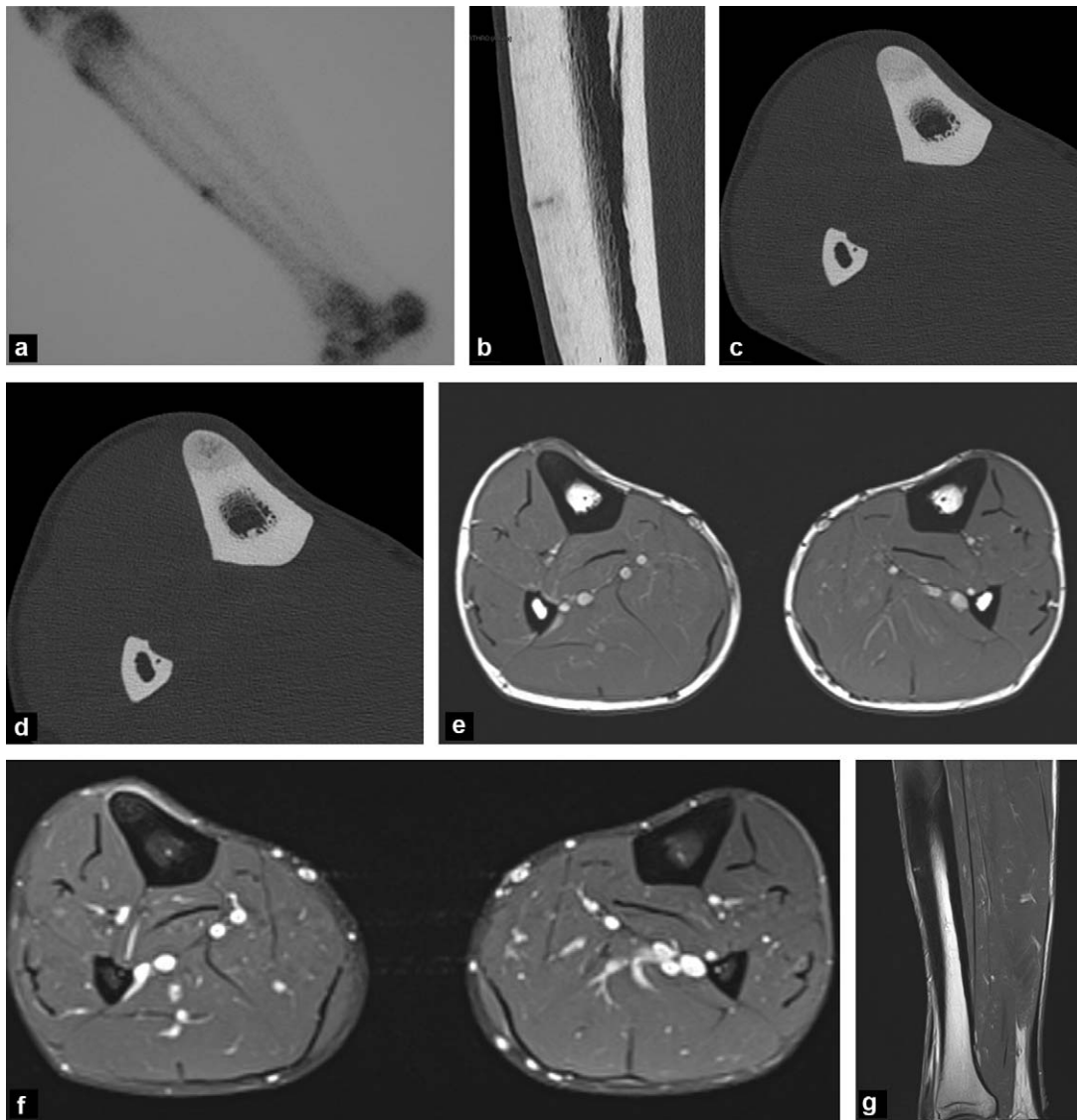


Figure 9. Fracture de fatigue de la face antérieure du tibia chez un homme de 29 ans adressé pour photocoagulation au laser d'un ostéome ostéoïde. a : scintigraphie au ^{99m}Tc . Hyperfixation corticale antérieure de la diaphyse tibiale ; b : scanner, image sagittale en fenêtre osseuse. Fracture transversale de quelques millimètres de longueur de la corticale tibiale antérieure, avec réaction périostée localisée ; c : scanner, image axiale juste au-dessus de la fracture, montrant une ostéopénie corticale antérieure localisée ; d : scanner, image axiale passant par la fracture. L'aspect réalisé avait initialement fait évoquer le diagnostic d'ostéome ostéoïde ; e : IRM, image axiale T1 ; f : IRM, image axiale T1 après injection de gadolinium et saturation du signal de la graisse ; g : IRM, image sagittale T1 après injection de gadolinium. Le diagnostic de fracture transversale est aisé sur les images sagittales.

régionale de la densité minérale osseuse [21]. Les images scanographiques de haute résolution obtenues à la phase précoce du syndrome montrent trois types d'anomalies corticales : ostéopénie, résorption, striation [19]. Sur 82 tibias de 41 sujets, les 14 tibias douloureux (100%) sont le siège des anomalies sus-citées (ostéopénie, résorption, striation), alors que seule une ostéopénie corticale a été observée dans 17% des tibias asymptomatiques (8/48). L'ostéopénie est la conséquence d'un déficit de formation ostéoblastique par rapport à la résorption ostéoclastique avec le développement de cavités de résorption, dont la coalescence aboutit à former une cavité plus grande qui fragilise davantage l'os (Fig. 9). Ces changements se produisent tôt dans l'évolution du syndrome et peuvent précéder les douleurs [19].

Échographie

Il s'agit d'un examen très précieux pour le diagnostic de fracture d'un os périphérique à la phase précoce lorsque les radiographies sont normales (Fig. 1). Les signes directs sont la mise en évidence d'une solution de continuité ou plutôt d'une irrégularité de la corticale sous forme d'une petite saillie. Le signe indirect le plus performant est la mise en évidence d'un hématome à la surface du périoste.

Imagerie des fractures de contrainte en fonction de l'architecture osseuse et du site osseux

D'après les considérations mécaniques, les manifestations radiologiques des fractures de contrainte dépendent du type

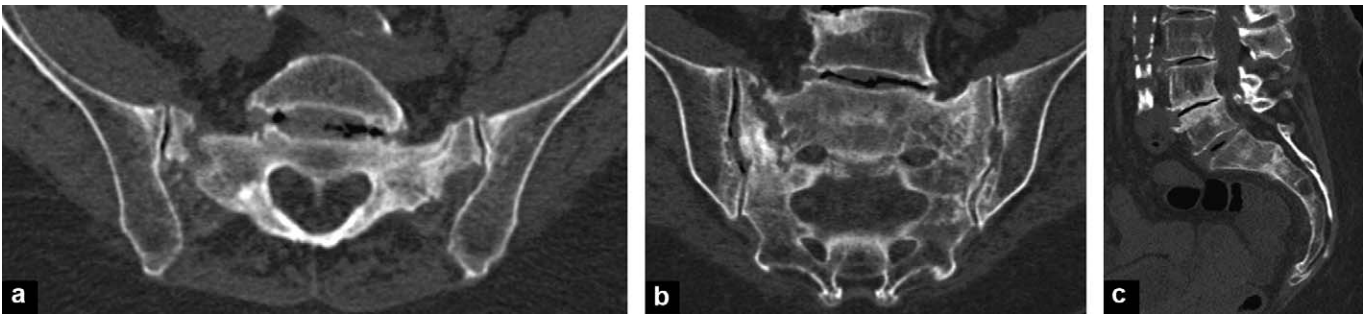


Figure 10. Fracture en H du sacrum chez une femme de 82 ans. a : scanner, image axiale ; b : scanner, image coronale. Ces deux figures montrent la fracture sacrée droite pseudarthrosée. Le trait de fracture sacré gauche apparaît sous forme d'une ligne dense. Le décroché de la corticale est à rechercher avec attention ; c : scanner, image sagittale montrant le recul du mur postérieur de la partie distale du corps de la première pièce sacrée, proche de l'articulation S1–S2, conséquence de la fracture horizontale (barre horizontale du H).



