

# Les fractures périphériques difficiles de l'enfant en radiologie standard

Dr. Julie Bolivar, Dr. Olivier Prodhomme

Service d'imagerie pédiatrique, Hôpital Arnaud de Villeneuve, CHU Montpellier (Pr. I Millet, Dr. Taleb Arrada)

## INTRODUCTION

Les traumatismes ostéo-articulaires périphériques de l'enfant sont très fréquents et sont explorés exclusivement par radiographies standard dans l'immense majorité des cas. Ils représentent un volume important des radiographies réalisées aux urgences pédiatriques. La majorité de ces fractures sont de diagnostic aisé et depuis quelques années, leur détection, dans certains centres, peut être assistée par l'intelligence artificielle (IA). Néanmoins, de nombreuses sources d'erreur diagnostique peuvent conduire à un sur- ou un sous-diagnostic de fracture, à une interprétation incomplète de celles-ci ou encore conduite à une prise en charge inappropriée. La spécificité des fractures en pédiatrie peut conduire à de nombreuses situations d'interprétation difficile. L'objectif de cette revue est d'identifier et de classer les situations qui peuvent être source d'erreur diagnostique et de les illustrer par des exemples de la pratique quotidienne (enseignement dirigé).

Ne seront traitées que les fractures périphériques des membres, excluant par définition les fractures cranio-faciales\* et les fractures du tronc.

Cet article ne se prétend pas exhaustif de toutes les sources de difficulté dans la lecture et l'interprétation des radiographies ni dans la démarche décisionnelle qui peut en découler.

\* à l'exception du questionnement du diagnostic différentiel d'une fracture du crâne vs suture accessoire

## LES SOURCES D'ERREUR EN IMAGERIE (PEDIATRIQUE)

De nombreux travaux exposent et classifient les différents types de situations qui peuvent conduire à rendre une prise en charge inadéquate à l'issue d'un examen d'imagerie. Les radiographies standard réalisées dans le cadre des urgences traumatiques de l'enfant sont concernées par beaucoup d'entre elles. Les spécificités liées à la pédiatrie constituant la première source de difficulté et beaucoup d'entre-elles peuvent découler d'un manque de connaissance de celle-ci.

Dans ce contexte, la première cause d'erreur est celle de l'interprétation erronée. Nous détaillerons dans les chapitres suivants les différentes situations qui expliquent ces difficultés. Succinctement, le très grand nombre de variantes de la normale peut aisément conduire à des faux positifs de fracture (ex : noyau d'ossification surnuméraire, suture accessoire). La particularité de l'os en croissance peut conduire à de nombreuses erreurs d'identification ou d'interprétation de fractures (plaques de croissance, propriétés mécaniques de l'os et des ligaments de l'enfant).

Même une fois l'identification et l'interprétation appropriées d'une fracture, il persiste des sources d'erreur de prise en charge. Certaines formes de fractures peuvent constituer des pièges d'interprétation quand d'autres doivent faire rechercher une explication à leur survenue.

## QUELLE STRATEGIE DIAGNOSTIQUE DANS LA PATHOLOGIE OSTEOARTICULAIRE TRAUMATIQUE DE L'ENFANT

Le sujet que nous traitons ici concerne principalement les radiographies standard puisqu'elles sont systématiquement le mode d'entrée en traumatologie ostéo-articulaire pédiatrique. Le bilan doit comprendre dans la très grande majorité des cas, une incidence de face et une incidence de profil, orthogonales. S'il est classiquement recommandé des radiographies des segments de membres incluant les articulations sus- et sous-jacentes, dans la plupart des cas, les radiographies d'une seule articulation suffisent dans les traumatismes classiques du poignet, du coude ou de la cheville. Les radiographies doivent inclure l'intégralité des parties molles périphériques aux segments osseux explorés. Au niveau des extrémités, l'incidence de  $\frac{3}{4}$  est plus informative que le profil. Il peut être parfois utile de réaliser des incidences complémentaires mais cela nécessite une interprétation des clichés au fil l'eau, ce qui n'est pas toujours réalisable dans le contexte de la traumatologie d'urgence. L'intelligence artificielle prend une place de plus en plus importante comme première analyse radiologique dans le parcours patient aux urgences. Les radiographies comparatives ne sont plus indiquées dans l'objectif de confronter une image compatible avec une variante de la normale. La réalisation de radiographies à J10 peut permettre de confirmer ou d'infirmer un doute radio-clinique en montrant, ou non, des signes de reconstruction osseuse (ex : fracture du cuboïde, fracture en cheveu du tibia).

Les radiographies doivent être consultées sur des moniteurs prévus à cet effet. C'est d'autant plus vrai en radiographie standard que pour toute autre modalité d'imagerie. Attention à l'analyse d'image sur des outils web, d'autant plus s'il y a la mention « image non dédiée à une étude diagnostique ». Se méfier encore plus de l'interprétation d'images transmises par messagerie instantanée (WhatsApp ou autre) ... pour un second avis !

