



HAL
open science

Évaluation du risque fracturaire de l'os tumoral

Cyrille B Confavreux, Hélène Follet, Jean-Baptiste Pialat, David Mitton

► **To cite this version:**

Cyrille B Confavreux, Hélène Follet, Jean-Baptiste Pialat, David Mitton. Évaluation du risque fracturaire de l'os tumoral. *Revue du Rhumatisme*, 2025, <10.1016/j.rhum.2025.09.011>. <hal-05360247>

HAL Id: hal-05360247

<https://hal.science/hal-05360247v1>

Submitted on 12 Nov 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License

Évaluation du risque fracturaire de l'os tumoral

Cyrille B. Confavreux^{1,2,3,4}, Hélène Follet^{2,3}, Jean-Baptiste Pialat^{3,5}, David Mitton⁶

Accepté le 15 septembre 2025
Disponible sur internet le :

1. Institut de cancérologie des hospices civils de Lyon, Centre expert des métastases osseuses (CEMOS), service de rhumatologie Sud, Pierre-Bénite, France
2. Inserm, UMR 1033, LYOS, Lyon, France
3. Université Claude-Bernard Lyon I, Villeurbanne, France
4. Centre de recherche en cancérologie de Lyon (CRCL), UMR Inserm 1052 CNRS 5286, Lyon, France
5. Hospices civils de Lyon, Centre expert des métastases osseuses (CEMOS), service de radiologie, Pierre-Bénite, France
6. Université de Lyon, université Gustave-Eiffel, université Claude-Bernard Lyon 1, LBMC UMR_T9406, 69622 Lyon, France

Correspondance :

Cyrille B. Confavreux, Hospices civils de Lyon, hôpital Lyon Sud, service de rhumatologie, 165, chemin du Grand Revoyet, 69395 Pierre-Bénite, France.
cyrille.confavreux@chu-lyon.fr

Mots clés

Fracture pathologique
Métastases osseuses
Simulation numérique
Risque fracturaire

■ Résumé

D'importants progrès thérapeutiques ont été réalisés dans la prise en charge des patients atteints de cancer, avec une amélioration notable de la survie, y compris chez les patients porteurs de métastases osseuses de stade IV. Dans ce contexte, la santé locomotrice devient un enjeu central pour préserver l'autonomie et la qualité de vie des patients. L'évaluation du risque fracturaire des métastases osseuses constitue l'élément pivot de la stratégie décisionnelle, guidant les prescriptions d'agents anti-résorptifs, les recommandations d'activité physique et les interventions locales telles que la radiothérapie, la chirurgie ou la radiologie interventionnelle. Une étape incontournable, du fait du caractère souvent asymptomatique et diffus des métastases osseuses, est la cartographie systématique des localisations osseuses, notamment au sein des os porteurs. Pour chaque localisation identifiée, l'évaluation du risque fracturaire repose actuellement sur des approches qualitatives par imagerie, appuyées par des scores comme ceux de Mirels ou SINS. Ces outils présentent néanmoins des limites importantes, justifiant le développement de nouvelles méthodes d'évaluation du risque fracturaire dans les métastases osseuses et le myélome. La simulation numérique à partir d'images quantitatives scanographiques qCT constitue l'un des outils émergents permettant d'estimer, de façon personnalisée, la résistance osseuse tumorale et de mieux évaluer le risque de fracture pathologique au niveau fémoral et vertébral. Les générations futures de simulations numériques, enrichies par l'intelligence artificielle, intégreront des conditions de charge multiples liées au mouvement afin de refléter au mieux les contraintes de la vie réelle. Cette approche vise à guider la réhabilitation et l'activité physique des patients dans une logique de médecine personnalisée.

