
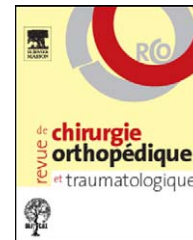




Disponible en ligne sur
 ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France
 EM|consulte
www.em-consulte.com



MISE AU POINT

Prédiction précoce de survenue d'une nécrose de la tête fémorale après fracture du col ☆

Early prediction of femoral head avascular necrosis following neck fracture

M. Ehlinger^{a,*}, T. Moser^c, P. Adam^a, G. Bierry^d, A. Gangi^{b,d},
M. de Mathelin^b, F. Bonomet^a

^a Service de chirurgie orthopédique et de traumatologie, CHU Hautepierre, hôpitaux universitaires de Strasbourg, 1, avenue Molière, 67098 Strasbourg cedex, France

^b LSIIT UMR 7005, ENSPS, université de Strasbourg, boulevard Sébastien-Brant, BP 10413, 67412 Illkirch cedex, France

^c Département de radiologie, centre hospitalier de l'université de Montréal, 1560 Sherbrooke Est, Montréal (Québec) H2L4M1, Canada

^d Département de radiologie, hôpital civil, hôpitaux universitaires de Strasbourg, 1, place de l'Hôpital, 67091 Strasbourg cedex, France

Acceptation définitive le : 5 juillet 2010

MOTS CLÉS

Ostéonécrose
avasculaire ;
Fracture du col
fémoral ;
Traumatologie ;
Techniques
d'imagerie ;
Nécrose
post-traumatique de
la tête fémorale

Résumé La fracture du col fémoral engage le pronostic fonctionnel du patient jeune et le pronostic vital du patient âgé. Le but du travail était de présenter les méthodes d'évaluation de la vascularisation céphalique après fracture du col afin de répondre aux questions suivantes : quel est le risque d'ostéonécrose ? Quel est le traitement adapté compte tenu de ce risque pour éviter une chirurgie itérative ? La vascularisation céphalique est sous la dépendance des vaisseaux rétinaculaires, notamment l'artère épiphysaire latérale qui irrigue 70 à 80 % de la tête fémorale. La fracture est source de lésions vasculaires qui constituent la principale cause de la nécrose. D'autres facteurs s'ajoutent : effet tamponnade lié à l'hématome, diminution de l'espace articulaire et augmentation des pressions par la position en extension – rotation interne – abduction lors de la chirurgie. Ce n'est pas la mort cellulaire qui est responsable des déformations céphaliques mais le processus de réparation partant de l'os vivant. Dans la nécrose post-traumatique, la prolifération envahit rapidement la tête et l'ostéogénèse y est importante. C'est à la limite entre cet os nouveau et l'os mort que se produit une fracture pathologique. De nombreuses techniques ont été décrites pour évaluer l'hémodynamique résiduelle et estimer le

DOI de l'article original : [10.1016/j.otsr.2010.06.014](https://doi.org/10.1016/j.otsr.2010.06.014).

☆ Ne pas utiliser, pour citation, la référence française de cet article, mais celle de l'article original paru dans *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, en utilisant le DOI ci-dessus.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : matthieu.ehlinger@chru-strasbourg.fr (M. Ehlinger).

risque nécrotique. Certaines sont invasives : angiographie supra-sélective, mesure de la pression intra-osseuse en oxygène, mesure hémodynamique par doppler-laser. D'autres relèvent de l'imagerie : scintigraphie, IRM classique ou dynamique. L'avenir semble être l'IRM dynamique qui permettrait une évaluation non invasive de la vascularisation céphalique à la base d'une nouvelle classification des fractures cervicales.

© 2010 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Introduction

La fracture du col fémoral est une lésion grave, mettant en jeu le pronostic vital du patient âgé et le pronostic fonctionnel du patient jeune. Il s'agit d'une pathologie fréquente dont l'incidence annuelle est de l'ordre de un sur mille habitants [1]. Le retentissement vasculaire de la fracture est triple : le déplacement qui interrompt les vaisseaux rétinaculaires [2], la rotation ou le valgus qui interrompt la vascularisation du ligament rond [3] et l'augmentation de la pression intracapsulaire qui agit par effet tamponnade [4]. Le risque anatomique essentiel est l'ostéonécrose post-traumatique estimée à 10 à 30% [5,6]. Chez la personne âgée, le pronostic vital est engagé avec une mortalité rapportée dans l'année qui suit la fracture de 20–30% [1], le but du traitement est alors l'autonomisation rapide du patient. Compte tenu du risque de nécrose céphalique et de la mauvaise tenue du matériel d'ostéosynthèse dans un os ostéoporotique, le traitement conservateur est difficile pour les fractures déplacées (Garden III–IV), alors que pour les fractures dites peu déplacées et stables (Garden I–II) il peut être tenté mais en ayant conscience que le risque de nécrose existe. Chez le sujet jeune, le traitement doit être conservateur, mais le pronostic fonctionnel est essentiellement lié à la survenue d'une nécrose. Pour limiter au maximum ce risque, l'ostéosynthèse doit être la plus précoce possible, la réduction anatomique et le montage stable [1].

Le but de notre travail était de faire le point sur les possibilités d'évaluation précoce (dans les premières heures suivant la fracture) de la perfusion céphalique résiduelle après fracture cervicale afin d'estimer le risque nécrotique. Nous ne souhaitons pas faire la description technique de ces examens, et notre objectif sous-tendu était d'optimiser la prise en charge thérapeutique évitant des interventions itératives, en répondant aux questions que se pose le traumatologue face à une fracture cervicale récente : le risque d'ostéonécrose est-il important ? Quel est le traitement le plus adapté compte tenu de ce risque ?

Vascularisation normale de la tête fémorale

De nombreux travaux ont étudié la vascularisation céphalique et ont évalué la répercussion de ces lésions sur la vitalité céphalique [7–11]. La suppléance vasculaire de la tête fémorale est vulnérable lors d'une fracture puisque l'épiphyse et la majeure partie du col fémoral sont intracapsulaires. Les travaux de Trueta et Harrison [7] font référence en complétant les études de Howe et al. [8] et de Judet et al. [9]. Sur la base d'une étude anatomique de 15 pièces injectées, Trueta et Harrison [7] ont défini les éléments

vasculaires essentiels de la tête fémorale : les vaisseaux rétinaculaires issus de l'artère circonflexe médiale. Ils ont également précisé que les vaisseaux intra-osseux cervicaux avaient un faible rôle et que les vaisseaux nés avant le col fémoral nourrissaient au mieux le quart latéral. Ces observations ont été confirmées par Sevitt et Thompson [10]. L'artère circonflexe latérale donne peu de vaisseaux rétinaculaires antérieurs et sa lésion, iatrogène ou traumatique, a peu de répercussion. Les artères extra-osseuses principales sont les artères rétinaculaires issues de l'artère circonflexe médiale, elle-même branche le plus souvent de l'artère fémorale profonde [11]. L'artère circonflexe médiale est extra-capsulaire et ses branches pénètrent la capsule devenant alors les vaisseaux rétinaculaires inférieurs, postérieurs et supérieurs (Fig. 1 et 2).

Vaisseaux rétinaculaires

Les artères rétinaculaires passent médialement par rapport à la tête fémorale (Fig. 3). Les vaisseaux principaux sont les vaisseaux rétinaculaires supérieurs et inférieurs. Les vaisseaux antérieurs et postérieurs ont une importance moindre. L'ensemble de ces artères forme le cercle artériel de Hunter [12].