L'utilisation d'un compte-rendu type peut être utile pour l'analyse systématique de tous les éléments anatomiques présents sur un cliché tant la recherche d'une fracture peut rapidement focaliser notre attention. Cependant il faudra également vérifier la congruence articulaire, analyser la trame osseuse et porter une attention particulière aux parties molles à la recherche, entre autres, d'un épanchement articulaire.

Si les radiographies standard s'avèrent insuffisantes, il peut être utile de compléter par d'autres modalités d'imagerie.

Dans certaines situations, l'échographie peut apporter des informations utiles en particulier sur les parties molles. Elle peut permettre d'identifier un épanchement articulaire en faveur d'une hémarthrose. Elle peut également mettre en évidence un hématome sous-périosté, un décroché cortical ou une fracture/arrachement de petite taille lorsque les radiographies sont normales ou douteuses. Elle est très utile, en complément des radiographies, dans la situation particulière des traumatismes obstétricaux (décollement épiphysaire ou fracture de clavicule). L'échographie présente deux autres avantages liés au fait d'être en présence du patient. Elle peut ainsi être guidée par l'examen clinique (ecchymose, douleur, interrogatoire, ...) et permet de réaliser une étude comparative avec le côté controlatéral.

Le scanner est parfois utile dans des fractures nécessitant une analyse en 3 dimensions comme certaines fractures de cheville (triplane, Tillaux, Mac Farland) ou fractures complexes du coude. L'IRM comme le scanner peuvent constituer des examens de seconde intention pertinents en cas de d'importante discordance radio/clinique. L'IRM est particulièrement intéressante en complément pour le bilan lésionnel de structures anatomiques radiotransparentes (cartilages, ménisques, ligaments). L'IRM peut permettre d'identifier une fracture infra-radiologique dans la situation de la

boiterie post-traumatique non ciblée de l'enfant. La scintigraphie peut également être utile dans cette indication, si l'IRM n'est pas accessible (âge, délai).

Il faut souligner également l'importance de l'examen clinique. Tout d'abord l'interrogatoire avec la précision des circonstances et du mécanisme lésionnel. Ceux-ci sont très importants pour l'identification de lésions subtiles, mais spécifiques d'un mécanisme (ex : trampoline). Ils permettent également d'estimer la compatibilité des constatations radiologiques avec le traumatisme rapporté, en particulier avant l'âge de 2 ans. L'examen physique est essentiel pour cibler la région à explorer dans toutes les circonstances, mais plus particulièrement encore dans la boiterie de l'enfant. Il permet également d'aider à interpréter une image radiologique douteuse. En effet, l'absence de toute symptomatologie ou d'anomalie de l'examen physique en lien avec une image radiologique « douteuse ou suspecte de lésion post-traumatique » rend improbable la présence d'une fracture sous-jacente. Il est relativement rare que le radiologue puisse examiner le patient en traumatologie d'urgence mais, lorsque c'est possible, c'est souvent un élément déterminant de l'interprétation.

## LES FRACTURES SPECIFIQUES A L'ENFANT

L'adage que l'enfant n'est pas un petit adulte se vérifie dans la pathologie traumatique ostéo-articulaire de l'enfant. L'apprentissage des fractures spécifiques de l'enfant est un prérequis indispensable pour analyser des radiographies de traumatologie de l'enfant.

L'os de l'enfant est plus fragile que celui de l'adulte. Il est également plus élastique et plastique. Les ligaments et le périoste sont comparativement plus solides. Ces propriétés physiques expliquent que les fractures soient fréquentes dans les traumatismes pédiatriques et expliquent les lésions spécifiques succinctement décrites ci-dessous. La grande majorité de ces fractures ne posent pas de problème diagnostique même sans en connaître les spécificités pédiatriques. Cependant, bien connaître ces entités peut permettre d'être plus sensible pour détecter ces fractures quand elles sont subtiles et pour identifier d'éventuelles complications.

La plus fréquente est la fracture en « motte de beurre » métaphysaire. Il s'agit d'une fracture en compression de l'os diaphysaire dans l'os métaphysaire. Le poignet (radius distal) est de loin la localisation la plus fréquente. La perte de la régularité de la courbe d'évasement métaphysaire est un élément clé du diagnostic dans les fractures subtiles. Physiologiquement, elle a la régularité d'une courbe « mathématique ». Toute irrégularité, voussure ou angulation, même minime, est le témoin d'une fracture sous-jacente. L'analyse à posteriori peut aider à progresser sur la détection de ces fractures, parfois très subtiles (identification par l'IA, par des radiographies à distance ou par un examen complémentaire).