Keywords

Pathological fracture
Bone metastasis
Numerical simulation
Fracture risk

■ Summary

Fracture risk evaluation of bone metastasis

There has been significant therapeutic progress in the management of cancer patients, with marked improvements in survival rates, including for those with stage IV bone metastases. Against this backdrop, locomotor health is becoming a central issue in preserving patients' autonomy and quality of life. A key element of the decision-making strategy is assessing the risk of fracture in patients with bone metastases, as this guides prescriptions for anti-resorptive agents, recommendations for physical activity, and local interventions such as radiotherapy, surgery, and interventional radiology. Due to the often asymptomatic and diffuse nature of bone metastases, the systematic mapping of bone locations, particularly within load-bearing bones, is essential. Currently, fracture risk assessment for each identified location is based on qualitative imaging approaches supported by scores such as Mirels or SINS. However, these tools have significant limitations, which justify the development of new methods for assessing fracture risk in bone metastases and myeloma. One of the emerging tools for personalised estimation of tumour bone strength and better assessment of pathological fracture risk at the femoral and vertebral levels is numerical simulation based on quantitative computed tomography (qCT) scans. Future generations of numerical simulations, enriched by artificial intelligence, will incorporate multiple loading conditions linked to movement, providing a more accurate reflection of real-life constraints. This approach aims to guide patients' rehabilitation and physical activity within a personalized medicine framework.

La fracture pathologique : un enjeu majeur des métastases osseuses

La fracture d'un os tumoral représente une complication majeure des métastases osseuses et du myélome. L'incidence des fractures pathologiques est en augmentation ($\times 3,5$ entre 2009 et 2018 en France) [1]. La fracture pathologique peut survenir soit sur un os long avec le risque d'impotence et de troubles de la marche, soit sur une vertèbre avec le risque de compression médullaire et neurologique. Dans les deux cas, les fractures pathologiques sont très douloureuses et s'accompagnent le plus souvent :

- d'alitement avec les complications de décubitus associées ;
- d'un traitement local dédié pouvant comprendre chirurgie orthopédique ou du rachis, radiothérapie, radiologie interventionnelle, contention ;
- de suspension du traitement oncologique ;
- de coûts de santé majeurs ;
- d'une diminution de la survie des patients [2,3].

Une fracture sur métastase osseuse rend la prise en charge chirurgicale plus complexe et expose à un plus grand risque de retard de consolidation, de pseudarthrose et d'infection.

La prise en charge et la prévention des fractures pathologiques des patients cancéreux constituent un enjeu majeur de la rhumato-cancérologie.

Résistance osseuse tumorale

La résistance osseuse ne se résume pas à la seule densité osseuse (quantitatif) [4] mais implique aussi la qualité osseuse

qui inclut de nombreux paramètres. On peut les regrouper schématiquement en :

- propriétés de la matrice avec la qualité du minéral, la qualité du collagène et de sa maturation, l'existence de micro-cracks et la viabilité des ostéocytes ;
- l'architecture osseuse générale avec la forme et la géométrie de l'os (macroarchitecture) et la microarchitecture osseuse (épaisseur et connectivités des travées, porosité et épaisseur corticale, densité volumique des compartiments) [5].

Les métastases osseuses, en se développant au sein de la pièce osseuse, vont altérer la densité osseuse, la matrice et la micro-architecture osseuse [6,7]. De plus, la zone de développement va affecter la macro-architecture osseuse. Ainsi, chaque métastase aura un impact différent sur l'os, ce qui complique l'évaluation du risque fracturaire. Il est nécessaire de développer une approche personnalisée et répétée dans le temps car chaque métastase aura une réponse variable au traitement oncologique. L'os peut, par exemple, rapidement se condenser en un os de qualité intermédiaire dont les propriétés mécaniques sont mal connues [7,8]. La prévision de la réponse est également un paramètre à prendre en compte lors de la discussion en réunion de concertation pluridisciplinaires de métastases osseuses [9,10].

Évaluation classique du risque de fracture pathologique

L'évaluation du risque fracturaire d'une métastase osseuse n'est pas simple. Elle repose souvent sur l'expérience des cliniciens avec une place importante pour l'existence ou non d'une