Figure 11. Fracture par insuffisance osseuse du toit du cotyle gauche. La radiographie montre une ligne claire sous-chondrale, parallèle à l'interligne articulaire, cernée d'ostéocondensation.

d'architecture osseuse (os cortical ou trabéculaire), du segment osseux intéressé (diaphyse, métaphyse, épiphyse) et de la localisation de l'os dans le corps.

Os longs porteurs

La diaphyse des fémurs et des tibias peut être assimilée à une colonne creuse dont les deux extrémités sont élargies pour plus de stabilité et les murs épaissis à mi-longueur pour plus de résistance à la torsion [22]. La corticale est donc épaisse au milieu de la diaphyse. Les métaphyses sont des expansions constituées d'os trabéculaire cerné d'une corti-

cale plus fine que dans la diaphyse [22]. Les épiphyses sont composées presque exclusivement d'os trabéculaire et sont recouvertes de cartilage.

Os cortical des diaphyses fémorale et tibiale

L'os cortical des diaphyses fémorale et tibiale est un site habituel de fractures de contrainte, en règle générale de fatigue.

Le siège et l'orientation des lignes de fracture dépendent des caractéristiques des contraintes qui sont appliquées sur l'os :

- les forces appliquées le long des surfaces convexes (forces de tension), comme la diaphyse tibiale antérieure (Fig. 9), la corticale latérale de la diaphyse fémorale, la convexité des os déformés par la maladie de Paget (Fig. 28) ou la corticale supérieure du col fémoral donnent des fractures en distraction. Le trait de fracture est habituellement perpendiculaire au cortex et au grand axe de l'os ;
- les forces appliquées le long des surfaces concaves (forces de compression) comme la diaphyse postérieure du tibia et le cortex fémoral médial (Fig. 13), donnent des fractures en compression. Le trait de fracture est typiquement dirigé le long du grand axe de l'os.

Les fractures transverses ont tendance à s'agrandir et à se déplacer, les forces de tension agissant pour écarter les deux fragments osseux.

Les fractures de contrainte longitudinales (Fig. 21), décrites initialement par Devas [23], sont plus rares que les fractures transversales. Elles intéressent le tibia plutôt que le fémur [17,24]. Si la ligne de fracture n'est pas recon-

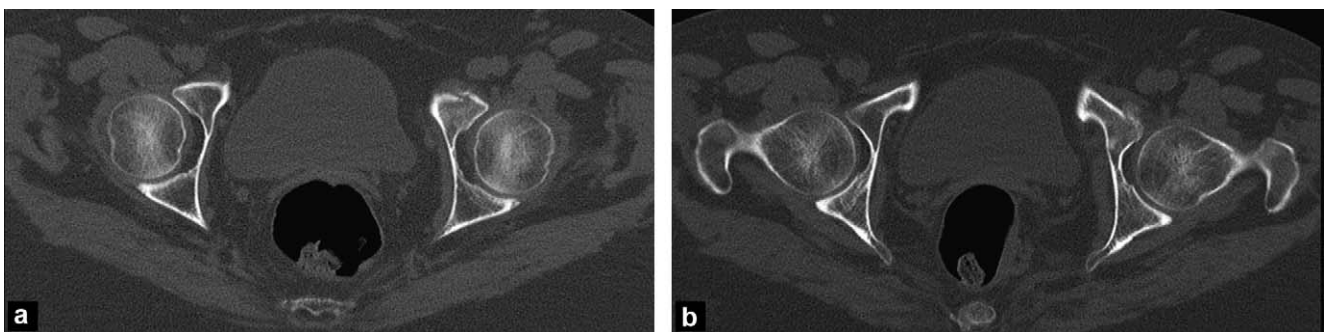


Figure 12. Fracture par insuffisance osseuse de la colonne antérieure du cotyle chez une femme de 55 ans. a et b : scanner, images axiales en fenêtre osseuse. La solution de continuité corticale est bien visible, de même que l'hématome antérieur.

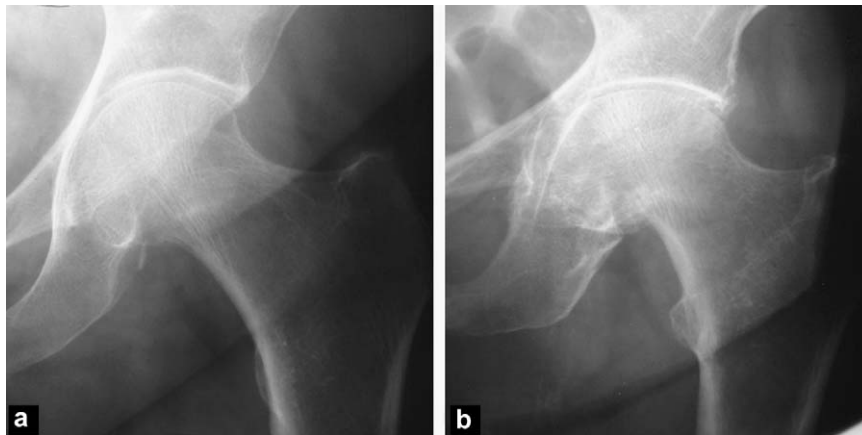


Figure 13. Fracture par insuffisance osseuse du col fémoral gauche chez deux femmes ostéoporotiques. Aspect et siège typiques des fractures par insuffisance osseuse du col fémoral : ligne dense perpendiculaire au faisceau principal de travées osseuses.