La fracture dite de « trampoline » est très fréquente et sous diagnostiquée à la phase aiguë. Elle concerne la métaphyse proximale du tibia. Il s'agit d'une fracture type « motte de beurre » d'orientation transverse, à mi-hauteur de la tubérosité tibiale antérieure. Elle est fréquemment très subtile et essentiellement visible de profil. Comme précédemment, l'os sous-chondral de la tubérosité tibiale antérieure est physiologiquement strictement rectiligne. Toute irrégularité est suspecte de fracture sous-jacente. Le traumatisme inaugural est très souvent le même. Il survient lorsque deux enfants d'âge différent sont sur le même trampoline. Après la propulsion du plus grand des deux, le retour de la toile du trampoline vient percuter le plus jeune enfant en phase de descente.

Plusieurs types de fracture impliquant la physe sont par définition exclusivement pédiatriques. Une classification des fractures métaphysaires décrite par Salter et Harris distingue 5 types : I/ trait de fracture physaire (décollement), II/ trait de refend métaphysaire, III/ trait de refend épiphysaire, IV/ transfixiante métaphyso-épiphysaire, V/ physaire en compression. Les décollements épiphysaires néonataux appartiennent au type Salter I. La présence de cette physe, non ossifiée, complexifie

l'analyse des fractures métaphyso-épiphyssaires chez l'enfant. Certaines fractures de cheville combinent différents types. Les fractures passant par la plaque de croissance sont à risque d'épiphyssodèse. Si celle-ci est étendue, il peut en résulter un défaut de croissance si elle est centrale et une angulation si celle-ci est excentrée. Moins étendue, elle cède sous la force exercée par la croissance osseuse.

Bien que de localisation métaphysaire, les fractures métaphysaires classiques dans le cadre de traumatismes non accidentel sont à distinguer de ces dernières. Elles résultent de forces de torsion transversale sur la virole d'ossification. Elles ne présentent pas de risque d'épiphyssodèse.

Les fractures dites du « trotteur » sont représentées essentiellement par les fractures du cuboïde et la fracture « en cheveu » du tibia. Elles surviennent chez des nourrissons à l'âge de la marche et des enfants jusqu'à l'âge de 3 ans. Le mode d'entrée est une boiterie unilatérale ou un refus de poser le pied, sans fièvre, le plus souvent dans un contexte post-traumatique. Ce dernier n'est pas toujours évident à retrouver et cela peut rendre difficile, dans certaines situations, l'orientation diagnostique. Il est parfois difficile de préciser la localisation de la douleur chez ces jeunes enfants. Le bilan d'imagerie de première intention comprend un couple radiographies standard/échographie. La chronologie relative et l'exhaustivité de ces explorations dépendent du contexte clinique et des protocoles en vigueur dans les différents centres. Au CHU de Montpellier, en heure ouvrable, un bilan échographique est réalisé en première intention, orienté par l'examen clinique. Il est complété par des radiographies en fonction de cette première évaluation. La fracture « en cheveu » est une fracture spiroïde des 2/3 inférieurs du tibia, souvent de diagnostic subtil comme son nom l'indique. Elle nécessite des radiographies orthogonales de bonne qualité et parfois une incidence complémentaire. La fracture du cuboïde est également souvent très subtile sur les clichés de face et de ¾ du pied. L'une comme l'autre peuvent même être infra-radiologiques. Pour ces deux entités, l'échographie est complémentaire aux radiographies pour faire le diagnostic. L'IRM (ou la scintigraphie) peut être utile lorsque le bilan radio/écho est insuffisant. En pratique, beaucoup d'enfants seront immobilisés, même sans confirmation diagnostique, et en cas de fracture les clichés de surveillance montreront une ostéocondensation de consolidation.

La fracture plastique est une forme rare de fracture diaphysaire incomplète, sans solution de continuité des corticales. Il existe une incurvation excessive de l'os concerné avec une possible désorganisation de la trame osseuse à hauteur du sommet de la courbure. Elle concerne essentiellement l'ulna et la fibula et accompagne fréquemment une fracture de l'os adjacent.

La fracture en « bois vert » est également une forme de fracture diaphysaire incomplète, plus fréquente que la précédente, dans laquelle il existe une fracture unicorticale au sommet de la convexité.

Les arrachements apophysaires au niveau du cartilage de croissance sont de diagnostic plus difficile comparativement aux arrachements osseux. Il faut savoir repérer le déplacement de l'apophyse ossifiée malgré l'absence de trait de fracture.

## FRACTURE vs VARIANTE DE LA NORMALE

L'os en croissance est sujet à de nombreuses variantes de la normale pouvant mimer une fracture. La présence d'un noyau d'ossification secondaire ou d'un os surnuméraire peut méprendre sur l'existence d'une fracture. En effet, il existe un fin espace radio-transparent, cartilagineux, entre cette structure ossifiée et l'os adjacent pouvant être interprété à tort comme un trait de fracture. L'aspect corticalisé des berges, la morphologie et la connaissance des variantes habituelles de la normale permettent le

plus souvent de faire le diagnostic différentiel, sans oublier l'examen clinique. Les ouvrages de référence des variantes de la normale sont parfois utiles même s'il faut parfois conserver l'esprit critique (certaines images sont sujettes à discussion). Les localisations les plus classiques et trompeuses sont la base du 5<sup>ème</sup> métatarsien, la malléole latérale et la scapula. Il faut également garder un esprit critique sur l'intelligence artificielle qui peut parfois aider, comme elle peut parfois induire en erreur.