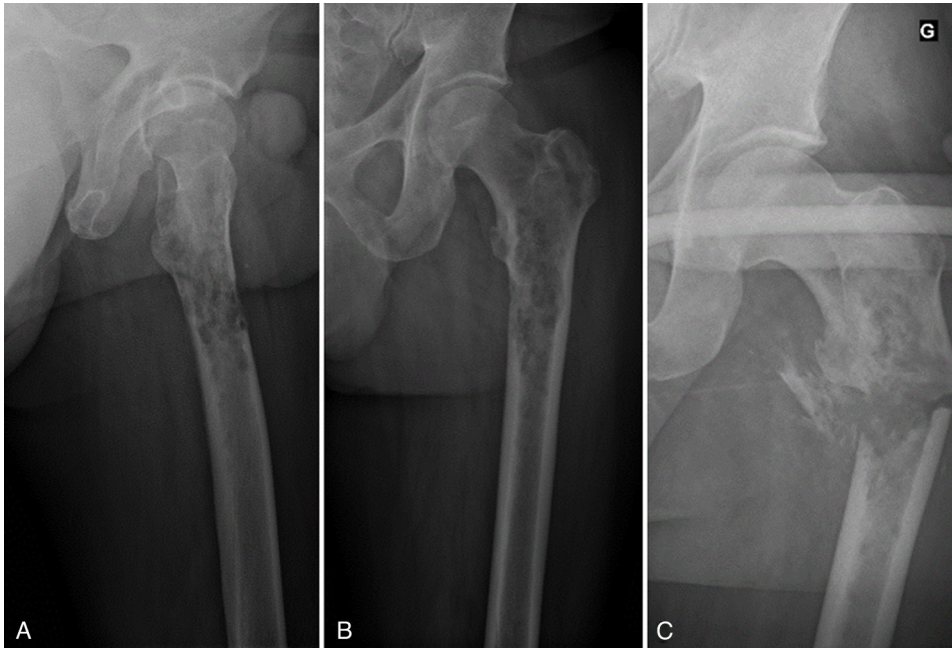


FIGURE 1
Fracture pathologique de l'extrémité proximale du fémur G chez un patient de 59 ans présentant un cancer pulmonaire métastatique osseux

Radiographies simples de profil (A) et de face (B) du fémur gauche réalisées pour douleur à l'appui 10 jours avant la fracture (C).

douleur mécanique, la localisation sur un os porteur et la lyse de la corticale (figure 1).

En imagerie, la radiographie standard reste un outil simple et accessible mais peu sensible, notamment pour les lésions à atteinte corticale minimale. Le scanner permet une évaluation morphologique plus fine, en particulier de la corticale, avec reconstructions sagittales indispensables pour le suivi évolutif des métastases osseuses. L'IRM est plus performante que le scanner pour détecter les infiltrations précoces de la moelle osseuse mais elle reste moins efficace que le scanner, pour évaluer l'étendue des destructions osseuses. Elle permet d'identifier l'œdème osseux associé aux fractures récentes. IRM et scanner apportent des informations complémentaires. La médecine nucléaire, via la scintigraphie osseuse au Tc^{99m} ou le TEP-scan au ^{18}F FDG, permet de détecter précocement les lésions métaboliquement actives en balayant le corps entier. Avec ces traceurs, elle est moyennement spécifique mais la sensibilité pour les localisations occultes est précieuse. Le TEP-scan permet en plus une évaluation des tissus mous ce qui est particulièrement intéressant en cas d'événement osseux inaugural et de recherche de cancer primitif.

Des scores d'évaluation du risque fracturaire ont été développés pour tenter d'orienter l'attitude thérapeutique locale entre décharge/immobilisation, radiothérapie, radiologie interventionnelle et chirurgie préventive. Pour les os longs, le score radiologique de Mirels est classiquement utilisé. Il est basé sur 4 critères : le site, la douleur, le type lésionnel et la taille [11]. Il est cependant limité par sa faible spécificité, notamment dans les situations intermédiaires qui sont justement les situations délicates à juger cliniquement [12]. Il ne tient pas compte des

nouvelles possibilités d'intervention mini-invasives qui combinent du ciment et des vis ou des stratégies combinant plusieurs approches comme la radiothérapie et la cimentoplastie. Au niveau rachidien, la plupart des scores, comme celui de Tokuhashi, intègrent la nature tumorale, mais ont été mis au point avant le profilage moléculaire des tumeurs cancéreuses. Ils sont, de fait, caduques à l'heure actuelle car antérieurs aux thérapies ciblées et à l'immunothérapie [13]. Le score SINS (*Spinal Instability Neoplastic Score*) est intéressant, car il n'intègre que des paramètres mécaniques. Dans ce score, l'absence de critère pronostic lié à la tumeur laisse la place à une analyse indépendante du pronostic par le cancérologue. Il repose sur 6 critères (localisation, douleur, type de lésion, alignement, effondrement, et atteinte postérolatérale). Il distingue les lésions stables, potentiellement instables ou instables [14]. Cependant, il catégorise la stabilité de la lésion rachidienne (i.e., le risque neurologique) et non pas directement le risque fracturaire. Sa capacité à prédire le risque fracturaire reste insuffisante dans les cas intermédiaires.