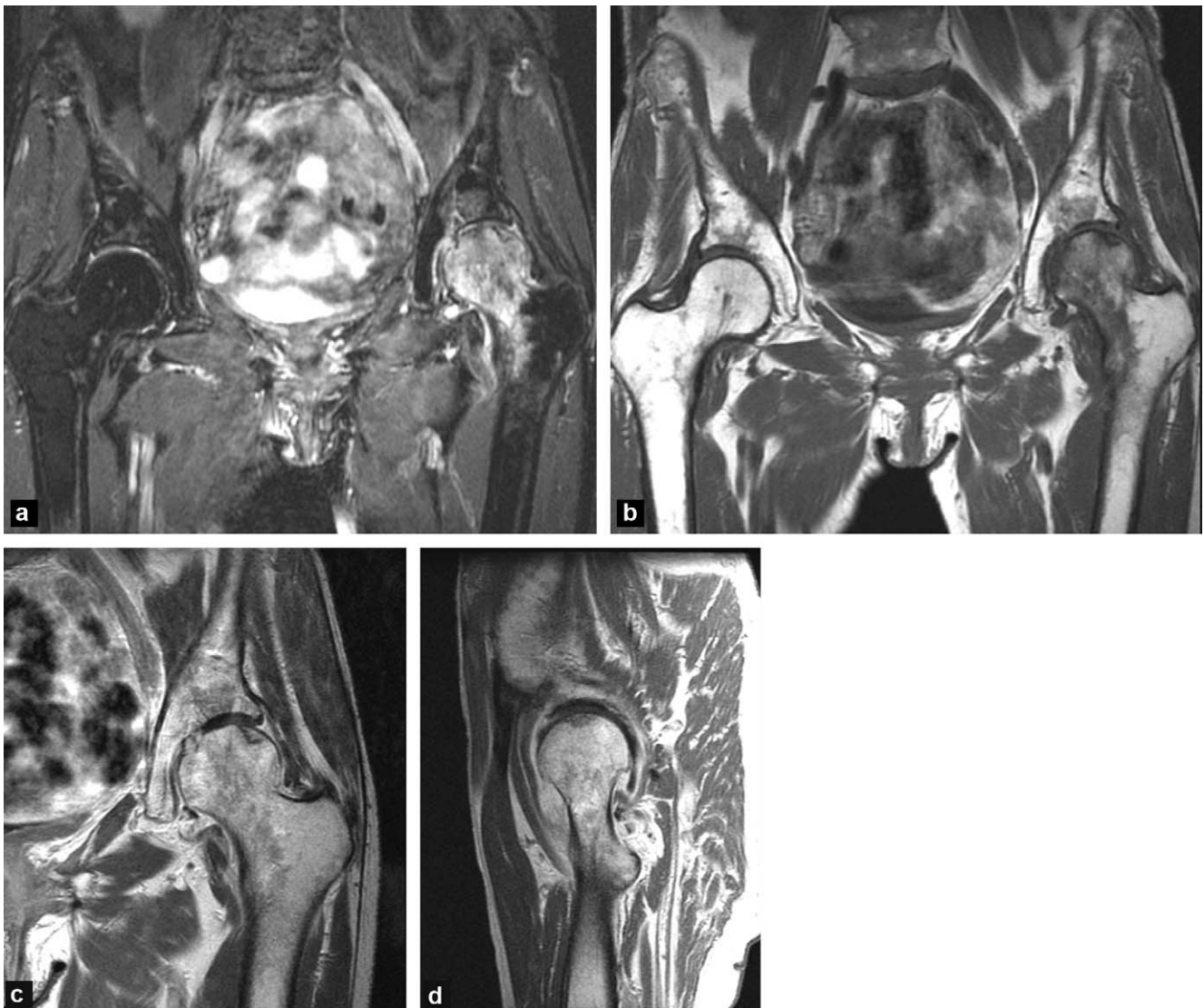


Figure 14. Fracture sous-chondrale de la tête fémorale chez une femme âgée. a : IRM, image coronale STIR ; b : IRM, image coronale T1 ; c : IRM, image coronale centrée sur la hanche gauche en T1 après injection de gadolinium ; d : IRM, image sagittale centrée sur la hanche gauche en T1 après injection de gadolinium. La fracture est visible sous forme d'une ligne en hyposignal. Il existe des anomalies de signal de type œdème de la tête et du col fémoral : plage d'hyposignal T1, hypersignal T2, mal limitée, avec homogénéisation du signal après injection de gadolinium.

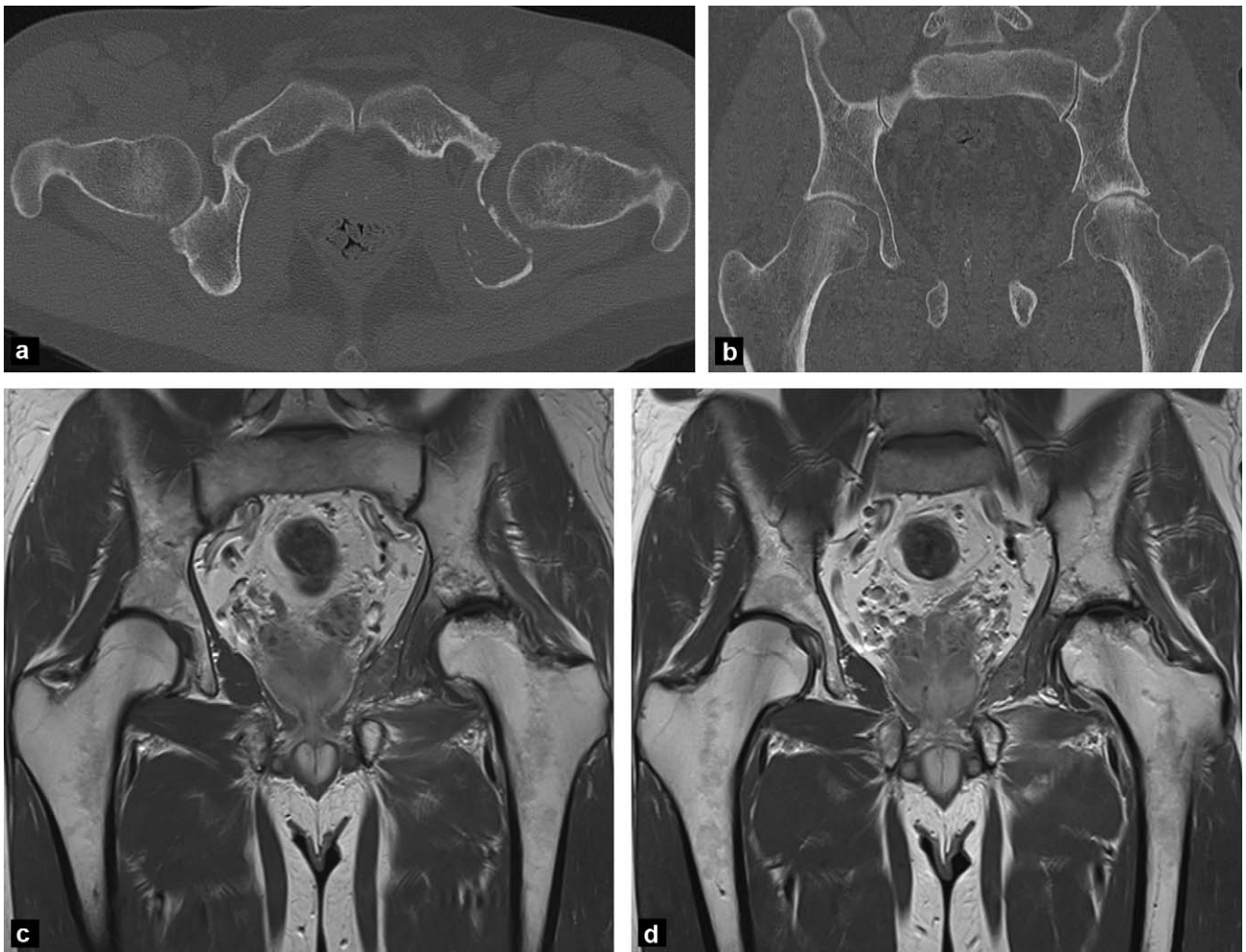


Figure 15. Évolution défavorable d'une fissure par insuffisance osseuse ou nécrose, de la tête fémorale gauche chez un patient de 40 ans ayant eu une irradiation de l'aile iliaque gauche pour un plasmocytome multiple. a : image scanner en coupe axiale, fenêtre osseuse, montrant l'ostéolyse iliaque gauche avec relatif respect des corticales (plasmocytome traité, en rémission) ; b : image scanner, plan coronal, fenêtre osseuse, montrant la perte de sphéricité de la tête fémorale gauche, une ligne claire sous-chondrale de la tête fémorale assez latérale, et des signes d'arthrose coxofémorale secondaire (pincement médial, condensation sous-chondrale des deux berges articulaires) ; c et d : IRM, images coronales T1 après injection de gadolinium montrant l'absence de prise de contraste de la bande en hypersignal sous-chondral de la tête fémorale.



Figure 16. Fracture costale consolidée chez une patiente ostéoporotique. La réaction de réparation osseuse est bien analysable au scanner.

nue, la réaction périostée et l'œdème peuvent conduire à des diagnostics erronés d'infection ou de tumeur osseuse. Plusieurs études suggèrent que la ligne de fracture pourrait débuter à partir ou à proximité d'un trou nourricier en tant que point de faiblesse de la corticale [25,26]. La récurrence fracturaire a été décrite, possiblement en rapport avec une reprise trop précoce de la marche [17].

La littérature sur les fractures tibiales est abondante. Le terme général de "shin splints" représente les douleurs de jambe liées à l'activité et regroupe un continuum de modifications qui vont du normal à la fracture de contrainte [27]. La course est l'activité le plus souvent incriminée dans la fracture de fatigue du tibia. Celle-ci survient dans les tiers intermédiaire et distal de la diaphyse tibiale des coureurs de longue distance ; elle est plutôt proximale chez les enfants (Fig. 8) et les coureurs de petites distances [28]. Lorsque les fractures par insuffisance se produisent dans le tibia, elles intéressent plutôt la diaphyse distale et sont transversales [28] (Fig. 19 et 20).