Une autre situation spécifique à l'enfant est celle de la distinction entre une éventuelle fracture du crâne et l'existence d'une suture accessoire. De nombreux éléments sont décrits pour tenter d'en faire le diagnostic différentiel. Il n'est pas rare que, malgré ces éléments, il soit difficile d'être catégorique, en particulier dans les situations concernant les traumatismes non accidentels. La présence d'une collection du scalp strictement centrée sur le trait de fracture est très évocatrice d'une fracture. Néanmoins les sutures accessoires sont tellement fréquentes qu'on ne peut exclure une contusion en regard d'une suture accessoire. Habituellement, un trait de fracture s'élargit en se rapprochant d'une suture et ses bords sont nets et non-corticalisés à l'inverse d'une suture accessoire. Un décalage entre les deux parties de la voûte est en faveur d'une fracture. Des sutures occipitales accessoires sont très fréquentes, souvent symétriques et mesurent habituellement moins de 20 mm de longueur. Une image bilatérale +/- symétrique oriente plus pour la variante de la normale mais l'hypothèse post-traumatique peut parfois être évoquée.

## LES FRACTURES INFRA-RADIOLOGIQUES

Une fracture infra-radiologique est une fracture sans traduction sur la radiographie standard, même à postériori. Elles sont peu fréquentes car la relecture a posteriori des clichés montre quelques signes subtils dans un certain nombre de cas. Une fracture infra-radiologique sera confirmée soit sur une autre modalité d'imagerie ou soit sur des radiographies de contrôle à distance.

Trois situations « classiques » sont à retenir. La première situation est celle de la boiterie post-traumatique. Les deux localisations les plus fréquentes sont la fracture en cheveu du tibia et la fracture du cuboïde. Pour l'une comme pour l'autre, l'échographie peut être utile pour positiver une fracture en s'aidant de l'étude comparative. Par la présence d'une apposition périostée et/ou d'une solution de continuité de la corticale pour la première et par une « ovalisation » des contours du cuboïde sur une exploration par voie dorso-latérale pour la seconde. L'échographie peut aussi faire le diagnostic différentiel avec d'autres causes de boiterie, non traumatique. L'IRM peut également être utile avec un protocole rapide (STIR coronal sur les deux membres inférieurs) qui pourra être réalisé sur la majorité des enfants sans sédation.

La seconde situation fréquente est celle de la fracture du coude pour laquelle aucun trait de fracture n'est identifiable alors qu'il existe un épanchement intra-articulaire. Dans un contexte post-traumatique formel, il s'agit d'une hémarthrose qui signe la fracture intra-articulaire. La fracture peut éventuellement être objectivée en échographie si celle-ci s'avère nécessaire pour rechercher ou confirmer un épanchement articulaire. La fracture affecte le plus souvent la palette humérale mais une fracture de l'extrémité proximale de l'un des deux os de l'avant-bras n'est si rare.

Dans ces deux premières situations, que la fracture soit quasi-certaine (coude) ou suspectée (fractures du trotteur), l'attitude thérapeutique est souvent celle d'une immobilisation de présomption. A l'issue de cette immobilisation, une réévaluation à J10 ou J21 peut confirmer la fracture en présence de signes de reconstruction ou à l'inverse l'infirmer en leur absence. La présence de signes de reconstruction peut être l'occasion de relire les clichés initiaux et éventuellement d'identifier des signes subtils. Revoir les clichés antérieurs de manière systématique, une fois la fracture confirmée d'une manière ou d'une

autre (radiographie standard de contrôle ou examen complémentaire), est un moyen de progresser dans l'interprétation.

La troisième situation est lorsque on est face à une importante discordance radio/clinique chez un enfant ou un adolescent en impotence fonctionnelle (sub-)totale sans anomalie radiologique et que l'immobilisation de présomption ne semble pas appropriée. Dans ces situations, l'IRM et ou le scanner sont utiles pour affirmer ou infirmer une fracture, compte tenu de l'impact majeur sur la prise en charge. Dans notre expérience, il s'agit de situations concernant les ceintures et dans une moindre mesure le genou.

## LES FRACTURES D'ANALYSE RADIOLOGIQUE COMPLEXE

La problématique dans ce type de fracture est l'identification des situations dont le bilan radiologique standard peut être insuffisant. Il est alors souvent utile de compléter par une imagerie en coupe. En termes de disponibilité, le scanner apparaît souvent comme l'examen de seconde intention. Par exemple, au niveau de la cheville, il faut savoir envisager une fracture triplane sur les clichés standard lorsqu'une l'orientation des traits de fracture est différente de profil (frontal oblique) et de face (sagittal) épiphysaire, avec trait de refend articulaire. Dans ce cas, un scanner sera fréquemment réalisé pour le bilan lésionnel avant une prise en charge chirurgicale. Certaines fractures complexes du coude peuvent justifier d'une exploration d'imagerie en coupes pour faire le bilan lésionnel, d'emblée ou après échec de réduction. Ces outils sont également utiles pour rechercher un corps étranger intra-articulaire (composante osseuse en scanner et composante cartilagineuse en IRM).