Le développement d'outils innovants et d'algorithmes adaptés à notre pratique actuelle est donc important pour améliorer la prévention et la prise en charge des fractures pathologiques.

La simulation numérique : un outil émergent d'évaluation du risque de fracture pathologique

Simulation numérique et modélisation biomécanique

La simulation numérique utilisant des modèles éléments finis à partir de l'imagerie médicale (format DICOM) permet une

évaluation quantitative patient-spécifique des contraintes mécaniques intra-osseuses et de la résistance osseuse. L'imagerie osseuse est habituellement réalisée par scanner. L'os du patient est d'abord réaxé puis segmenté. Il est ensuite maillé (i. e., découpé en éléments unitaires : voxel cubique, tétra ou hexaédrique). À chaque élément sont attribuées des propriétés mécaniques basées sur des niveaux de gris reflétant la densité osseuse. L'os est ensuite soumis à un chargement mécanique simulé (effort vertical, chute latérale, etc.) pour établir, à l'aide de critères en déformation ou contrainte, son risque fracturaire personnalisé par l'intermédiaire d'une force à la rupture en Newton [15,16].

Cette technique est validée dans l'ostéoporose [17-20]. Des recherches sont en cours pour transférer et standardiser ces modèles de simulation numérique en rhumato-cancérologie (ClinicalTrials.govID NCT04170634 - Mekanos study/69HCL17_0642) et permettre une évaluation personnalisée du risque fracturaire des métastases osseuses [10].

Évaluation par simulation numérique du risque fracturaire d'une métastase osseuse

Pour une métastase osseuse, la résistance dépend à la fois de l'os sous-jacent et de la lésion (taille, type, localisation). En oncologie, le scanner est largement utilisé en routine, mais l'évaluation reste qualitative. L'exploitation quantitative par simulation numérique permettrait d'améliorer la prédiction du risque fracturaire (figure 2). Les premières études ont montré une supériorité des modèles éléments finis par rapport à l'évaluation clinique pour prédire les fractures pathologiques, en particulier de la partie proximale du fémur. Des scores sont testés [21-28]. Des limites persistent : conditions de charge simplifiées, critères globaux, méconnaissance des propriétés mécaniques spécifiques des tissus tumoraux.

La simulation numérique se développe aussi pour les vertèbres [29]. Les premières études montrent l'influence de la taille, la localisation et la nature des défauts lytiques. L'atteinte vertébrale corticale et postérieure (pédicules, articulations costo-vertébrales) est particulièrement délétère tout comme l'arche interne du fémur.

Évaluation des charges appliquées à l'os métastatique

L'estimation des charges mécaniques appliquées est essentielle. Elle est complexe mais nous permet peu à peu de nous rapprocher de la vie réelle. Plusieurs outils sont à l'étude. L'imagerie EOS permet d'analyser les déséquilibres sagittaux et les contraintes sur le rachis. Le déplacement antérieur du centre de charge diminue drastiquement la résistance vertébrale. Pour les fémurs, tenir compte du poids du patient et reproduire le cycle de marche ou d'autres activités physiques (saut, course, lever de chaise, chute...) sont importants pour guider le patient dans sa vie quotidienne. Les modèles musculosquelettiques qui