Les vaisseaux rétinaculaires supérieurs [7] sont au nombre de 4 à 6. Ils présentent les diamètres les plus larges avec 0,8 mm en moyenne. Ils pénètrent la tête à la partie supéromédiale et terminale du col, à la jonction cervicocéphalique, donnant des branches cervicales,

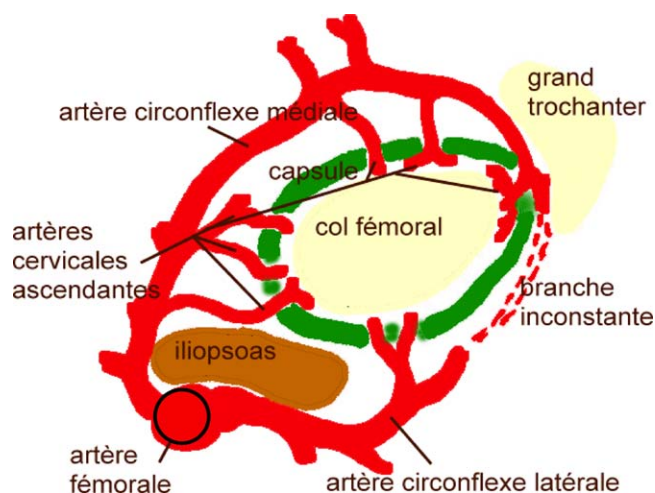


Figure 1 Schéma de la vascularisation de l'extrémité supérieure du fémur. Coupe horizontale passant par le col fémoral et le grand trochanter, côté gauche.

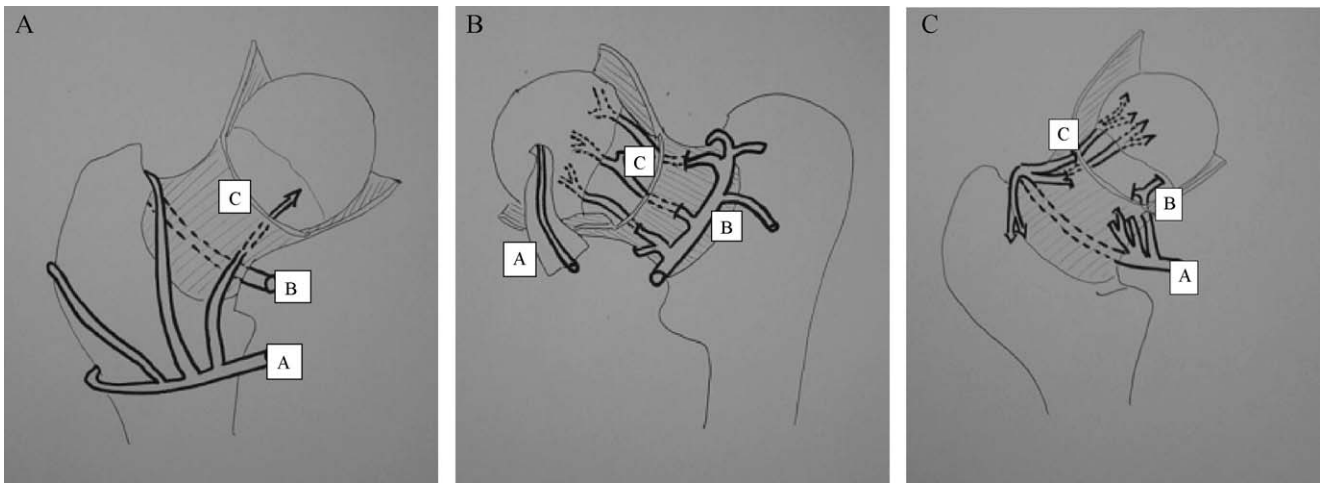


Figure 2 Vascularisation de l'extrémité supérieure du fémur. Côté droit. A. Vue antérieure : A : artère circonflexe latérale ; B : artère circonflexe médiale ; C : rameau nourricier antérieur. B. Vue postérieure. A : artère circonflexe médiale ; B : artère du ligament rond ; C : artères rétinaculaires. C. Vue antérieure par transparence de l'artère circonflexe médiale. A : artère circonflexe médiale ; B : artères rétinaculaires inférieures ; C : artères rétinaculaires supérieures.

l'artère métaphysaire supérieure et l'artère épiphysaire latérale. Celle-ci est l'artère principale nourrissant près de 70 à 80% de la tête fémorale [7,10]. Elle chemine le long de l'ancienne plaque de croissance, s'anastomose avec les vaisseaux du ligament rond et est située à proximité de la zone de réflexion rétinaculaire du col fémoral. Lorsque ces vaisseaux sont intacts l'ensemble de la tête fémorale cadavérique est injecté ainsi que la fovéa par le jeu des anastomoses. Les vaisseaux rétinaculaires inférieurs sont plus petits, moins importants au nombre de 1 ou 2 [7]. Ils donnent des branches cervicales qui pénètrent le cortex à proximité de la tête au niveau de sa partie antérieure et se terminent

par une branche métaphysaire inférieure pour le quadrant céphalique inférieur. Ils nourrissent la partie métaphysaire distale dans deux tiers des cas. Sevitt et Thompson [10] concluent que ces vaisseaux présentent peu d'intérêt pour la survie céphalique, et ce, malgré le réseau anastomotique qui les relie aux vaisseaux rétinaculaires supérieurs.

Artère du ligament rond

L'artère du ligament rond est issue de l'artère obturatrice. Elle s'anastomose avec les vaisseaux circonflexes, ce qui permet son injection par l'intermédiaire de l'artère fémorale commune. Elle traverse de façon inconstante la tête, mais lorsqu'elle passe la fovéa, elle s'anastomose avec les branches terminales de l'artère épiphysaire latérale [7]. Le rôle de cette anastomose semble controversé dans la littérature. Pour Sevitt et Thompson [10] les vaisseaux du ligament rond ne sont pas essentiels à la survie de la tête, car après section du col seule une petite partie de la fovéa est injectée sur deux tiers des pièces anatomiques, permettant la suppléance d'une très faible zone céphalique. Pour d'autres auteurs comme Catto [13], Chandler et Kreuzer [14] et Crock [15] le système anastomotique entre l'artère du ligament rond et l'artère épiphysaire latérale est fondamental jouant un rôle essentiel dans la revascularisation céphalique après fracture cervicale.

Physiopathologie et histoire naturelle de la nécrose post-traumatique

Le pronostic fonctionnel d'une fracture du col fémoral traitée par ostéosynthèse est essentiellement lié à la survenue d'une nécrose céphalique. La fracture cervicale est à l'origine de lésions vasculaires dont les conséquences dévastatrices ont été démontrées par plusieurs études [2,16,17]. Sevitt [18] sur une série de 25 pièces anatomiques après fracture du col observait 84% de têtes dévascularisées. Il est établi que l'ampleur du déplacement de la fracture

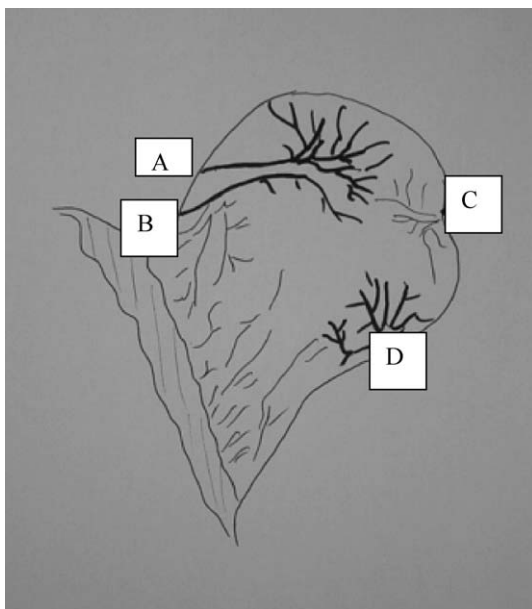


Figure 3 Schéma de la microcirculation céphalique d'après Trueta et Harrison [7]. A. Artère épiphysaire latérale. B. Artère épiphysaire médiale. C. Artère métaphysaire supérieure. D. Artère métaphysaire inférieure.

conditionne la survenue des lésions vasculaires, cependant il faut souligner que des fractures peu déplacées peuvent également être à l'origine de souffrance ischémique. En effet, des études dynamiques du flux sanguin [2,4,19,20] ont mis en évidence une perturbation importante de la vascularisation avec diminution du flux sanguin dans les suites de fractures peu déplacées pouvant concerner jusqu'à 60% des cas [2].