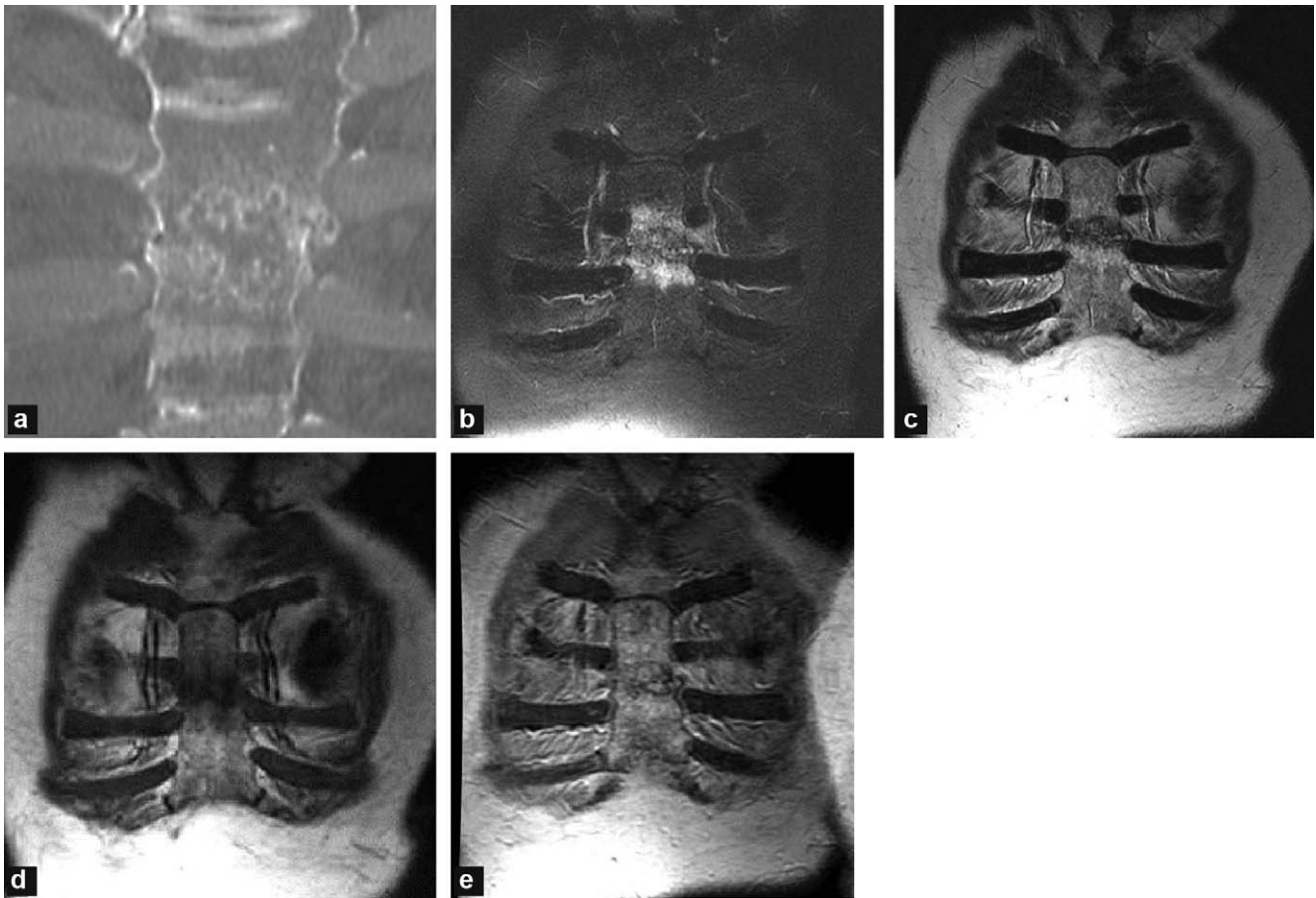


Figure 17. fracture par insuffisance osseuse du sternum avec défaut de consolidation chez une patiente âgée ostéoporotique. a : scanner, image frontale en fenêtre osseuse ; b : IRM, image coronale oblique en pondération T2 avec saturation du signal de la graisse ; c : image coronale oblique en pondération T2 ; d : IRM, image coronale oblique en pondération T1 ; e : IRM, image coronale oblique en pondération T1 après injection de gadolinium. Ces images montrent une solution de continuité transversale du corps du sternum, large, à bords irréguliers, avec un œdème des berges.

Les modifications radiographiques initiales sont tellement subtiles qu'elles ne sont habituellement pas détectées. Rétrospectivement, un foyer mal défini d'ostéopénie corticale focale, ou quelques striations claires, peuvent être notés. On pense que cet aspect correspond à la

première phase du processus de réparation, c'est-à-dire à la résorption osseuse. La formation osseuse, quant à elle, survient à la face périostée (Fig. 9) et à la face endostée du cortex lors de la seconde phase de réparation (formation du cal osseux). Une vraie ligne claire peut

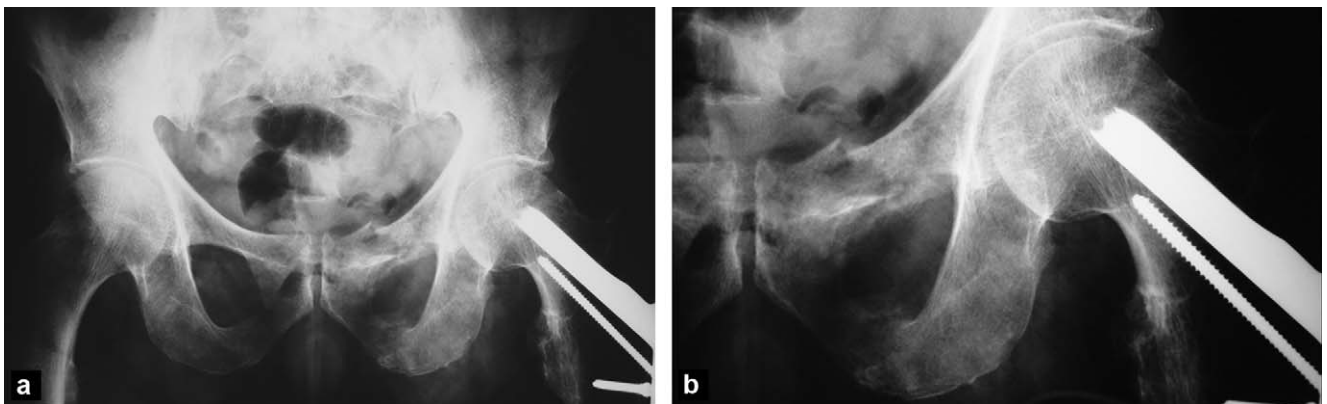


Figure 18. Fracture de la branche ilio-pubienne gauche chez un patient ayant une prothèse de hanche. a et b : radiographies de face montrant une fracture des branches ilio-pubienne et ischio-pubienne gauches. C'est le décroché de la corticale supérieure de la branche ilio-pubienne qui facilite le diagnostic positif. Visibilité du cal de réparation de la branche ischio-pubienne.



Figure 19. Fracture par insuffisance osseuse de la métaphyse distale du tibia. La radiographie de cheville de profil montre une hypertransparence osseuse et au sein de la métaphyse, une ligne dense (parallèle à la ligne du cartilage de conjugaison) qui correspond à la fracture.

être visible, selon l'intensité et la durée d'application des contraintes.

Os trabéculaire des métaphyses

L'os trabéculaire du col fémoral (Fig. 13) et des métaphyses proximale et distale du tibia (Fig. 19 et 20) sont un site habituel de fracture de contrainte. La fracture interrompt le faisceau de travées principales (par exemple le col fémoral, le calcaneus, les métaphyses tibiales). Le trait est typiquement perpendiculaire aux travées (Fig. 13 et 19). L'aspect radiologique typique est une fine ligne dense perpendiculaire aux travées (Fig. 13, 19 et 20), qui reflète l'impaction des travées, des débris de fracture ou le cal de réparation des travées. Les fractures trabéculaires métaphysaires sont plutôt la conséquence de contraintes en compression. Ce sont des fractures par insuffisance plus souvent que de fatigue.

Os trabéculaire des épiphyses

La tête fémorale et les condyles fémoraux, les plateaux tibiaux, les têtes métatarsiennes sont sujets aux fractures de contrainte (Fig. 4, 14, 15, 23), soit par fatigue, soit par insuffisance. Dans les deux cas, la ligne de fracture est sous-chondrale et son siège varie selon les effets combinés de la direction des contraintes, de leur intensité et de la forme concave ou convexe de l'épiphyse. En outre, l'état du cartilage détermine l'amplitude et la distribution des contraintes qui vont être appliquées à l'os sous-chondral (et vice versa). Les fractures sous-chondrales sont souvent parallèles à la surface articulaire (Fig. 6 et 20).