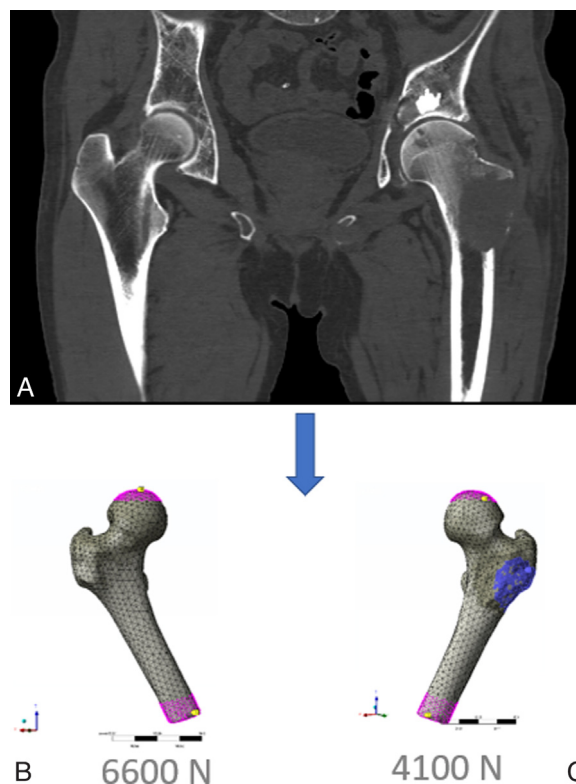


FIGURE 2

Coupe frontale scanographique de la partie proximale des fémurs d'un patient de 63 ans présentant un cancer du poumon stade IV

La coupe montre une métastase ostéolytique du massif trochantérien gauche (A). Réalisation d'une simulation numérique selon la méthode du modèle des éléments finis (protocole MEKANOS) pour évaluer la résistance mécanique du fémur métastatique gauche (C) par rapport au fémur sain controlatéral (B) en exerçant une contrainte verticale. La perte de résistance est évaluée à 38 % entre le côté métastatique et le côté sain.

simulent les forces musculaires lors des activités quotidiennes sont en développement.

Réponse coordonnée pour réduire le risque fracturaire des métastases osseuses

Cartographie des métastases osseuses

Cette première étape permet une cartographie exhaustive des localisations métastatiques osseuses, en particulier au niveau des os longs porteurs. Certaines localisations peuvent être asymptomatiques mais à risque fracturaire. Pour chaque lésion, il est nécessaire d'évaluer la douleur, le risque fracturaire et le risque compressif neurologique. Cela passe par une imagerie ciblée si nécessaire (radiographies face et profil d'os longs, scanner centré).

Vu la répartition habituelle des métastases osseuses, une imagerie couvrant diaphyses humérales, fémurs et genoux est

souhaitable. Deux modalités dominent : la scintigraphie osseuse et le TEP-scan. La scintigraphie osseuse utilise un bisphosphonate radio-marqué. Elle permet une détection plus précoce que la radiographie standard, avec une sensibilité accrue pour les métastases sclérosantes. L'association scintigraphie et scanner faible dose (SPECT-CT) améliore encore la performance diagnostique, mais reste limitée pour les lésions ostéolytiques. Elle reste particulièrement utilisée pour le cancer de la prostate. Elle est volontiers prise en défaut dans les lésions très ostéolytiques et les myélomes. Le traceur fluorure de sodium (NaF), est très sensible, mais est peu disponible [30].

Le TEP-scan supplante de plus en plus la scintigraphie osseuse. Il permet une analyse couplée fonctionnelle et anatomique et une exploration simultanée des tissus mous et du squelette. Le traceur choisi dépend du type de tumeur rencontrée. Le plus courant est le ^{18F}-FDG qui est particulièrement sensible pour le poumon, le rein, le sein, le lymphome, la vessie, le digestif. Sa sensibilité est faible pour le cancer de la prostate, où un traceur choline ou PSMA est préférable.

Démarche intégrée

L'étape suivante évalue les possibilités de traitement local par immobilisation/contention, radiothérapie, radiologie interventionnelle ou chirurgie. La dernière étape intègre le versant local aux perspectives de réponse tumorale au traitement oncologique, à l'état physiologique du patient (os sous-jacent, âge, comorbidités, *performans status*) et à son souhait.

Fréquemment, les attitudes thérapeutiques sont simples et claires. Pour les cas complexes, il est souhaitable d'opter pour une présentation collégiale en réunion de concertation pluridisciplinaires dédiée aux métastases osseuses (RCP-OOS). Idéalement, la RCP-OOS intègre des onco-rhumatologues, des chirurgiens orthopédistes formés à l'oncologie, des radiologues spécialisés, des radiothérapeutes et les oncologues référents. L'objectif est la prévention des événements osseux graves et s'appuie sur 3 axes : évaluation du risque fracturaire, indications raisonnées des traitements anti-résorptifs, et discussion collégiale des interventions locales en tenant compte de l'intensité douloureuse, du risque fracturaire, de la progression tumorale, des options thérapeutiques disponibles, du pronostic et des souhaits du patient. Il est fondamental d'éviter les décisions en urgence et de privilégier une planification concertée, d'autant que la chirurgie oncologique requiert des compétences techniques spécifiques rarement disponibles en situation d'urgence. Une telle organisation optimise la prise en charge globale.