Au moment du traumatisme, les vaisseaux synoviaux et rétinaculaires sont avulsés ou rompus et les vaisseaux intra-osseux sont interrompus par la ligne de fracture. L'atteinte des vaisseaux rétinaculaires situés en amont de la fracture est proportionnelle au déplacement fracturaire et à la comminution postérieure, facteur de gravité tant sur le plan thérapeutique que par la difficulté de fixation et de réduction que sur le plan vasculaire. L'artère épiphysaire latérale (intra-osseuse) et les vaisseaux rétinaculaires postérieurs (extra-osseux) sont interrompus lorsque la ligne de fracture s'étend sur la périphérie de la tête. La lésion des artères rétinaculaires notamment de l'artère épiphysaire latérale est à l'origine d'une nécrose de façon quasi certaine et constitue l'élément fondamental de l'effondrement céphalique ultérieur [18]. Les lésions veineuses (rupture et thrombose) participent également au processus nécrotique. La rupture des vaisseaux rétinaculaires supérieurs met la tête fémorale sous la dépendance des vaisseaux du ligament rond et rétinaculaires inférieurs [10]. Cependant le déplacement peut être si important que ces derniers peuvent également être lésés. Seuls les vaisseaux du ligament rond persistent et peuvent alors prétendre revasculariser la tête fémorale [13]. Sevitt [18] s'oppose à cette notion en considérant que l'artère du ligament rond est insuffisante pour permettre une revascularisation complète.

Aux lésions vasculaires directes s'ajoutent d'autres facteurs péjoratifs. Dans le cadre d'une lésion peu déplacée l'intégrité capsulaire a pour effet de concentrer l'hématome avec augmentation de la pression et créer un effet tamponnade [4]. Cette augmentation de la pression intracapsulaire agit de différentes manières. La première conséquence est l'apparition d'une thrombose des veinules et des artérioles [4,21], puis apparaît la diminution du flux sanguin entraînant une nécrose cellulaire par ischémie [19,20]. Les valeurs de pressions intra-articulaires considérées comme normales sont de l'ordre de 0 à 20 [22] et de 40 à 80 mmHg pour les pressions artériolaires [4]. Cette pression basale artériolaire, à l'instar des capillaires musculaires face au syndrome des loges de jambe, explique la tolérance tissulaire jusqu'à une pression intra-articulaire de 80 mmHg [23]. Holmberg et Dalen [4] ont montré qu'il existait une augmentation de la pression intra-articulaire souvent supérieure à 80 mmHg dans les cas de fractures non déplacées. Sur une étude de neuf fractures cervicales non déplacées, tous les patients présentant une pression supérieure à 80 mmHg avaient une scintigraphie perturbée [4]. La position de la hanche modifie également la pression intra-articulaire. En effet, l'association extension, rotation interne et abduction diminue le volume articulaire et augmente la pression intracapsulaire [4,22]. La flexion de hanche a un effet inverse entraînant une diminution de pression par le biais d'un volume capsulaire plus important. Une capsulotomie antérieure de décharge pourrait diminuer le risque de nécrose en cas d'augmentation de la pression au-delà de la pression

artériolaire [23,24]. Il est important de rappeler que lors de la réduction d'une fracture cervicale, une rotation interne exagérée et/ou une traction trop forte peuvent entraîner une aggravation des lésions vasculaires par augmentation de la pression intracapsulaire. Les risques au moment de l'intervention ne sont donc pas négligeables, tant au niveau de l'installation qu'au niveau de la fixation avec le risque d'une rotation du fragment céphalique. Une prise en charge thérapeutique adaptée et spécifique doit être réalisée [1]. Le délai opératoire est certes un élément essentiel en agissant sur le temps d'ischémie céphalique [1], mais la qualité de la réduction est fondamentale. Il est clairement établi dans la littérature que la réduction anatomique diminue les risques de nécrose [25–27]. C'est la qualité de la restitution de la vascularisation qui est l'élément primordial ce d'autant plus qu'il existe certaines fractures déplacées présentant une intégrité des vaisseaux rétinaculaires [28]. C'est la possibilité d'une reperfusion vasculaire après réduction qui doit motiver une réduction rapide et parfaite [29].

Biologie de l'ostéonécrose post-traumatique de la tête fémorale

Dans la nécrose post-traumatique, la prolifération cellulaire envahit rapidement la tête fémorale et l'ostéogénèse y est importante. C'est à l'interface entre la formation d'os nouveau et la zone d'os nécrotique que survient « la fracture pathologique » responsable de l'effondrement céphalique. Ce n'est pas la mort cellulaire qui cause la déformation céphalique observée mais le processus de réparation. Les travaux de Glimcher et Kenzora [30–33] font référence en prouvant le caractère secondaire de ces déformations céphaliques et leur origine vasculaire. La réparation de l'os nécrosé se fait en deux étapes :

- prolifération cellulaire et envahissement céphalique par le tissu de réparation ;
- différenciation des cellules mésenchymateuses en ostéoblastes qui forment le tissu osseux à la surface des travées mortes.

Dans les nécroses post-traumatiques, le tissu de réparation dès qu'il a franchi la ligne de fracture sous-capitale s'étend en formant de l'os nouveau. L'arrêt de la différenciation ostéoblastique et de l'ostéogénèse est lié à des micro-fractures intracapitales bloquant le processus en entraînant une différenciation mésenchymateuse vers des fibroblastes qui forment une couche de tissu fibreux comparable à celui d'une pseudarthrose. Le développement de ce tissu fibreux et la mobilité des fragments aboutissent à une résorption des travées osseuses nécrosées. La mort cellulaire n'est donc pas la cause directe des altérations ou du bouleversement de la tête fémorale, mais plutôt l'action des cellules vivantes à l'origine du processus de réparation en provoquant un changement de propriétés mécaniques aboutissant à l'effondrement de la tête. Le point de départ de l'affaiblissement est la zone de moindre résistance créée sur le versant latéral de la tête par la résorption de l'os sous-chondral secondaire au processus de réparation. Cet affaiblissement se déplace vers le centre à la limite entre

l'os spongieux nécrosé et l'os vivant réhabité en raison des différences de consistance et d'élasticité entre les deux tissus. Cette théorie de la nécrose en deux étapes a été confirmée par Steib et al. [34]. Sur la base de l'évaluation vasculaire intra-osseuse de hanches nécrosées par des microsphères radioactives, Steib et al. [34] confirment qu'il n'existe pas de corrélation entre l'anatomie macroscopique artérielle et l'anatomie vasculaire fonctionnelle. Ils soulignent l'importance des communications intra-osseuses et le caractère fondamental de l'artère épiphysaire latérale [34].

Méthodes d'évaluation de la perfusion résiduelle céphalique

De nombreuses méthodes d'évaluation précoce de la perfusion résiduelle céphalique après fracture cervicale ont été décrites dont le but est d'identifier les sujets à risque d'ostéonécrose. Certaines sont invasives (angiographie supra-sélective, mesure des pressions intra-osseuses en oxygène, mesure hémodynamique par doppler-laser) d'autres relèvent plutôt de l'imagerie (scintigraphie, IRM classique ou dynamique).