Une fracture compliquant une lésion focale préexistante peut être infra-radiologique et nécessiter de la même manière une imagerie en coupe complémentaire (scanner +/- suivi de l'IRM).

Il faut se méfier du biais de satisfaction dans l'interprétation des clichés. On se satisfait d'avoir identifié une fracture et on en oublie de rechercher une luxation associée (ex : fracture de Monteggia) ou une seconde fracture (coude et poignet).

Dans certaines fractures complexes diaphysaires des os longs, chez l'adolescent essentiellement, un certain degré de rotation peut venir compliquer la prise en charge chirurgicale. Elle peut être suspectée cliniquement et peut justifier d'un scanner complémentaire pour évaluer la correction angulaire à proposer. Des outils informatiques émergents (en pathologie osseuse constitutionnelle), pourraient assister la correction chirurgicale par fixateur externe afin d'éviter les cals vicieuses en rotation.

## LES FRACTURES PATHOLOGIQUES

Une fracture osseuse peut être l'élément révélateur d'une pathologie osseuse fragilisante, localisée 'tumorale' ou dans le cadre d'une affection diffuse de l'os, congénitale ou acquise. Dans cette circonstance, le traumatisme causal peut être plus faible qu'habituellement, voire mineur. Comme précisé précédemment, dans l'interprétation des clichés il est indispensable d'analyser la trame osseuse sous-jacente. Encore une fois, le compte rendu type peut être un rappel de l'analyse systématique de la qualité de l'os étudié. Néanmoins, lorsque l'anomalie osseuse est focale, elle est souvent plus évidente que la fracture elle-même.

La découverte d'une lésion focale va questionner sur son étiologie. Il est important de décrire la lésion et de définir ses critères d'agressivité. Pour cela, il est parfois utile de compléter par scanner sauf pour les lésions dont le diagnostic peut être affirmé à la radiographie standard comme c'est le cas pour le fibrome non ossifiant. Dans la plupart des cas, la lésion ne présentera aucun critère de gravité. Dans ce cas, il faudra savoir (faire) attendre la régression des signes post-traumatiques pour proposer une caractérisation IRM. Dans le cas contraire, la caractérisation IRM sera réalisée dans une relative urgence et le cas échéant complétée par une caractérisation histologique.

Une fracture peut également être révélatrice d'une atteinte fragilisante osseuse diffuse, congénitale ou acquise. Dans ce cas, il faudra envisager de réaliser de clichés complémentaires pour analyser l'ensemble du squelette. Le premier réflexe est d'envisager une ostéogénèse imparfaite dont les éléments diagnostiques sont une finesse des corticales et une transparence osseuse excessive. La recherche d'os wormien peut constituer un élément d'orientation. Cliniquement l'histoire familiale, les sclères bleuées et l'hyperlaxité cutanée sont très utiles au diagnostic. La déminéralisation osseuse peut avoir d'autres causes, congénitales ou acquises, la plus fréquente étant l'immobilisation prolongée. Une maladie osseuse condensante peut également fragiliser l'os. Cela peut être contre-intuitif mais la maladie osseuse condensante modifie les propriétés mécaniques de l'os qui le rendent plus fragile.

Certaines affections osseuses peuvent également mimer des lésions post-traumatiques. On peut citer par exemple le scorbut, en recrudescence, qui peut méprendre sur l'existence d'une fracture métaphysaire classique. Une pseudarthrose congénitale peut parfois être difficile à distinguer d'une fracture (ex : clavicule).

## LES FRACTURES QUI IMPLIQUENT UNE STRUCTURE RADIO-TRANSPARENTÉ

Quand on entend fracture, on visualise un trait radioclaire au sein d'une structure osseuse. C'est bien évidemment de loin les lésions post-traumatiques les plus fréquentes. Malgré tout, il ne faut pas oublier toutes les structures anatomiques radio-transparentes. Chez l'enfant, les pièces squelettiques sont en croissance et en maturation. Il existe donc de nombreuses structures cartilagineuses, temporaires. Les épiphyses sont tout d'abord cartilagineuses puis vont s'ossifier progressivement du centre vers la périphérie. Des noyaux d'ossification secondaire vont apparaître puis se fusionner progressivement. L'âge de l'enfant va donc être un élément déterminant de la démarche diagnostique.