Recommandations de l'ESMO pour le traitement systémique osseux

Les recommandations récentes de l'*European Society for Medical Oncology* (ESMO) proposent l'instauration rapide des anti-résorbeurs mensuels, puis une prescription personnalisée après 3 à 6 mois [31]. En France, l'instauration précoce dans les 3 mois

d'un traitement anti-résorbeur osseux réduisait de moitié un second événement osseux et le différait significativement dans le temps [32].

Toutefois, le manque d'adhésion de la communauté oncologique à la prise en charge dédiée des métastases osseuses, malgré toutes les conséquences décrites, est préoccupant. En France, seulement 9 % des nouveaux patients métastatiques osseux ont reçu un anti-résorbeur. Ce chiffre chute à 5,6 % pour les nouveaux patients métastatiques osseux présentant un événement osseux [1]. Ces résultats sont loin des recommandations internationales [31].

Conclusion

Grâce aux progrès thérapeutiques, la rhumato-cancérologie entre dans une nouvelle ère clinique. De nombreux patients atteignent des phases de stabilisation prolongée. Le risque fracturaire est un paramètre évolutif qu'il convient d'évaluer et de suivre individuellement pour préserver la fonction locomotrice et soulager la douleur.

La simulation numérique offre une perspective prometteuse. La validation clinique et la standardisation de cette technique sont

Pour la pratique, on retiendra

La survenue d'une fracture pathologique sur une métastase osseuse représente un tournant évolutif de la maladie cancéreuse. C'est une complication fréquente, et en augmentation, des métastases osseuses. Elle implique une prise en charge spécifique spécialisée. La fracture pathologique induit des comorbidités spécifiques, des coûts de santé importants, une baisse de survie et des retards de traitements oncologiques. Prévenir ces fractures est un enjeu fort de la rhumato-cancérologie.

Prévenir la fracture pathologique nécessite de cartographier les localisations des métastases osseuses et d'évaluer pour chacune la douleur, le risque fracturaire et le risque neurologique.

L'évaluation du risque fracturaire passe par la réalisation de radiographies et d'images scannographiques centrées. Les scores de Mirels pour les os longs et de SINS pour le rachis ont une faible sensibilité et spécificité pour les scores intermédiaires qui sont pourtant les plus fréquents. Ceci pousse le développement de nouveaux outils pour évaluer de façon personnalisée la résistance mécanique d'un os métastatique. Les techniques les plus avancées utilisent la simulation numérique par modèles éléments finis, à partir des images scannographiques de l'os. Dans tous les cas, l'évaluation du risque fracturaire et sa prise en charge préventive intégrera le statut oncologique, la réponse attendue au traitement oncologique, l'état général du patient et son souhait. La prise en charge associe les anti-résorbeurs osseux, le traitement local et le traitement oncologique.

nécessaires pour permettre le déploiement en routine. Développer les RCP-OOS et les consultations d'oncologie osseuse constituent un levier essentiel pour optimiser la prise des patients métastatiques osseux.

Déclaration de liens d'intérêts : C.C. est lauréat du Fonds Amgen France pour la Science et l'Humain (2022) et de MSD AVENIR (projet MEKANOS). C.C. participe à des conférences et des comités d'expertise pour UCB, Amgen, Fresenius et Sandoz.
H.F. et D.M. déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

Remerciements : les auteurs remercient l'ensemble des investigateurs de l'étude MEKANOS, le centre de recherche clinique de la prévention des maladies osseuses (PMO) (N. Paquin, M. Proriot, N. Trehet-Mendel, C. Planckaert), l'Institut de cancérologie des hospices civils de Lyon (S. Calatini, M. Roche, A. Stuani, J. Bérardet), la radiologie (S. Gouttard, N. Stacoffe, M. Tardy), la RCP-OOS (E. Massy, A. Fontana), les chercheurs impliqués (M. Gardegaront, A. Levillain, T. Grenier, E. Saillard, J.P. Roux, F. Bermond) et les supports financiers MSD Avenir, LabEX PRIMES, Inserm Transfert, l'université Claude-Bernard Lyon 1 (ED MEGA) et l'université Gustave-Eiffel.