Artériographie supra-sélective

L'artériographie supra-sélective (ASS) analyse les structures artérielles extra-osseuses et a été utilisée la première fois en 1977 par Théron [35] pour évaluer la vascularisation céphalique. Cet auteur a démontré que la vascularisation céphalique ne pouvait être analysée que par le cathétérisme de l'artère circonflexe médiale permettant d'opacifier les vaisseaux capsulaires supérieurs [35]. Ces vaisseaux sont encore mieux visualisés au moyen d'une technique d'artériographie avec soustraction digitale (DSA). En utilisant la DSA, Heuck et al. [36] ont mis en évidence des altérations vasculaires dans près de 97% des cas de nécroses post-traumatiques avérées prouvant ainsi que les lésions vasculaires constituent l'élément étiologique principal. Langer et al. [37] ont effectué une DSA chez neuf patients présentant une fracture cervicale fraîche et ont observé huit interruptions ou thromboses complètes des branches nourricières supérieures issues de l'artère circonflexe médiale. Ils précisent que toutes causes confondues de nécrose, une atteinte des branches supérieures de l'artère circonflexe médiale est présente dans 66% des cas. Ils concluent à l'intérêt de cette méthode pour évaluer le risque nécrotique et le suivi des ostéonécroses traitées par greffon vascularisé. L'angiographie présente un intérêt certain pour objectiver directement les lésions vasculaires à l'origine de l'ostéonécrose mais comporte plusieurs inconvénients comme le caractère invasif avec risque potentiel de complications (dissection artérielle et thrombose, hématome) et surtout l'expertise nécessaire à la réalisation de cet examen spécialisé. L'angiographie montre des lésions au moment de la fracture, des lésions devant une nécrose avérée, mais aucun travail ne montre de corrélation entre le type de lésions et l'apparition ultérieure d'une ostéonécrose.

Mesure de la pression intra-osseuse en oxygène

Récemment Watanabe et al. [38] ont proposé de mesurer la pression intra-osseuse en oxygène des têtes fémorales après fracture au moyen d'une électrode polarographique sous-chondrale implantée chirurgicalement. L'hypothèse était que l'ischémie sous-chondrale participait au développement de la nécrose avasculaire et le but était d'estimer le risque de survenue de cette nécrose avasculaire. La mesure a été peropératoire avec implantation directe de l'électrode dans la tête fémorale chez 17 patients pour 18 fractures et une mesure effectuée en deux points de la tête. Le suivi a été réalisé par IRM. Une corrélation a été mise en évidence entre la survenue d'une nécrose (sept cas) et les valeurs de pression en oxygène des deux points. Une différence statistiquement significative entre ces deux points était considérée comme une situation à risque de nécrose alors que l'obtention de valeurs comparables confirmait la viabilité de la tête. Les résultats atteignaient le seuil de significativité lorsque la différence de pression en oxygène entre les deux points céphaliques était de 3 mmHg. Cette technique a un intérêt tout particulier face à une fracture non déplacée qui présente théoriquement moins de risque de nécrose. Cette étude était basée sur celle de Kiaer et al. [39] qui avaient montré que la pression en oxygène de l'os sous-chondral dans les hanches malades (arthrose ou une nécrose avérée) était plus faible. Ils ont mis en évidence une corrélation entre la pression intra-osseuse qui était augmentée dans les cas de nécrose de hanche et la pression en oxygène qui était diminuée dans la même pathologie. Pour mémoire une pression intra-osseuse est considérée comme normale lorsqu'elle est égale à 24 mmHg au niveau de la tête fémorale [40] et une pression en oxygène est considérée comme normale lorsqu'elle est supérieure à 60 mmHg [39]. Il s'agit d'une méthode élégante permettant d'évaluer la souffrance tissulaire, mais invasive et de réalisation délicate en pratique courante.

Mesure hémodynamique par doppler-laser

Swiontkowski et al. [41] étaient les premiers à utiliser cette technique dans le bilan d'une ostéonécrose avérée en comparant les zones nécrosées à une zone de référence considérée comme saine à savoir la région trochantérienne. C'est à travers un trocart implanté dans la tête fémorale que le débit sanguin était mesuré à l'aide d'un doppler-laser. La mesure était réalisée dans la région trochantérienne, le col, à la périphérie du segment céphalique effondré et en région sous-chondrale. Ils ont mis en évidence une diminution du débit sanguin dans les zones nécrosées. Récemment Sugamoto et al. [42] ont utilisé cette méthode dans des cas de fractures cervicales récentes. Ils ont corrélé les résultats au déplacement de la fracture selon Garden. Le flux était élevé et sinusoïdal dans les Garden I, II et certaines Garden III, alors qu'il est faible et non sinusoïdal dans certaines Garden III et dans toutes les Garden IV. Les valeurs des mesures étaient inférieures à dix unités de perfusion et les vagues n'étaient pas synchronisées aux battements du cœur. Les auteurs soulignent qu'une atteinte sévère vasculaire n'existe pas lorsqu'il y a une synchronisation avec le rythme cardiaque

et des valeurs supérieures à 30 unités de perfusion. Ils ont pris comme élément de référence la mesure du flux sanguin céphalique après fracture per-trochantérienne, fractures qui sont théoriquement indemnes de toutes complications nécrotiques. Dans ces derniers cas, les courbes étaient considérées comme normales avec un rythme sinusoïdal et des valeurs élevées. Cette technique rappelle l'analyse macroscopique de l'angiographie, mais analyse plus finement la tête fémorale à l'instar des mesures de pression d'oxygène. Elle reste cependant délicate compte tenu du prix de l'instrumentation et de son caractère invasif.

Scintigraphie osseuse

Les résultats obtenus sur l'état hémodynamique sont qualitatifs plutôt que quantitatifs. La scintigraphie apporte une information hémodynamique en phase vasculaire et une information métabolique en phase osseuse plus précocement que la radiographie. Cette méthode est plus sensible et donne des résultats plus précoces que la tomodensitométrie (TDM) dans la mesure où elle analyse la perfusion vasculaire et la captation de la moelle osseuse grâce à des images acquises pendant et après l'injection du radiotraceur. Ces modifications vasculaires précèdent le processus nécrotique : une imagerie réalisée dans les 24 premières heures souligne une perturbation hémodynamique puisqu'il existe des anomalies histochimiques précoces.

L'utilisation d'un traceur radioactif pour le diagnostic d'une ostéonécrose fémorale a été introduite par Tucker [43] en 1950 puis reprise par Boyd et al. [44] en 1955. Ces auteurs utilisaient alors le phosphore ^{32}P et mesuraient le ratio d'intensité trochanter-tête fémorale en per-opératoire avec un compteur Geiger. Le premier rapport d'une scintigraphie réalisée dans le cadre d'un diagnostic de nécrose céphalique a été publié par Riggins et al. [45]. L'essor de la scintigraphie osseuse au technetium $^{99\text{m}}$ comme évaluation de la vascularisation résiduelle remonte à la fin des années 1970 avec notamment Webber et al. [46] et Meyers et al. [47]. Ce choix d'isotope se justifiait parce qu'il était spécifique des perturbations vasculaires tissulaires en général et de l'os en particuliers étant phagocyté par les réticulocytes de la moelle osseuse. Meyers et al. [47] rapportaient une étude prospective portant sur 95 fractures cervicales dont les deux tiers étaient déplacées. La précision de l'estimation du risque nécrotique était de l'ordre de 95% au recul de deux ans. Ils concluaient à la facilité d'accès et à la relative innocuité de cet examen et proposaient de réaliser une scintigraphie précoce dans les 24 premières heures après la fracture afin d'évaluer le risque nécrotique et d'orienter la décision thérapeutique. Philipps et al. [48] rapportaient des résultats identiques sur une série de 30 fractures récentes sur lesquelles une scintigraphie a été réalisée dans les 72 premières heures. D'Ambrosia et al. [49] ont utilisé le technetium $^{99\text{m}}$ disphosphonate pour le diagnostic d'une nécrose en insistant sur la sensibilité de cet examen qui mettait en évidence une zone d'hypofixation au stade précoce de la maladie et ce avant qu'apparaissent les signes sur les radiographies standard. Une étude prospective « dynamique » a été menée par Bauer et al. [50] cherchant à évaluer le devenir d'une fracture cervicale. Des scintigraphies au technetium $^{99\text{m}}$ -methylidiphosphonate ont été

réalisées en postopératoire immédiat, puis à quatre, huit et 12 mois. Ils ont observé une diminution de l'activité isotopique dans le temps en comparant le côté fracturé au côté sain. L'étude de Lucie et al. [51] portait sur l'analyse de 92 fractures récentes par une scintigraphie au technetium $^{99\text{m}}$ phosphate. La précision des résultats était de 91% dans le groupe « scintigraphie normale » et de 82% dans le groupe « scintigraphie pathologique ». Greiff et al. [52,53] ont rapporté des résultats similaires en utilisant le même isotope à la fois dans l'évaluation précoce de la vitalité de la tête fémorale après fracture mais également dans le diagnostic d'une nécrose avérée. Enfin Turner [54] a réalisé une étude expérimentale et clinique en pratiquant des scintigraphies au technetium $^{99\text{m}}$ antimoine colloïde dans les 24 premières heures après une fracture cervicale chez 30 patients. Celle-ci était normale 16 fois et pathologique 14 fois. Parmi les 14 cas pathologiques 13 ont développé une nécrose dans les deux ans, la précision était de 87%.