La ligne de fracture épiphysaire n'est habituellement pas visible sur les radiographies. Cependant, l'effondrement osseux engendre une perte de sphéricité de la tête (Fig. 15 et 23) ou du condyle fémoral, ou un décroché du plateau tibial. L'IRM, en revanche, montre facilement la ligne de fracture et l'œdème de l'os et des tissus mous voisins (Fig. 4, 14, 15, 23). Le principal diagnostic différentiel est l'ostéonécrose épiphysaire et l'existence d'un

continuum lésionnel entre les deux entités a été suggérée, les fractures sous-chondrales pseudarthrosées engendrant un territoire d'os nécrotique (Fig. 15). Les fractures épiphysaires par insuffisance ont en outre été incriminées dans la survenue de la coxopathie destructrice rapide [29].

Os du pied et de la cheville

Les os du pied et la cheville sont très exposés aux contraintes dans les activités sportives et dans les activités quotidiennes (Fig. 1–7, 20, 22). Le calcaneus (Fig. 7) et les métatarsiens (Fig. 1–4, 22) sont particulièrement touchés, que ce soit par les fractures de fatigue ou par les fractures par insuffisance. Mais tous les os peuvent être touchés (talus—Fig. 6 et 20—, os naviculaire (Fig. 5), cuboïde, cunéiformes, phalanges, sésamoïdes). Les fractures de métatarsiens se rencontrent chez les coureurs, les danseuses de ballet, les gymnastes, les jeunes recrues militaires [30]. Elles peuvent être diaphysaires, souvent la diaphyse des deuxième, troisième, quatrième métatarsien, touchant la corticale du tiers intermédiaire ou distal. Les fractures des bases métatarsiennes sont quant à elles des fractures trabéculaires (Fig. 3). Les facteurs de risque sont les troubles de la répartition du poids du corps sur les membres inférieurs, comme une inégalité de longueur des membres inférieurs ou un pied plat [30]. La localisation calcaneenne la plus typique est la région postérosupérieure de la tubérosité calcaneenne (Fig. 7).

Sacrum, bassin

Les fractures de contrainte du sacrum sont habituellement des fractures par insuffisance, en cas d'ostéoporose ou après irradiation pelvienne (Fig. 10–12, 25). Souvent, elles compliquent une chute chez le sujet âgé (Fig. 10). Elles sont souvent méconnues. Les radiographies montrent rarement le trait de fracture. La scintigraphie et l'IRM font le diagnostic aisément. Au scanner, l'os trabéculaire étant raréfié, le trait de fracture sera difficile à voir. Il faudra s'attacher à rechercher le décroché de la corticale antérosupérieure et la perte de la densité graisseuse du côté fracturé. À un stade plus tardif, la condensation des berges de la fracture ou la pseudarthrose (Fig. 10) rend le diagnostic plus évident.

Les fractures de fatigue sont rares au sacrum. Elles ont été décrites chez les coureurs de longue distance ou les recrues militaires (surtout les femmes), consécutivement au port d'un lourd sac à dos. Les fractures du sacrum ont également été rapportées en post-partum (Fig. 25 et 26), les causes pouvant être une ostéoporose de la grossesse et la prise de poids rapide et excessive du troisième trimestre.

Le trait de fracture est différent dans les fractures par insuffisance et les fractures de fatigue. Dans les fractures par insuffisance, la ligne est parallèle à l'interligne sacro-iliaque, avec souvent une atteinte bilatérale ou une fracture en H (trait transversal dans une pièce sacrée) (Fig. 10). Le trait des fractures de fatigue est habituellement oblique, intéressant seulement la partie haute de l'aileron sacré et rejoignant le premier ou second trou sacré [31] (Fig. 26).

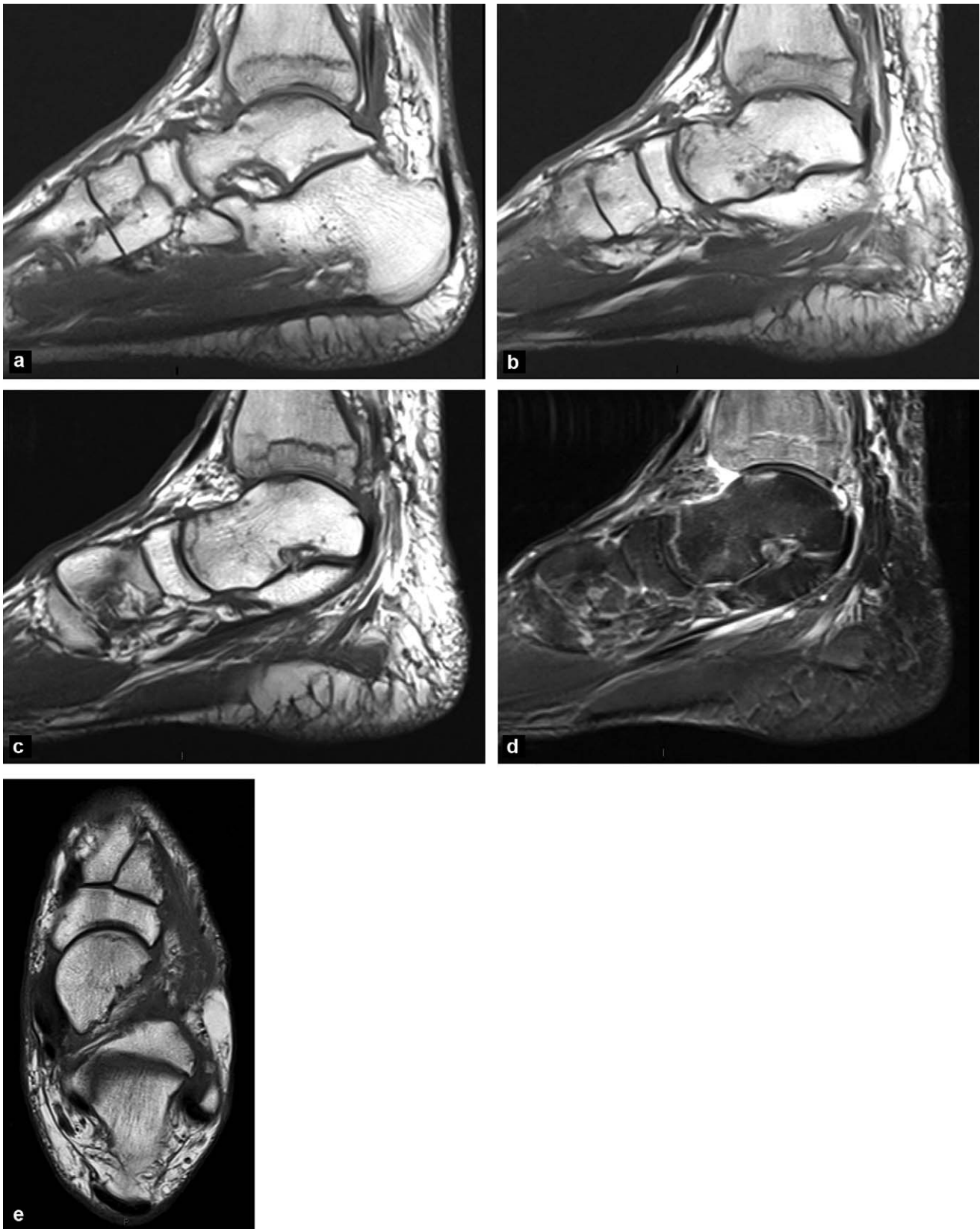


Figure 20. Multiples fractures par insuffisance osseuse de la cheville et du pied chez un patient greffé rénal. a, b, et c : IRM, images sagittales en pondération T1 ; d : IRM, image sagittale en pondération T2 avec saturation du signal de la graisse ; e : IRM, image axiale en pondération T1. Ces images montrent les lignes de fracture de la métaphyse distale du tibia, du dôme et tête du talus. Il existe aussi un trait parallèle à l'articulation sous-talienne postérieure. Œdème périlésionnel.