Il existe des plaques de croissance au niveau des métaphyses des os longs et des équivalents métaphysaires sur les autres pièces osseuses. Les apophyses en cours d'ossification sont également séparées des os par une ligne radiotransparente, cartilagineuse (équivalent physaire). Le trait de fracture peut concerner ces structures cartilagineuses et par conséquent ne pas avoir de traduction radiologique. La fracture cartilagineuse être le prolongement d'une fracture osseuse. Par exemple, un trait de refend épiphysaire cartilagineux, et donc articulaire, peut être manqué au niveau du coude chez un enfant jeune. Un trait de fracture peut concerner exclusivement une structure radiotransparente même si, très fréquemment, un fragment osseux très fin, ou de petite taille est associé. Il peut s'agir d'un décollement épiphysaire de type Salter I. Il peut survenir lors d'un accouchement dystocique essentiellement au niveau du membre supérieur. Il peut survenir également au niveau du coude (condyle externe, trochlée). Chez l'enfant, on peut également observer une avulsion au niveau du cartilage de croissance en particulier de l'épicondyle médial. Seul le déplacement de ce noyau d'ossification peut faire le diagnostic qui peut même se luxer dans l'articulation du coude. Une éventuelle infiltration des parties molles en regard du noyau d'ossification d'une apophyse peut également suggérer un arrachement.

Outre les fractures cartilagineuses, d'autres structures anatomiques radiotransparentes peuvent être impliquées dans des foyers fracturaires. Ne seront pas développées, les lésions nerveuses ou vasculaires qui peuvent survenir lors de fractures très déplacées (ex : coude) qui n'ont pas de traduction radiologique. Seront abordées uniquement les structures radiotransparentes qui peuvent s'incarcérer dans un foyer fracturaire. La plus fréquente est l'incarcération périostée dans une fracture décollement épiphysaire en particulier au niveau du genou. Dans les fractures des massifs épineux du genou, il peut également s'incarcérer une languette méniscale ou le ligament inter-méniscal. Au niveau du coude, le nerf ulnaire peut s'incarcérer dans une fracture supra-condylienne. La « non-réductibilité » radiologique d'une fracture doit questionner sur la possibilité d'incarcération d'une structure radiotransparente quelle qu'en soit la nature. Une incarceration fibro-cartilagineuse dans un foyer fracturaire va empêcher la consolidation et perturber la croissance si l'incarcération est au niveau de la physe. Une incarceration nerveuse aura également des conséquences motrices et sensitives en distalité.

## LES FRACTURES ET TRAUMATISME NON ACCIDENTEL

Il n'y a rien de plus banal qu'un traumatisme ostéo-articulaire conduisant à une fracture périphérique chez l'enfant. Chez le nourrisson (< 24 mois) en revanche, les fractures périphériques sont plus rares, car la cinétique des traumatismes dépend de la hauteur de la chute et de la vitesse à laquelle elle survient, toute deux bien moindres à cet âge. La transition entre les fractures de l'enfant et du nourrisson n'est évidemment pas abrupte. Il existe, bien sûr, des circonstances de fracture accidentelle à tout âge mais il faut avoir l'automatisme de se questionner sur la concordance entre la fracture constatée et le traumatisme rapporté en dessous de l'âge de 2 ans. Elle doit également être confrontée aux compétences motrices du nourrisson. Toute fracture d'un os long (en particulier fémur et humérus) chez un nourrisson non-déambulant est suspecte de traumatisme non accidentel. Il faudra alors s'attacher à rechercher d'autres stigmates de traumatisme non-accidentel : examen clinique de l'ensemble des téguments, exploration de la cavité buccale, évaluation du périmètre crânien et de la courbe staturo-pondérale. Il faudra rechercher des signes évocateurs de diagnostics différentiels dont l'ostéogénèse imparfaite.

Parmi les fractures périphériques du nourrisson, il existe une entité qui va nous intéresser particulièrement dans ce contexte. Il s'agit des fractures métaphysaires classiques (CML ou Classical Metaphysal Lesion des anglosaxons). Elles concernent essentiellement le nourrisson avant 12 mois. Ces lésions sont très spécifiques de traumatisme non accidentel. En effet, le mécanisme de survenue est une torsion d'un segment de membre sur un autre, qui ne peut être imprimée que par un tiers. Il s'agit de fractures/arrachements au niveau de la périphérie de la virole d'ossification, au niveau de la plaque de croissance, donnant des images en « anse de seau » ou en « coin ». Même si la maltraitance est hautement probable, il faut se questionner sur les diagnostics différentiels potentiels. Certaines atteintes métaphysaires, médicales ou constitutionnelles, peuvent à tort être prises pour des fractures métaphysaires. Le décollement épiphysaire néonatal présente le même mécanisme, mais le contexte clinique est nettement différent de même que la sémiologie radiologique. L'atteinte est unique et très souvent symptomatique à la naissance alors que les fractures métaphysaires classiques du nourrisson sont le plus souvent multiples et asymptomatiques.