Il est établi qu'une scintigraphie est positive avant la manifestation des signes radiologiques et ce avec une « avance » de près de 14 mois [52]. Au terme de cette revue de la littérature, la scintigraphie semble être un examen fiable dans sa dernière version. L'évaluation de l'état hémodynamique résiduel de la tête fémorale dans les suites d'une fracture cervicale fraîche présente une précision de l'ordre de 85 à 90%. Elle est plus facile d'accès et présente un moindre coût, hormis les risques iatrogènes inhérents à l'utilisation d'isotopes même s'ils restent exceptionnels. Cependant elle ne permet pas l'analyse morphologique de l'extrémité supérieure du fémur et nécessite une expertise importante dans l'analyse des résultats. L'IRM semble être plus prometteuse.

Imagerie par résonance magnétique (IRM)

L'IRM est l'examen de référence pour le diagnostic d'une ostéonécrose avasculaire de la tête fémorale. Lang et al. [55] rapportent 90–100% de sensibilité et 100% de spécificité. De nombreuses publications, dont les premières remontent aux années 1980, ont démontré ce potentiel chez des patients symptomatiques [56,57]. Des travaux plus récents ont souligné l'intérêt de l'IRM dans le diagnostic précoce d'une nécrose asymptomatique [58]. Basset et al. [59] ont montré que l'IRM permettait le diagnostic de nécrose plus précocement que la scintigraphie. Différents auteurs ont alors cherché à définir le délai minimal permettant la positivité de l'IRM face à une ostéonécrose. La littérature n'est pas unanime puisque les chiffres varient de quelques jours à plusieurs mois. Nakamura et al. [60] sur la base d'un modèle de fracture du col chez le chien ont mis en évidence un délai minimal de sept jours pour voir apparaître les premiers signes d'ostéonécrose chez certains animaux, mais un délai de quatre semaines pour que ces signes soient présents chez l'ensemble des 25 chiens. La survenue d'une ostéonécrose chez le chien est plus précoce que chez l'homme d'un facteur 3 à 5, si bien que les auteurs concluent que le délai minimal de détection d'une ostéonécrose en IRM est de l'ordre de quatre semaines. Plusieurs études ont été réalisées chez l'homme. Sur une série de 15 fractures cervicales, Speer et al. [61] rapportent un délai minimum de 48 heures avant de percevoir des signes

d'ostéonécrose à l'IRM. À partir d'une série de 20 hanches fracturées analysées radiologiquement et histologiquement, Asnis et al. [62] concluaient que l'IRM permettait une détection de l'ostéonécrose au-delà de deux semaines. Enfin deux études ont porté sur le suivi de fractures traitées par ostéosynthèse, afin d'établir la période la plus propice au diagnostic d'ostéonécrose [63,64]. Kawasaki et al. [64] ont suivi 31 fractures sur une période de 12 mois avec réalisation d'une IRM à deux, six et 12 mois. Des signes d'ostéonécrose étaient apparus chez 39% des cas au sixième mois. Ainsi pour les auteurs, l'intervalle offrant la meilleure sensibilité, spécificité, et précision dans le diagnostic d'une ostéonécrose post-traumatique était le sixième mois [64]. Il s'agit là du diagnostic d'une nécrose présente. Toutes ces études sont basées sur des séquences d'IRM ne permettant pas d'évaluer l'hémodynamique céphalique et les répercussions cellulaires très précoces de l'ischémie. En effet, les variations du signal de la moelle osseuse dépendent principalement des cellules graisseuses qui peuvent survivre sans oxygène pendant deux à cinq jours durant lesquels le signal graisseux reste normal [61].

L'intérêt s'est alors porté sur l'IRM dynamique avec injection de produit de contraste. Les premiers travaux sur un modèle animal ont été publiés par Cova et al. [65] et Nadel et al. [66]. Lang et al. [67] ont présenté une série de 13 fractures récentes du col fémoral dont les résultats ont été corrélés à ceux d'une angiographie supra-sélective (sept cas) et à un suivi radio-clinique à 12 mois (six cas). Les auteurs concluent à l'intérêt de cette méthode avec toutefois comme limite le faible rehaussement physiologique de la moelle osseuse des sujets âgés. Dans la série de Kamano et al. [68], 29 patients ont bénéficié d'une IRM dynamique dans un délai inférieur à 24 heures après fracture du col. Les résultats ont été classés en trois types selon le degré de rehaussement céphalique : type 1 = aucun rehaussement, type 2 = rehaussement partiel, type 3 = rehaussement complet. Le suivi de ces fractures a été réalisé par IRM sur un délai moyen de 27 mois. Les auteurs rapportent 100% de nécroses dans les types 1 et près de 50% dans les types 2. A contrario aucune nécrose n'a été observée dans les types 3. D'après ces auteurs, cette technique est extrêmement fiable avec une prédiction parfaite dans les types 1 et 3 et surtout non invasive. Konishiike et al. [69] ont confirmé ces résultats sur la base d'une série de 22 fractures explorées en IRM dynamique dans les 48 premières heures. Ils proposent trois types de résultats en fonction de l'allure de la courbe de rehaussement du côté fracturé par rapport au côté sain : type A = courbe identique, type C = courbe plate du côté fracturé, type B = image intermédiaire du côté fracturé. Ils interprètent les courbes de types B comme un état hémodynamique intermédiaire ne justifiant pas une arthroplastie systématique. Ils ont aussi utilisé un groupe témoin de fractures per-trochantériennes pour lesquels les courbes étaient toutes de type A. La même équipe a ensuite rapporté une série de 36 fractures suivies sur une période minimale de deux ans [70]. Les fractures présentant une courbe initiale de type C ont bénéficié d'un suivi en IRM afin de déterminer la valeur de l'IRM dynamique initiale pour prédire le risque ultérieur d'ostéonécrose. La sensibilité était de 81% et la spécificité de 100%, soit une exactitude de 89%. Les auteurs concluent que cette nouvelle classification par imagerie IRM permet d'orienter

l'indication chirurgicale, ce qui est le cas dans leur pratique courante avec un traitement conservateur pour les patients présentant une courbe de type A ou B. Kubo et al. [71] ont obtenu des résultats identiques en utilisant un *color mapping* (rouge = perfusion normale et noire = absence de perfusion) des images dynamiques. Trois types ont été décrits : le type A est rouge, identique au côté sain, le type B est intermédiaire et le type C est noir avec absence totale de perfusion. L'implication de cette classification est immédiate sur le choix du traitement. Enfin récemment une équipe indienne a une nouvelle fois prouvé et confirmé l'intérêt de l'imagerie IRM dynamique [72].

Ces travaux d'IRM dynamique sont particulièrement intéressants démontrant que certaines fractures non déplacées présentent une perturbation de la vascularisation céphalique ou à l'inverse que le rehaussement peut être normal en dépit d'un déplacement important. Il s'agit véritablement d'une nouvelle classification que l'on peut qualifier de « fonctionnelle » basée sur l'évaluation précoce de la vascularisation résiduelle céphalique après une fracture cervicale, indépendamment du type anatomique de la fracture. Ces IRM ont été réalisées dans un délai post-fracturaire inférieur à 48 heures, ce qui par définition laisse supposer une perte de chance sur la revascularisation céphalique secondaire à une réduction et stabilisation précoce. En pratique ces examens IRM dynamiques évaluant l'état de la vascularisation résiduelle devraient être réalisés dans les dix premières heures, ce qui permettrait, outre l'évaluation du risque de nécrose, de donner un maximum de chance au patient. Le problème de la disponibilité des IRM est un autre débat et une limite majeure.