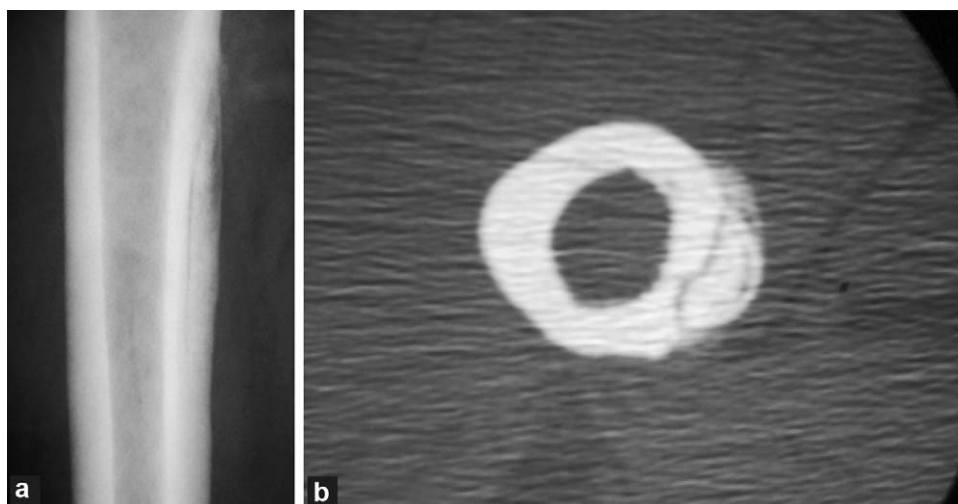


Figure 21. Fracture longitudinale du fémur par insuffisance osseuse chez une patiente de 64 ans. a : scanner, image frontale en fenêtre osseuse ; b : scanner, image axiale en fenêtre osseuse. La fracture verticale réalise une véritable dissection de la corticale médiale. Réaction périostée compacte.



Figure 22. Fracture diaphysaire du deuxième métatarsien chez une jeune femme ayant une maladie cœliaque. a, b, c : radiographie de face à la phase de début des douleurs puis à un mois et deux mois. Constitution d'un cal exubérant probablement favorisé par l'absence d'immobilisation et peut-être par l'insuffisance osseuse.

Les fractures de contrainte de l'acétabulum sont des fractures par insuffisance ou des fractures de fatigue. Le trait est situé sur le toit acétabulaire (Fig. 11) ou dans la colonne antérieure (Fig. 12).

Une caractéristique des fractures de contrainte du bassin est la multiplicité des fractures qui intéressent conjointement le sacrum, les branches pubiennes, l'acétabulum [31,32].

La chirurgie prothétique de la hanche (et du genou) expose à la survenue de fractures dans le membre intéressé, le membre opposé ou le bassin. Les facteurs impliqués sont

la reprise postopératoire de la déambulation, l'ostéoporose de décharge et la modification du trajet des contraintes par la prothèse (Fig. 18).

Autres

Les fractures de contrainte peuvent survenir à peu près partout, dans les côtes (activité physique, toux) (Fig. 16), le sternum (Fig. 17), la clavicule, l'arc postérieur des vertèbres du rachis en croissance (lyse isthmique), et les os du membre supérieur (humérus, scapula (Fig. 27)).



Figure 23. Fracture sous-chondrale de la tête fémorale droite chez un homme de 40 ans quelques jours après un faux mouvement de la hanche. a : radiographie de face ; b : radiographie de faux-profil ; c : IRM, image coronale en pondération T1 ; d : IRM, image coronale en pondération T1 après injection de gadolinium. Les radiographies montrent une discrète perte de sphéricité de la tête (surtout de profil). La fracture sous-chondrale est bien visible en IRM. Après injection de gadolinium, l'œdème prend le contraste de façon homogène avec normalisation du signal. Évolution clinique favorable.

Complications des fractures de contrainte

La poursuite de l'activité sur une fracture de contrainte risque de conduire à une fracture complète de l'os (Fig. 2, 7 et 8) avec un déplacement des fragments. L'autre risque est la fracture de contrainte d'un os voisin ou de l'os homologue du côté opposé, par suite du transfert

automatique du poids du corps sur des zones encore indolores [7].

Déplacement

Les fractures en distraction se déplacent souvent car les forces qui en sont la cause ont tendance à écarter les fragments. Les fractures de contrainte du col fémoral en

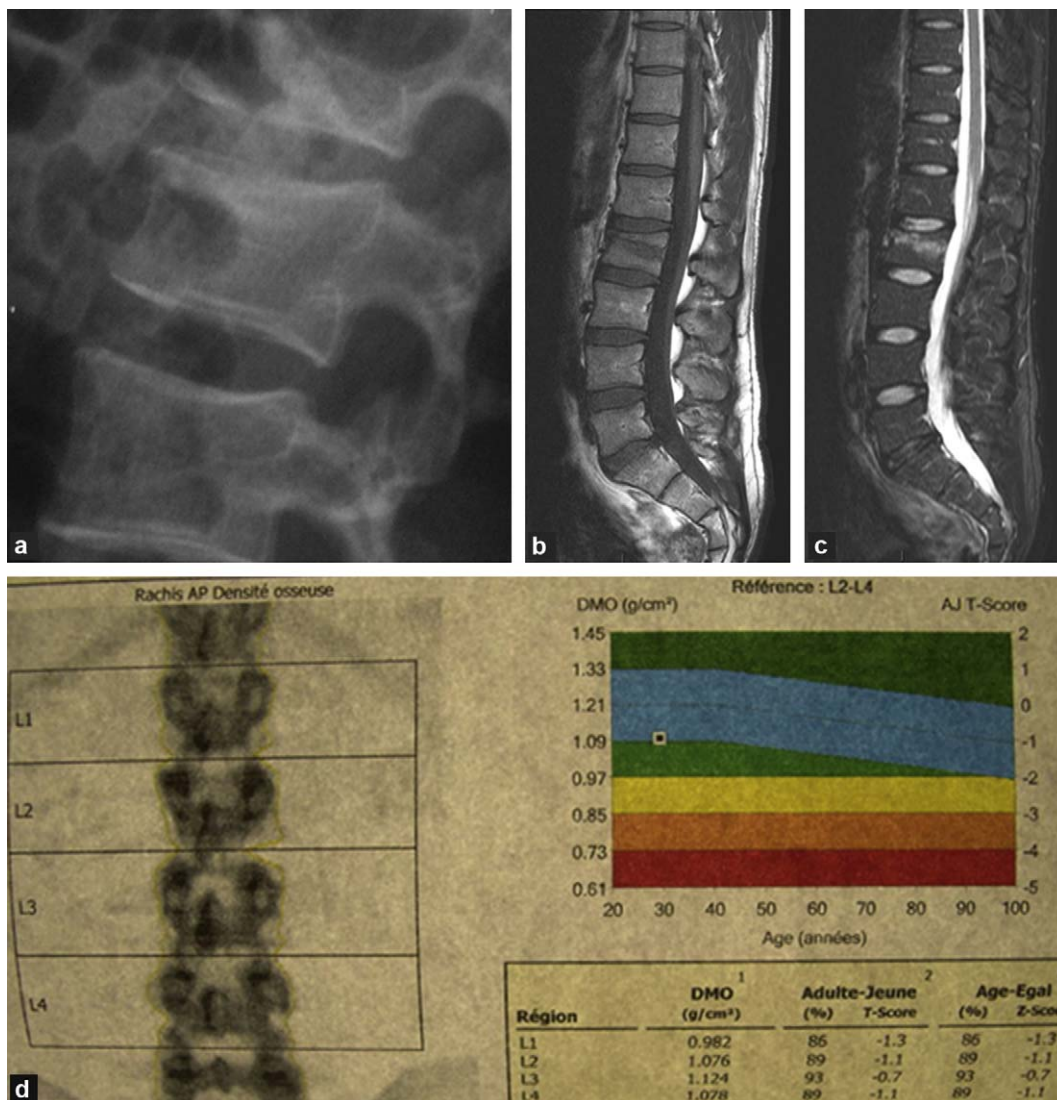


Figure 24. Fracture vertébrale après un traumatisme modéré chez un jeune chef de clinique de radiologie. La recherche d'une fragilité osseuse a mis en évidence une densité minérale à la limite inférieure de la normale et une carence marquée en vitamine D ; a : radiographie de profil centrée sur L2 montrant la fracture du plateau supérieur avec diminution des hauteurs antérieure et moyenne du corps vertébral ; b : IRM, image sagittale T1 ; c : image sagittale en pondération T2 avec saturation du signal de la graisse. Ces images montrent la diminution de hauteur de L2 et les anomalies de signal de type œdème, en bande, situées sous le plateau supérieur ; d : résultats de l'ostéodensitométrie montrant une densité minérale osseuse au rachis à la limite inférieure de la normale.