Références

- [1] Marchal C, Belhassen M, Désaméricq G, Lehmann E, Walter M, Bosco-Levy P, et al. Epidemiology of bone metastasis in France between 2009 and 2018. *JBMR Plus* 2025;9 [zif081].
- [2] Delea TE, McKiernan J, Brandman J, Edelsberg J, Sung J, Raut M, et al. Impact of skeletal complications on total medical care costs among patients with bone metastases of lung cancer. *J Thorac Oncol* 2006;1:571-6.
- [3] Yong M, Jensen AØ, Jacobsen JB, Nørgaard M, Fryzek JP, Sørensen HT. Survival in breast cancer patients with bone metastases and skeletal-related events: a population-based cohort study in Denmark (1999-2007). *Breast Cancer Res Treat* 2011;129:495-503.
- [4] Siris ES, Chen YT, Abbott TA, Barrett-Connor E, Miller PD, Wehren LE, et al. Bone mineral density thresholds for pharmacological intervention to prevent fractures. *Arch Intern Med* 2004;164:1108-12.
- [5] Seeman E, Delmas PD. Bone quality – the material and structural basis of bone strength and fragility. *N Engl J Med* 2006;354:2250-61.
- [6] Bailey S, Hackney D, Vashishth D, Alkalay RN. The effects of metastatic lesion on the structural determinants of bone: current clinical and experimental approaches. *Bone* 2020;138:115159.
- [7] Bailey S, Stadelmann MA, Zysset PK, Vashishth D, Alkalay RN. Influence of metastatic bone lesion type and tumor origin on human vertebral bone architecture, matrix quality, and mechanical properties. *J Bone Miner Res* 2022;37:896-907.
- [8] Garfield D. Increasing osteoblastic lesions as a manifestation of a major response to gefitinib. *J Thorac Oncol* 2006;1:859-60.
- [9] Confavreux C, Barrey C, Belliere A, Brevet M, Decroisette C, Massardier E, et al. [Guidelines on bone metastases in lung cancer: 2025 Update] [Internet]. ARISTOT; 2025p. 1-72, Disponible sur : <http://referentiels-aristot.com/>.
- [10] Confavreux CB, Follet H, Mitton D, Pialat JB, Clézardin P. Fracture risk evaluation of bone metastases: a burning issue. *Cancers* 2021;13:5711.
- [11] Mirels H. Metastatic disease in long bones. A proposed scoring system for diagnosing impending pathologic fractures. *Clin Orthop* 1989;249:256-64.
- [12] Damron TA, Nazarian A, Entezari V, Brown C, Grant W, Calderon N, et al. CT-based structural rigidity analysis is more accurate than Mirels scoring for fracture prediction in metastatic femoral lesions. *Clin Orthop* 2016;474:643-51.
- [13] Tokuhashi Y, Matsuzaki H, Oda H, Oshima M, Ryu J. A revised scoring system for preoperative evaluation of metastatic spine tumor prognosis. *Spine* 2005;30:2186-91.
- [14] Fisher CG, DiPaola CP, Ryken TC, Bilsky MH, Shaffrey CJ, Berven SH, et al. A novel classification system for spinal instability in neoplastic disease: an evidence-based approach and expert consensus from the Spine Oncology Study Group. *Spine* 2010;35:E1221-29.
- [15] Duchemin L, Mitton D, Jolivet E, Bousson V, Laredo JD, Skalli W. An anatomical subject-specific FE-model for hip fracture load prediction. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 2008;11:105-11.
- [16] Revel M, Gardegaront M, Bermond F, Mitton D, Follet H. A credible homogenized finite element model to predict radius fracture in the case of a forward fall. *J Mech Behav Biomed Mater* 2022;131:105206.
- [17] Vilayphiou N, Boutroy S, Szulc P, van Rietbergen B, Munoz F, Delmas PD, et al. Finite element analysis performed on radius and tibia HR-pQCT images and fragility fractures at all sites in men. *J Bone Miner Res* 2011;26:965-73.
- [18] Vilayphiou N, Boutroy S, Sornay-Rendu E, Van Rietbergen B, Munoz F, Delmas PD, et al. Finite element analysis performed on radius and tibia HR-pQCT images and fragility fractures at all sites in postmenopausal women. *Bone* 2010;46:1030-7.
- [19] Viceconti M, Qasim M, Bhattacharya P, Li X. Are CT-based finite element model predictions of femoral bone strength clinically useful? *Curr Osteoporos Rep* 2018;16:216-23.
- [20] Fleps I, Pálsson H, Baker A, Enns-Bray W, Bahaloo H, Danner M, et al. Finite element derived femoral strength is a better predictor of hip fracture risk than aBMD in the AGES Reykjavik study cohort. *Bone* 2022;154:116219.
- [21] Tanck E, van Aken JB, van der Linden YM, Schreuder HWB, Binkowski M, Huizenga H, et al. Pathological fracture prediction in patients with metastatic lesions can be improved with quantitative computed tomography based computer models. *Bone* 2009;45:777-83.
- [22] Sas A, Tanck E, Sermon A, van Lenthe GH. Finite element models for fracture prevention in patients with metastatic bone disease. A literature review. *Bone Rep* 2020;12:100286.
- [23] Derikx LC, van Aken JB, Janssen D, Snyers A, van der Linden YM, Verdonchot N, et al. The assessment of the risk of fracture in femora with metastatic lesions: comparing case-specific finite element analyses with predictions by clinical experts. *J Bone Joint Surg Br* 2012;94:1135-42.
- [24] Eggermont F, van der Wal G, Westhoff P, Laar A, de Jong M, Rozema T, et al. Patient-specific finite element computer models improve fracture risk assessments in cancer patients with femoral bone metastases compared to clinical guidelines. *Bone* 2020;130:115101.
- [25] Eggermont F, Mathijssen E, Bakker M, Tanck E. Using a statistical shape model to estimate the knee landmarks for aligning femurs for femoral finite element models. *Comput Methods Programs Biomed* 2024;255:108324.
- [26] Sternheim A, Giladi O, Gortzak Y, Drexler M, Salai M, Trabelsi N, et al. Pathological fracture risk assessment in patients with femoral metastases using CT-based finite element methods. A retrospective clinical study. *Bone* 2018;110:215-20.
- [27] Lin JK, Hearn CM, Getzen E, Long Q, Lee DC, Keaveny TM, et al. Validation of biomechanical computed tomography for fracture risk classification in metastatic hormone-sensitive prostate cancer. *Eur Urol Oncol* 2024;7:794-803.