Évaluation de la revascularisation

La fracture a eu lieu, le bilan vasculaire a été réalisé et le traitement effectué. Une technique permet de suivre le processus de revascularisation et de cicatrisation, ce qui peut s'avérer tout aussi pertinent pour le suivi d'un patient. La phlébographie par ponction intra-céphalique directe a été proposée par Jenny et Vecsei [73] dans le suivi des fractures cervicales fixées. La remise en charge n'était autorisée qu'après consolidation, mais surtout qu'après confirmation de la restitution d'une vascularisation céphalique. Le postulat de base était que la revascularisation céphalique était favorisée par une réduction précoce de qualité, une synthèse stable en compression et une mise au repos de la hanche, ce qui est classiquement reconnu par la littérature [1]. Les auteurs considéraient la hanche comme normale avec restauration de la vascularisation lorsque le bilan phlébographique montrait une opacification des vaisseaux efférents et une vidange vasculaire complète.

Stratégie actuelle et future

La littérature a montré que la vascularisation céphalique était perturbée après fracture du col fémoral faisant le lit de la nécrose avasculaire. Une notion beaucoup moins répandue est l'état d'hypohémie céphalique qui souligne encore plus la fragilité céphalique. Nakamura et al. [74] ont démontré sur la base d'une tomographie à émission de positron (PET) que la tête fémorale présente un état permanent

d'hypohémie en comparaison aux autres tissus osseux environnants (région trochantérienne, ilion) avec un volume et un débit sanguin diminué. Cette notion nous paraît importante puisqu'elle renforce la légitimité du bilan vasculaire initial post-traumatique et qu'elle laisse entendre que ce bilan doit être porté également sur le côté controlatéral permettant une comparaison et une pondération des résultats.

La littérature rapporte différentes techniques d'évaluation de la vascularisation céphalique résiduelle qui ont fait la preuve de leur efficacité. Néanmoins la réalisation en routine de certaines de ces techniques (mesure en oxygène ou la réalisation de doppler) est délicate tant sur le plan économique que sur le plan pratique. Actuellement l'angiographie supra-sélective ou la DSA ne peuvent être proposées de façon systématique eu égard aux risques iatrogènes encourus et en comparaison aux autres techniques d'imagerie qui sont nettement plus performantes et permettent une analyse plus précoce tout en étant moins invasives. Le choix s'oriente alors vers la scintigraphie et l'IRM. Compte tenu des données de la littérature, la scintigraphie semble efficace et très sensible. Le patient est cependant soumis à une irradiation liée à l'injection d'isotope radioactif. Par ailleurs, elle ne permet pas d'analyse morphométrique et nécessite une expertise du médecin nucléaire. L'IRM porte tous nos espoirs si l'on se réfère à la littérature avec des résultats surprenant à l'origine d'une réflexion pouvant le cas échéant modifier nos pratiques thérapeutiques. L'IRM dynamique semble être encore plus prometteuse et être l'avenir dans ce bilan d'estimation précoce du risque nécrotique de la tête fémorale. Nous avons vu que plusieurs équipes ont prouvé l'efficacité de cette technique proposant alors une classification fonctionnelle des fractures du col fémoral s'affranchissant de l'observation descriptive anatomique classiquement utilisée. Il s'agit d'une véritable révolution dans le monde de la traumatologie, avec une démarche thérapeutique indépendante du caractère morphologique de la fracture et basée sur la vascularisation résiduelle et par conséquent du risque ischémique. La limite majeure est la disponibilité de cet examen et l'expertise nécessaire pour les radiologues de cette « forme dynamique ». Il est évident que la réalisation d'une IRM dynamique dans les huit premières heures après une fracture cervicale permettrait une prise en charge optimale de la fracture du col fémoral chez le patient jeune. Il ne faut cependant pas qu'elle retarde le traitement chirurgical conservateur par ostéosynthèse, qui à nos yeux doit être réalisé en urgence avec un délai de prise en charge maximal de 10–12 heures, ce qui reste pour nous le meilleur garant de la survie céphalique. Nous ne reviendrons pas sur la technique à employer, mais le montage doit respecter quelques règles essentielles : stabilité et réduction anatomique avec au besoin une arthrotomie antérieure par un abord selon Watson-Jones afin de contrôler la réduction et notamment la rotation du fragment céphalique et décharge postopératoire de sécurité [1].

Cette démarche « diagnostique et thérapeutique » avec réalisation d'une imagerie dynamique vasculaire précoce doit être l'objectif à atteindre, bien qu'elle soit difficile à mettre en oeuvre. Les différents auteurs [68–72] rapportent des séries de fractures ostéosynthésées et soulignent l'intérêt de cette technique pour la création d'un

algorithme thérapeutique sans pour autant le proposer. Pour les patients jeunes (moins de 65 ans) [1], nous considérons que le traitement doit être conservateur quel que soit le type de résultat. Ce résultat permet d'estimer le risque nécrotique sur la base d'une évaluation initiale et surtout de pouvoir prévenir le patient de l'importance de ce risque. Cette information à apporter au patient nous semble importante et s'inscrit dans une société de transparence et de dialogue. Pour les personnes âgées (plus de 65 ans), le traitement conservateur est soutenu par certains auteurs [68–72] dans les cas de vascularisation « normale » et le remplacement prothétique est proposé dans les cas où la vascularisation est considérée comme absente, et ce quel que soit le type « morphologique » de la fracture. Si une fracture dite stable donc peu déplacée présente un mauvais état vasculaire, le remplacement prothétique sera préféré au traitement conservateur qui aurait été classiquement proposé. C'est à ce niveau qu'il est logique de parler d'une classification « fonctionnelle ». C'est finalement dans ces situations que ce bilan vasculaire prend tout son sens. Ainsi dans les cas intermédiaires de vascularisation, il nous semble que c'est l'âge qui doit faire balancer le choix thérapeutique. L'âge civil bien entendu avec une limite raisonnable à 80 ans au-delà de laquelle une arthroplastie doit être proposée, mais également l'âge physiologique [1]. À âge égal (entre 65 et 80 ans), soit le patient est considéré comme « physiologiquement jeune » soit comme « physiologiquement fatigué », en fonction notamment de tares viscérales et de co-morbidités associées. L'élément essentiel, qui à nos yeux semble permettre de classer les patients, est l'estimation de l'espérance de vie [1]. Cette estimation est basée tout d'abord sur le jugement du niveau d'autonomie, d'indépendance ou au contraire de dépendance en évaluant le lieu de vie (domicile, seul ou accompagné, institution), du mode de déambulation (canne, déambulateur ou nécessité d'un tiers) avec ou sans activité de promenade et la capacité à assumer les activités et tâches quotidiennes (courses, toilettes, ménage). L'ensemble permet par ailleurs de renseigner de façon indirecte l'état mental. Pour ce faire nous nous basons sur le score de Parker [1]. Enfin, cette évaluation du niveau d'autonomie est pondérée par la présence d'antécédents et leur lourdeur. Ainsi le patient que nous considérons comme « physiologiquement jeune » vit seul à domicile, marche sans aide ou uniquement avec une canne pour sortir, est autonome dans ses activités quotidiennes, n'a pas d'antécédents particuliers et présente par conséquent une espérance de vie estimée à plus de dix ans. À l'inverse un patient marchant avec une aide de façon permanente, habitant dans une institution, dépendant pour les activités quotidiennes ou présentant de lourds antécédents sera considéré comme « physiologiquement fatigué » avec une espérance de vie plus courte. Un traitement conservateur peut être proposé à la première catégorie en précisant la situation et le risque encouru. Si le patient semble « physiologiquement fatigué » le remplacement prothétique est licite et doit être proposé.