Figure 25. Fracture sacrée bilatérale chez une jeune femme ayant des pygalgies au décours immédiat d'un premier accouchement ; a : IRM, image axiale en pondération T2 après saturation du signal de la graisse ; b : IRM, image coronale oblique en pondération T2 après saturation du signal de la graisse ; c : IRM, image coronale oblique en pondération T1. Œdème sacré bilatéral. Les lignes de fractures sont mieux visibles en T1. Il faut savoir rechercher le décroché de la corticale et l'œdème dans les parties molles antérieures qui sont normalement de signal graisseux.

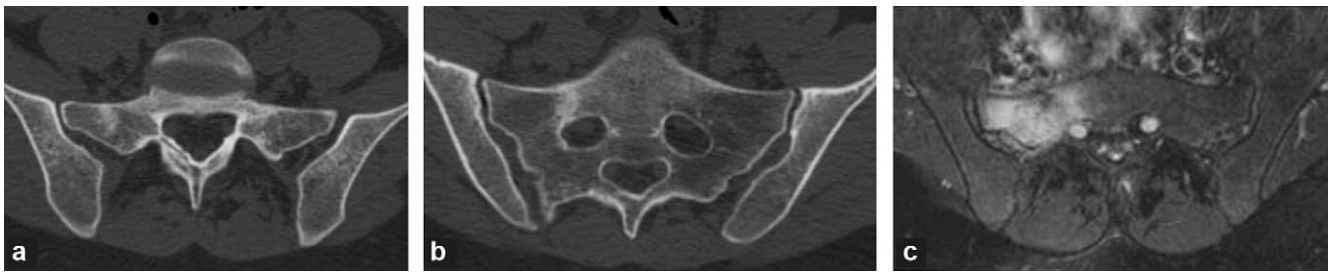


Figure 26. Fracture sacrée droite révélée par des douleurs en post-partum immédiat. a et b : scanner, images axiales en fenêtre osseuse ; c : IRM, image axiale en pondération T2 avec saturation du signal de la graisse. La ligne de fracture est en situation beaucoup plus médiale que dans les fractures par insuffisance osseuse de la femme âgée. Sur les images scanner on note le décroché de la corticale antérieure et l'œdème des parties molles antérieures par comparaison avec le côté gauche. Œdème osseux périfracturaire.

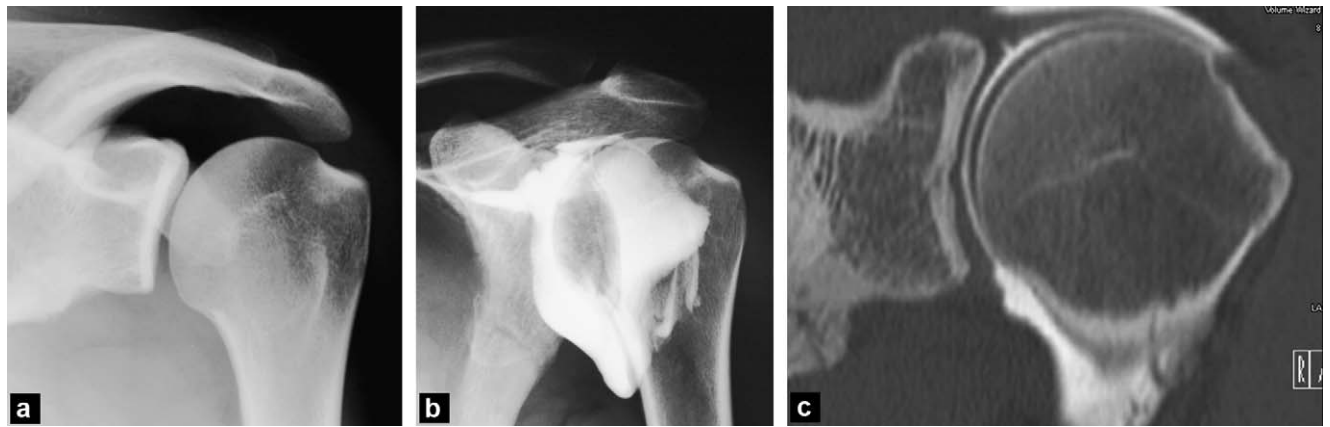


Figure 27. Fracture de fatigue de l'omoplate gauche chez un jeune homme de 28 ans, rugbyman amateur ayant des douleurs lors des mouvements de rotation externe contrariée. a : radiographie de l'épaule gauche de face en rotation externe ; b : cliché arthrographique ; c : arthroscanner, image coronale oblique. Il existe une fracture du bord axillaire de l'omoplate gauche sur lequel s'insère le muscle petit rond. Cette fracture de fatigue est classiquement décrite chez les travailleurs sur chaîne de montage.

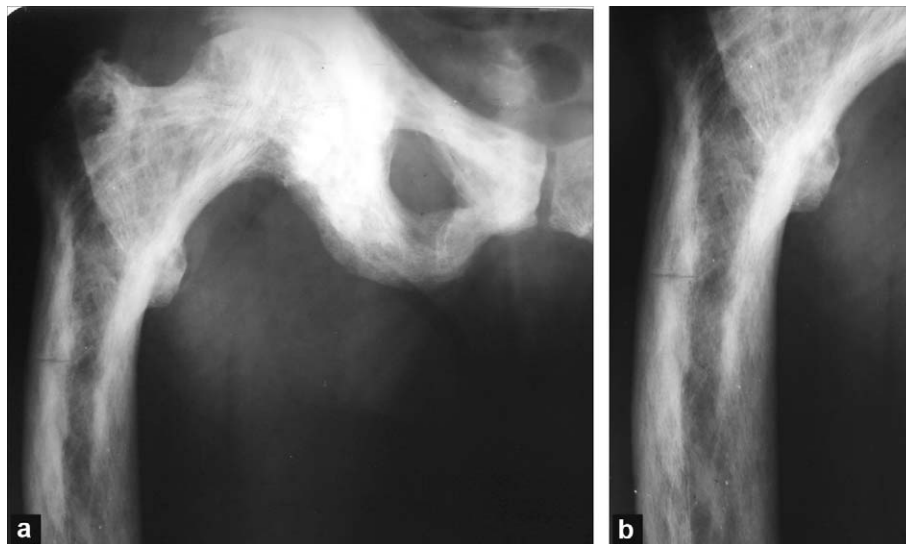


Figure 28. Fractures transversales sur un fémur pagétique chez une femme de 80 ans. a et b : radiographies de face montrant l'atteinte pagétique de l'os iliaque et du fémur gauches avec des corticales épaissies, des travées épaissies et grossières, une hypertrophie des pièces osseuses (lame quadrilatère droite par rapport à la gauche), une déformation de l'extrémité supérieure du fémur en coxa vara avec incurvation latérale exagérée du fémur. Les fractures transversales, corticales, s'observent dans les convexités osseuses, ici dans la corticale latérale du fémur.

sont une bonne illustration. La fracture habituelle du col fémoral est une fracture en compression de la région inféro-médiale du col, qui est stable. À l'inverse, les fractures corticales de la région supérieure du col fémoral sont des fractures en distraction à haut risque de déplacement [33,34]. C'est la raison pour laquelle une fixation interne de ce type de fracture doit être discutée [35].