- [28] Gardegaront M, Sas A, Brizard D, Levillain A, Bermond F, Confavreux CB, et al. Inter-laboratory reproduction and sensitivity study of a finite element model to quantify human femur failure load: case of metastases. *J Mech Behav Biomed Mater* 2024;158:106676.
- [29] Saillard E, Gardegaront M, Levillain A, Bermond F, Mitton D, Pialat JB, et al. Finite element models with automatic computed tomography bone segmentation for failure load computation. *Sci Rep* 2024;14:16576.
- [30] Krüger S, Buck AK, Mottaghy FM, Hasenkamp E, Pauls S, Schumann C, et al. Detection of bone metastases in patients with lung cancer: ^{99m}Tc-MDP planar bone scintigraphy, ¹⁸F-fluoride PET or ¹⁸F-FDG PET/CT. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2009;36:1807-12.
- [31] Coleman R, Hadji P, Body JJ, Santini D, Chow E, Terpos E, et al. Bone health in cancer: ESMO clinical practice guidelines. *Ann Oncol* 2020;31:1650-63.
- [32] Confavreux C, Bouvard B, Girard N, Bosco-Levy P, Marchal C, Walters M, et al. Real life use of bone-targeting agents for bone metastases in France: the OPTIMOS Study. In: *Journal of Bone and Mineral research* [Internet]. Oxford, England: Oxford University Press; 2023 [cité 21 août 2025]. p. 111-111. Disponible sur : <https://scholar.google.com/scholar?cluster=14175810303160372877&hl=en&oi=scholar>.