Au terme de cette revue de la littérature, l'intérêt du bilan vasculaire fonctionnel initial et précoce est évident et est rendu possible grâce à la réalisation d'une IRM dynamique. Malheureusement nous sommes limités par la disponibilité de l'IRM (en nombre mais également en situa-

tion d'urgence) et par l'expertise des radiologues. Ce manque de disponibilité des IRM en France, notamment en urgence, est fondamental et constitue à nos yeux un problème de santé publique. Ainsi nous nous sommes interrogés sur la possibilité d'acquies cette information vasculaire plus facilement. Nous avons tenté de répondre aux deux critères suivants: évaluation de la perfusion et facilité d'accès à l'examen. Pour cela nous nous sommes tournés vers la TDM de perfusion qui allie simplicité de la technique et disponibilité du matériel. Une évaluation de l'efficacité de la TDM de perfusion dans l'estimation du risque nécrotique par analyse de la vascularisation céphalique résiduelle post-traumatique est actuellement en cours.

Conflit d'intérêt

Aucun.

Références

- [1] Simon P. Choix thérapeutiques dans les fractures du col fémoral de l'adulte. In: Duparc J, editor. Conférences d'enseignement de la Sofcot. Paris: Elsevier; 1999. p. 121–38.
- [2] Swiontkowski M, Tepic P, Rahn B, Perren S. The effect of femoral neck fracture on femoral head blood flow. Bone circulation and bone necrosis. In: Fourth Symposium on Bone circulation. New York: Springer-Verlag; 1990. p. 150–3.
- [3] Smith F. Effects of rotatory and valgus malpositions on blood supply to the femoral head. *J Bone Joint Surg Am* 1959;41:800–15.
- [4] Holmberg S, Dalen N. Intracapsular pressure and caput circulation in non displaced femoral neck fractures. *Clin Orthop* 1987;219:124–6.
- [5] Asnis S, Waneck-Sgaglione L, Manhasset P. Intracapsular fractures of the femoral neck. Results of cannulated screw fixation. *J Bone Joint Surg Am* 1994;76:1793–803.
- [6] Gomez-Castresana FB, Caballer Ap, Portal LF. Avascular necrosis of femoral head after femoral neck fracture. *Clin Orthop* 2002;399:87–109.
- [7] Trueta J, Harrison MHM. The normal vascular anatomy of the femoral head in adult. *J Bone Joint Surg Br* 1953;35:442–61.
- [8] Howe Jr WW, Lacey T, Schwartz RP. A study of the gross anatomy of the arteries supplying the proximal portion of the femur and the acetabulum. *J Bone Joint Surg Am* 1950;32:856–66.
- [9] Judet J, Judet R, Lagrange J, Dunoyer J. A study of the arterial vascularisation of the femoral neck in the adult. *J Bone Joint Surg Am* 1955;32:663–75.
- [10] Sevvitt S, Thompson G. The distribution and anastomoses of arteries supplying the head neck of the femur. *J Bone Joint Surg Br* 1965;47:560–73.
- [11] Gautier E, Ganz K, Krugel N, Gill T, Ganz R. Anatomy of the medial circumflex artery and its surgical implications. *J Bone Joint Surg Br* 2000;82:679–83.
- [12] Hunter W. Of the structure and diseases of articulating cartilages. *Philosophical transactions of the Royal Society of London* 1743;42:514–20.
- [13] Catto M. Histological study of avascular necrosis of the femoral head transcervical fracture. *J Bone Joint Surg Br* 1965;47:749–76.
- [14] Chandler SB, Kreuscher PH. A study of the blood supply of the ligamentum teres and its relation to the circulation of the head of the femur. *J Bone Joint Surg* 1932;14:834–46.
- [15] Crock HV. An atlas of the arterial supply of the head and neck of the femur in man. *Clin Orthop* 1980;152:17–27.
- [16] Arnoldi CC, Linderholm H. Fracture of the femoral neck. Vascular disturbance in different types of fractures, assessed by measurements of intra-osseous pressures. *Clin Orthop* 1972;84:116–27.
- [17] Stromqvist B. Femoral head vitality after intra-capsular hip fracture. 490 cases studied by intravital tetracycline labelling and TC-MDP radionuclide imaging. *Acta Orthop Scand* 1983;200:5–71.
- [18] Sevvitt S. Avascular necrosis and revascularisation of the femoral head after intra-capsular fractures. A combined arteriographic and histological necropsy study. *J Bone Joint Surg Br* 1964;46:270–96.
- [19] Swiontkowski MF, Tepic S, Perren SM, Moor R, Ganz R, Rahn BA. Laser doppler flowmetry for bone blood flow measurement: correlation with microsphere estimates and evaluation of the effect intra-capsular pressure on femoral head blood flow. *J Orthop Res* 1986;4:362–71.
- [20] Swiontkowski MF, Ganz R, Schlegel U, Perren SM. Laser doppler flowmetry for clinical evaluation of femoral head osteonecrosis. *Clin Orthop* 1987;218:181–5.
- [21] Crawford EJP, Emery RJH, Hansell DM, Phelan M, Andrews BG. Capsular distension and intracapsular pressure in subcapital fractures of the femur. *J Bone Joint Surg Br* 1988;70:195–8.
- [22] Woodhouse CF. Dynamic influences of vascular occlusion affecting the development of avascular necrosis of the femoral head. *Clin Orthop* 1964;32:119–29.
- [23] Tachdjian MO, Grana L. Response of the hip joint to increased intra-articular hydrostatic pressure. *Clin Orthop* 1968;61:199–212.
- [24] Swiontkowski MF, Winquist RA, Hansen S.T.Jr. Fractures of the femoral neck in patients between the ages of twelve and forty-nine years. *J Bone Joint Surg Am* 1984;66:837–46.
- [25] Edholm P, Lindblom K, Maurseth K. Angulations in fractures of the femoral neck with and without subsequent necrosis of the head. *Acta Radiol* 1967;6:329–36.
- [26] Garden RS. Malreduction and avascular necrosis in subcapital fractures of the femur. *J Bone Joint Surg Br* 1971;53:183–97.
- [27] Smiyth EH, Shah VM. The significance of good reduction and displaced subcapital fractures of the femur. *Injury* 1974;5:197–209.
- [28] Claffey TJ. Avascular necrosis of the femoral head. An anatomical study. *J Bone Joint Surg Br* 1960;42:802–9.
- [29] Swiontkowski MF. Current concepts review. Intra-capsular fractures of the hip. *J Bone Joint Surg Am* 1994;76:129–38.
- [30] Glimcher MJ, Kenzora JE. The biology of osteonecrosis of the human femoral head and its clinical implications I. Tissue biology. *Clin Orthop* 1979;138:284–309.
- [31] Glimcher MJ, Kenzora JE. The biology of osteonecrosis of the human femoral head and its clinical implications II. The pathological changes in the femoral head as an organ and in the hip joint. *Clin Orthop* 1979;139:283–312.
- [32] Glimcher MJ, Kenzora JE. The biology of osteonecrosis of the human femoral head and its clinical implications III. Discussion of the etiology and genesis of the pathological sequelae. Comments on treatment. *Clin Orthop* 1979;140:273–312.
- [33] Glimcher MJ, Kenzora JE. Biologie de l'ostéonécrose de la tête fémorale chez l'homme. Applications cliniques. *Rev Chir Orthop* 1981;67:181–6.
- [34] Steib JP, Moyses B, Wenger JJ, et al. Étude par microsphères radioactives de la microcirculation osseuse dans l'ostéonécrose asseptique de la tête fémorale. *Rev Chir Orthop* 1987;73:601–8.
- [35] Théron J. Supraselective angiography of the hip. Technique, normal features, and early results in idiopathic necrosis of the femoral head. *Radiology* 1977;124:649–57.
- [36] Heuck A, Reiser M, Schumacher F, et al. Selective digital subtraction arteriography in necrosis of the femoral head. *Skeletal Radiol* 1987;16:270–4.