Collapsus épiphysaire

Les fractures sous-chondrales de la tête ou des condyles fémoraux peuvent aboutir à un collapsus osseux [36] (Fig. 15). Le devenir des fractures sous-chondrales n'est pas stéréotypé. Il dépend du degré d'ostéopénie, du degré d'activité, du poids du corps et de l'étendue de la fracture initiale.

Nécrose épiphysaire

À la hanche et au genou, une fracture sous-chondrale peut être difficile à distinguer d'une plage sous-chondrale de nécrose (Fig. 15). La distinction est importante car les fractures ont un pronostic plus souvent favorable que les nécroses. C'est parfois la seule évolution qui permet le diagnostic définitif des images initialement ambiguës [37].

Conclusion

L'os est un tissu économe : en répartissant ses composantes architecturales exactement aux endroits adéquats, il se dote du maximum de résistance mécanique pour une quantité de tissu osseux donné. L'inadaptation entre les contraintes appliquées sur un os et sa résistance conduit à la faillite osseuse sous forme d'une fracture de contrainte, fracture de fatigue ou fracture par insuffisance. L'imagerie a contribué à améliorer la compréhension du mécanisme de ces fractures.

Conflit d'intérêt

Aucun.

Références

- [1] Meyer GH. Die Architektur der Spongiosa. *Arch Anat Physiol Med* 1867;34:615–28.
- [2] Culmann C. Die Graphische Statik. Zurich: Auflage, Meyer und Zeller; 1866.
- [3] Roux W. Beitrage zur Morphologie der funktionellen Anpassung. *Arch Anat Physiol Anat Abt* 1885;9:120–58.
- [4] Wolff J. Über die innere Architectur der Knochen und ihre Bedeutung für die Frange vom Knochenwachstum. *Virchow's Arch* 1870;50:389–450.
- [5] Wolff J. Das Gesetz der Transformation der Knochen. Berlin: Hirschwald; 1892.
- [6] Anderson M, Greenspan A. Stress fractures. *Radiology* 1996;199:1–12.
- [7] Daffner RH, Pavlov H. Stress fractures: current concepts. *AJR* 1992;159:245–52.
- [8] O'Malley MJ, Hamilton WG, Munyak J. Stress fractures at the base of the second metatarsal in ballet dancers. *Foot Ankle Int* 1996;17:89–94.
- [9] Riggs BL, Khosla S, Melton LJI. A unitary model for involutional osteoporosis: estrogen deficiency causes both type I and type II osteoporosis in postmenopausal women and contributes to bone loss in aging men. *J Bone Miner Res* 1998;13:763–73.
- [10] Shaffer RA, Rauh MJ, Brodine SK, Trone DW, Macera CA. Predictors of stress fracture susceptibility in young female recruits. *Am J Sports Med* 2006;34:108–15.
- [11] Jones BH, Thacker SB, Gilchrist J, Kimsey CD, Sosin DM. Prevention of lower extremity stress fractures in athletes and soldiers: a systematic review. *Epidemiol Rev* 2002;24:228–47.
- [12] Yamamoto T, Nakashima Y, Shuto T, Jingushi S, Iwamoto Y. Subchondral insufficiency fracture of the femoral head in younger adults. *Skeletal Radiol* 2007;36:S38–42.
- [13] Daffner RH, Martinez S, Gehweiler JAJ, Harrelson JM. Stress fractures of the proximal tibia in runners. *Radiology* 1982;142:63–5.
- [14] Rittweger J. Ten years muscle-bone hypothesis: what have we learned so far? -Almost a festschrift. *J Musculoskelet Neuronal Interact* 2008;8:174–8.
- [15] Fredericson M, Bergman AG, Hoffman KL, Dillingham MS. Tibial stress reaction in runners. Correlation of clinical symptoms and scintigraphy with a new magnetic resonance imaging grading system. *Am J Sports Med* 1995;23:472–81.
- [16] Bergman AG, Fredericson M, Ho C, Matheson GO. Asymptomatic tibial stress reactions: MRI detection and clinical follow-up in distance runners. *AJR* 2004;183:635–8.
- [17] Williams M, Laredo J, Setbon S, Bélangé G, Timsit MA, Karneff A, et al. Unusual longitudinal stress fractures of the femoral diaphysis: report of five cases. *Skeletal Radiol* 1999;27:81–5.
- [18] Feydy A, Drapé J-L, Beret E, Sarazin L, Pessis E, Minoui A, et al. Longitudinal stress fractures of the tibia: comparative study of CT and MR imaging. *Eur Radiol* 1998;8:598–602.
- [19] Gaeta M, Minutoli F, Vinci S, Salamone I, D'Andrea L, Bitto L, et al. High-resolution CT grading of tibial stress reactions in distance runners. *AJR* 2006;187:789–93.
- [20] Johnell O, Rausing A, Wendeberg B, Westlin N. Morphological bone changes in shin splints. *Clin Orthop Related Res* 1982;167:180–4.
- [21] Magnusson HI, Ahlborg HG, Karlsson C, Nyquist F, Karlsson MK. Low regional tibial bone density in athletes with medial tibial stress syndrome normalizes after recovery from symptoms. *Am J Sports Med* 2003;31:596–600.
- [22] Murray PDF. Chapter IV The mechanical structure of bones. In: Murray PDF, editor. *Bones. A study of the development and structure of the vertebrate skeleton*. London: Cambridge University Press; 1936.
- [23] Devas MB. Longitudinal stress fractures: another variety seen in long bones. *J Bone Joint Surg [Br]* 1960;42:508–14.
- [24] Allen GJ. Longitudinal stress fractures of the tibia: diagnosis with CT. *Radiology* 1988;167:799–801.
- [25] Craig JG, Widman D, Van Holsbeeck M. Longitudinal stress fracture: patterns of edema and the importance of the nutrient foramen. *Skeletal Radiol* 2003;32:22–7.
- [26] Saifuddin A, Chalmers AG, Butt WP. Longitudinal fractures of the tibia: MRI features in two cases. *Clin Radiol* 1994;49:490–5.
- [27] Anderson MW, Ugalde V, Batt M, Gacayan J. Shin splints: MR appearance in a preliminary study. *Radiology* 1997;204:177–80.
- [28] Levine SM, Lambiasi RE, Petchprapa CN. Cortical lesions of the tibia: characteristic appearances at conventional radiography. *Radiographics* 2003;23:157–77.
- [29] Yamamoto T, Takabatake K, Iwamoto Y. Subchondral insufficiency fracture of the femoral head resulting in rapid

- destruction of the hip joint: a sequential radiographic study. *AJR* 2002;178:435–7.
- [30] Ashman CJ, Klecker RJ, Yu JS. Forefoot pain involving the metatarsal region: differential diagnosis with MR imaging. *Radiographics* 2001;21:1425–40.
- [31] Ahovuo JA, Kiuru MJ, Visuri T. Fatigue stress fractures of the sacrum: diagnosis with MR imaging. *Eur Radiol* 2004;14:500–5.
- [32] Williams TR, Puckett ML, Denison G, Shin AY, Gorman JD. Acetabular stress fractures in military endurance athletes and recruits: incidence and MRI and scintigraphic findings. *Skeletal Radiol* 2002;31:277–81.
- [33] Blickenstaff LD, Morris JM. Fatigue fracture of the femoral neck. *J Bone Joint Surg [Am]* 1966;48:1031–47.
- [34] Devas MB. Stress fractures of the femoral neck. *J Bone Joint Surg [Br]* 1965;47:728–38.
- [35] Lee CH, Huang GS, Chao KH, Jean JL, Wu SS. Surgical treatment of displaced stress fractures of the femoral neck in military recruits: a report of 42 cases. *Arch Orthop Trauma Surg* 2003;123:527–33.
- [36] Buttaro M, Gonzalez Della Valle A, Morandi A, Sabas M, Pietrani M, Piccaluga F. Insufficiency subchondral fracture of the femoral head. Report of 4 cases and review of the literature. *J Arthroplasty* 2003;18:377–82.
- [37] Vande Berg BC, Lecouvet FE, Koutaissof S, Simoni P, Malghem J. Bone marrow edema of the femoral head and transient osteoporosis of the hip. *Eur J Radiol* 2008;67:68–77.