Les fractures de côtes et les fractures du crâne sont également des modes d'entrée fréquents dans la suspicion de traumatisme non accidentel. Au niveau des côtes, la localisation au niveau des arcs postérieurs, la multiplicité et le caractère contigu des fractures de même que les lésions d'âge différent sont très spécifiques de maltraitance. Pour les fractures du crâne, toute fracture sans traumatisme rapporté, les fractures complexes (traversant une suture), les fractures multiples et les fractures comminutives doivent amener à rechercher un traumatisme non accidentel. A l'instar des fractures métaphysaires, les fractures du crâne et les fractures de côtes sont le plus souvent asymptomatiques

(non douloureuses). Toute suspicion de traumatisme non accidentel sur une ou des fracture(s) périphérique(s) conduira à réaliser des radiographies de squelette complet (Cf. protocole SFIPP) qui permettra de rechercher en particulier des fractures de côtes et du crâne.

## FRACTURES ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

De plus en plus de services de radiologie s'équipent de l'intelligence artificielle (IA) et en particulier dans la détection de fractures osseuse périphériques. L'interprétation au fil de l'eau des radiographies standard n'est pas proposée dans tous les centres, loin de là. Le résultat de l'outil d'IA, couplé aux évaluations, clinique et radiologique, du médecin urgentiste et du médecin de chirurgie orthopédique pédiatrique, souvent juniors, constitue souvent la première ligne de prise en charge. L'analyse des radiographies lues par l'IA nécessite néanmoins d'être validée par un radiologue. L'outil d'IA assiste le radiologue mais ne peut se substituer à celui-ci. Pour les consultants externes des urgences, la réglementation impose de mettre à disposition un compte rendu des radiographies par un radiologue dans les 24h.

L'outil d'IA est performant pour la détection des fractures de l'adulte et de l'enfant de plus de 2 ans. A ce jour, il n'y a pas de publication chez le nourrisson. Notre expérience sur 100 bilans de radiographies de squelette réalisés dans le cadre de la maltraitance montre que l'outil ne détecte pas les fractures métaphysaires. L'outil n'est pas entraîné sur ces lésions spécifiques ni sur un os aussi peu mature que celui du nourrisson. Plus étonnamment, il est également peu performant pour les fractures diaphysaires du nourrisson alors qu'elles diffèrent peu des fractures de l'enfant.

Les outils d'IA, en plein développement, sont néanmoins déjà très performants et ils sont conçus pour ne faire que progresser. Ils détectent les fractures, les épanchements, les « anomalies focales de la trame osseuse » et désormais les luxations. Cependant, jusqu'alors, l'IA ne détecte pas les anomalies des parties molles périphériques à un os ou à une articulation. Elle ne tient pas compte non plus des informations cliniques, contrairement au radiologue qui en dispose. L'IA fait encore quelques faux positifs chez l'enfant en particulier sur les apophyses et les noyaux d'ossifications, en prenant le liseré clair du cartilage de croissance pour une fracture.

La problématique qui émerge est à quel point faire confiance à l'IA ? L'IA rend soit un résultat normal, soit affiche une zone d'intérêt. Une zone d'intérêt souligné par un trait plein correspond à une forte probabilité diagnostique ( $\geq 90\%$ ). Une zone d'intérêt soulignée par un trait pointillé correspond à une faible probabilité diagnostique ( $\geq 50\%$ ). Même lorsque le logiciel identifie une zone d'intérêt correspondant à une fracture, la marge d'erreur peut donc aller jusqu'à 10%. Il faut donc savoir rester critique sur le résultat de l'IA, notamment chez le nourrisson et ne pas succomber à la facilité de faire du copier/coller de celui-ci. L'outil fait des faux positifs comme des faux négatifs, parfois même sur des lésions très évidentes pour un radiologue. A l'heure actuelle, il paraît donc préférable, de faire l'analyse en aveugle de l'IA puis de se confronter au résultat de cette dernière.

Bientôt, il est probable que l'outil sera plus sensible que l'œil humain pour détecter certaines fractures subtiles qui, pour nous, resteront infra-radiologiques. Il n'est pas rare, dans notre expérience, que l'IA mette en doute notre propre analyse. Devrons-nous alors croire l'IA ou notre expérience ?

## CONCLUSION

Les fractures des membres des enfants sont souvent d'analyse simples ... pour un radiologue averti. De nombreuses fractures ne sont rencontrées que **chez l'enfant** et une formation spécifique est nécessaire. En effet, chez l'enfant et a fortiori chez le nourrisson, l'os est en croissance et en

maturation, présente des propriétés physiques différentes et les circonstances traumatiques sont différentes et donc forcément **les fractures sont différentes**. De plus, il existe chez l'enfant de très nombreuses variantes de la normale, en particulier de l'os en maturation.

Dans la plupart des fractures de l'enfant, la radiographie standard est suffisante. Dans quelques cas, l'échographie complémentaire est utile. Elle présente l'avantage de se faire en présence du patient, et donc guidée par la clinique, permettant entre autre une étude comparative sans réserve. L'imagerie en coupe sera indiquée en cas de **fracture pathologique** et pour les **fractures complexes**. La non-réductibilité radiologique d'une fracture doit faire suspecter **l'incarcération d'une structure radiotransparente** et doit donc être complétée par IRM. Une maladie osseuse fragilisante sous-jacente (par défaut ou excès de minéralisation) sera dépistée par une étude systématique attentive de la trame osseuse.