- [37] Langer R, Langer M, Scholz A, Astinet F, Schwetlick G, Felix R. Femoral head perfusion in patients with femoral neck fracture and femoral head necrosis. *J Belge Radiol* 1993;76:145–9.
- [38] Watanabe Y, Terashima Y, Takenaka N, Kobayashi M, Matsushita T. Prediction of avascular necrosis of the femoral head after femoral neck fracture. *J Orthop Trauma* 2007;21:456–61.
- [39] Kiaer T, Pederson NW, Kristensen KD, Starklint H. Intra-osseous pressure and oxygen tension in avascular necrosis and osteoarthritis of the hip. *J Bone Joint Surg Br* 1990;72:1023–30.
- [40] Arlet J, Ficat J, Lartigue G, Tran MA. Recherches cliniques sur la pression intra-osseuse dans la métaphyse et l'épiphyse fémorale supérieures chez l'homme. *Rev Rhum* 1972;39:717–23.
- [41] Swiontkowski MF, Ganz R, Schlegel U, Perren SM. Laser doppler flowmetry for clinical evaluation of femoral head osteonecrosis. *Clin Orthop* 1987;218:181–5.
- [42] Sugamoto K, Ochi T, Takahashi Y, Tamura T, Matsuoka T. Hemodynamic measurement in the femoral head using laser doppler. *Clin Orthop* 1998;353:138–47.
- [43] Tucker FR. The use of radioactive phosphorus in the diagnostic of avascular necrosis of the femoral head. *J Bone Joint Surg Br* 1950;32:100–4.
- [44] Boyd HB, Zilversmith DB, Calandruccio RA. The use of radioactive phosphorus to determine the viability of the head of the femur. *J Bone Joint Surg Am* 1955;37:260–9.
- [45] Riggins RS, DeNardo GL, D'Ambrosio R, Goldman M. Assessment of circulation in the femoral head by F18 scintigraphy. *J Nucl Med* 1974;15:183–6.
- [46] Webber MM, Wagner J, Cragin MD, Victory W. Femoral head blood supply demonstrated by radiotracers. *J Nucl Med* 1974;15:543.
- [47] Meyers MH, Nancy Telfer D, Moore TM. Determination of the vascularity of the femoral head with technetium 99m-Sulphur-Colloid. *J Bone Joint Surg Am* 1977;59:658–64.
- [48] Philipps TW, Aitken GK, McKenzie RA. Sulphur colloid bone scan assessment of femoral head vascularity following subcapital fracture of the hip. *Clin Orthop* 1986;208:52–4.
- [49] D'Ambrosia RD, Shoji H, Riggins RS, Stadalnik RC, DeNardo GL. Scintigraphy in the diagnosis of osteonecrosis. *Clin Orthop* 1978;130:139–43.
- [50] Bauer G, Weber DA, Cedre L, et al. Dynamics of technetium 99m-methyldiphosphonate imaging of the femoral head after hip fracture. *Clin Orthop* 1980;152:85–92.
- [51] Lucie RS, Fuller S, Burdick DC, Johnston RM. Early prediction of avascular necrosis of the femoral head following femoral neck fractures. *Clin Orthop* 1981;161:207–14.
- [52] Greiff J. Determination of the vitality of the femoral head with 99mTechnetium-Sn-pyrophosphate scintigraphy. *Acta Orthop Scand* 1980;51:109–17.
- [53] Greiff J, Lannig S, Hoilund-Carlson PF, Karle AK, Uhrenholdt A. Early detection by 99mtechnetium-Sn-pyrophosphate scintigraphy of femoral head necrosis following head necrosis medial neck fractures. *Acta Orthop Scand* 1980;51:119–25.
- [54] Turner JH. Post-traumatic avascular necrosis of the femoral head predicted by preoperative technetium 99m antimony colloid scan. *J Bone Joint Surg Am* 1983;65:786–96.
- [55] Lang P, Jegersen HE, Genant HK. Magnetic resonance imaging of the ischemic femoral head in pigs. *Clin Orthop* 1989;244:272–80.
- [56] Moon KL, Genant HK, Helms CA, Chafetz NI, Crooks LE, Kauffmann L. Musculoskeletal applications of nuclear magnetic resonance. *Radiology* 1983;147:161–71.
- [57] Moon KL, Genant HK, Davis PL, et al. Nuclear magnetic resonance imaging in orthopaedics: principles and applications. *J Orthop Res* 1983;1:101–14.
- [58] Fordyce MJF, Solomon L. Early detection of avascular necrosis of the femoral head by MRI. *J Bone Joint Surg Br* 1993;75:365–7.
- [59] Basset LW, Gold RH, Reicher M, Bennett LR, Tooke SM. Magnetic resonance imaging in the early diagnosis of ischemic necrosis of the femoral head. Preliminary report. *Clin Orthop* 1987;214:237–48.
- [60] Nakamura T, Matsumoto T, Nishino M, Tomita K, Kadoya M. Early magnetic resonance imaging and histologic findings in a model of femoral head necrosis. *Clin Orthop* 1997;334:68–72.
- [61] Speer KP, Spritzer CE, Harrelson JM, James AN. Magnetic resonance imaging of the femoral head after acute intracapsular fracture of the femoral neck. *J Bone Joint Surg Am* 1990;72:98–103.
- [62] Asnis SE, Guld ES, Bansal M, Rizzo PF, Bullogh PG. Magnetic resonance imaging of the hip after displaced femoral neck fractures. *Clin Orthop* 1994;298:191–8.
- [63] Sugano N, Mushura K, Nakamura N, Ochi T, Hirooka A, Hayami Y. MRI of early osteonecrosis of the femoral head after transcervical fracture. *J Bone Joint Surg Br* 1996;78:253–7.
- [64] Kawasaki M, Hasegawa Y, Skano S, et al. Prediction of osteonecrosis by magnetic resonance imaging after femoral neck fractures. *Clin Orthop* 2001;385:157–64.
- [65] Cova M, Kang YS, Tsukamoto H, et al. Bone marrow perfusion evaluated with gadolinium-enhanced dynamic fast MR imaging in a dog model. *Radiology* 1991;179:535–9.
- [66] Nadel SN, Debatin JF, Richardson WJ, et al. Detection of acute avascular necrosis of the femoral head in dogs: dynamic contrast-enhanced MR imaging vs spin-echo and STIR sequences. *AJR Am J Roentgenol* 1992;159:1255–61.
- [67] Lang P, Mauz M, Schorner W, et al. Acute fracture of the femoral neck: assessment of femoral head perfusion with gadopentate dimeglumine-enhanced MR imaging. *AJR Am J Roentgenol* 1993;160:335–41.
- [68] Kamano M, Narita S, Honda Y, Fukushima K, Yamano Y. Contrast enhanced magnetic resonance imaging for femoral neck fracture. *Clin Orthop* 1998;350:179–86.
- [69] Konishiike T, Makihata E, Tago H, Sato T, Inoue H. Acute fracture of the neck of the femur. An assessment of perfusion of the head by dynamic MRI. *J Bone Joint Surg Br* 1999;81:596–9.
- [70] Hirata T, Konishiike T, Kawai A, Sato T, Inoue H. Dynamic magnetic resonance imaging of femoral head perfusion in femoral neck fracture. *Clin Orthop* 2001;393:294–301.
- [71] Kubo T, Nagamachi A, Suganuma K, Endo T. Dynamic MRI positive enhancement integral color mapping in femoral neck fractures. Presented at the American academy of Orthopaedic Surgeons 75th Annual meeting March 5-9 San Francisco 2008.
- [72] Kaushik A, Sankaran B, Varghese M. Prognostic value of dynamic MRI in assessing post-traumatic femoral head vascularity. *Skeletal Radiol* 2009;38:565–9.
- [73] Jenny JY, Vecsei V. La phlébographie de la tête fémorale dans les suites des fractures du col du fémur. *Int Orthop* 1987;10:187–93.
- [74] Nakamura F, Fujioka M, Takahashi KA, et al. Evaluation of the hemodynamics of the femoral head compared with the ilium, femoral neck and femoral inter-trochanteric region in healthy adults: measurement with positron emission tomography (PET). *Ann Nucl Med* 2005;19:549–55.