De nombreux pièges peuvent émailler l'interprétation des radiographies osseuses des membres de l'enfant, notamment l'existence de **structures cartilagineuses (radiotransparentes)**. La présence du cartilage de croissance métaphysaire est un élément déterminant de la particularité des fractures pédiatriques, qui dicte le pronostic fonctionnel.

Chez l'enfant non-déambulant, toute fracture d'un os long, à fortiori du fémur ou de l'humérus, doit faire **envisager l'hypothèse d'un traumatisme non accidentel**. La fracture métaphysaire classique est très spécifique de traumatisme non accidentel. Ces deux situations doivent conduire à des explorations complémentaires, dont radiologiques, en lien avec les équipes pédiatriques spécialisées pour faire le bilan.

**L'intelligence artificielle** est en plein développement dans la détection des fractures périphériques de l'enfant. Elle est performante pour **assister le radiologue** dans son interprétation et non pour faire un diagnostic définitif. Son champ d'application ne concerne actuellement pas le nourrisson. Mieux vaut interpréter les radiographies en aveugle avant de se confronter à l'IA au risque de perdre notre sens critique.

Nous avons souhaité ici identifier pourquoi l'interprétation des fractures périphériques de l'enfant peut être difficile. Nous avons proposé de les regrouper par catégories pour donner, à l'instar des items d'un compte rendu type, une check-list des sources potentielles d'erreur :

- 1- **S'agissant d'un enfant**, ne suis-je pas pris en défaut dans mon analyse ?
- 2- L'image identifiée correspond-elle à une **variante de la normale** ?
- 3- Existe-il une **fracture infra-radiologique** et, si besoin, comment puis-je l'identifier autrement ?
- 4- La fracture peut-elle concerner ou impliquer une **structure radiotransparente** ?
- 5- S'agit-il d'une **fracture pathologique** et si oui que dois-je faire ?
- 6- La fracture identifiée, **est-elle complexe** ? Justifie-t-elle d'une imagerie en coupe complémentaire ?
- 7- La question d'un **traumatisme non accidentel** doit-elle se poser ?
- 8- Le cas échéant, que dois-je penser de la confrontation de mon interprétation au résultat de **l'intelligence artificielle** ?

## BIBLIOGRAPHIE

Traumatismes ostéo-articulaires accidentels (crâne et rachis exclus) Chaumoître K, Panuel M, Petit Ph, Colavolpe N, Jouve JL In: Imagerie pédiatrique et fœtale (Dirigée par Catherine Adamsbaum) Editions Falmarion 2007 ISBN: 978-2-2571-2473-9

George MP, Bixby S. Frequently Missed Fractures in Pediatric Trauma: A Pictorial Review of Plain Film Radiography. *Radiol Clin North Am.* 2019 Jul;57(4):843-855

Jadhav SP, Swischuk LE. Commonly missed subtle skeletal injuries in children: a pictorial review. *Emerg Radiol.* 2008 Nov;15(6):391-8

Bruno MA, Walker EA, Abujudeh HH. Understanding and Confronting Our Mistakes: The Epidemiology of Error in Radiology and Strategies for Error Reduction. *Radiographics.* 2015 Oct;35(6):1668-76

Atlas of normal roentgen variants that simulate disease Keats TE, Anderson MW 9th Edition Elsevier 2013 ISBN 878-09323-07355-4

Idriz S, Patel JH, Ameli Renani S, Allan R, Vlahos I. CT of Normal Developmental and Variant Anatomy of the Pediatric Skull: Distinguishing Trauma from Normality. *Radiographics.* 2015 Sep-Oct;35(5):1585-601

Sanchez T, Stewart D, Walvick M, Swischuk L. Skull fracture vs. accessory sutures: how can we tell the difference? *Emerg Radiol.* 2010 Sep;17(5):413-8

Boyer RS, Jaffe RB, Nixon GW, Condon VR. Trampoline fracture of the proximal tibia in children. *AJR Am J Roentgenol.* 1986 Jan;146(1):83-5

Lésions squelettiques Panuel M, Chaumoître K, Petit Ph, Jouve JL In: Maltraitance chez l'enfant Rey-Salmon C, Adamsbaum C Editions Lavoisier, 2013 ISBN 978-2-257-20577-3

Evaluation rétrospective de la performance diagnostique d'un logiciel d'intelligence artificielle dans la détection de fractures périphériques chez des enfants de moins de 2 ans lors de suspicion de traumatisme non accidentel. Thèse d'exercice de Médecine. Martin R. 2023 (Directeur Prodhomme O)

Nguyen T, Maarek R, Hermann AL, Kammoun A, Marchi A, Khelifi-Touhami MR, Collin M, Jaillard A, Kompel AJ, Hayashi D, Guerhazi A, Ducou Le Pointe H. 'Assessment of an artificial intelligence aid for the detection of appendicular skeletal fractures in children and young adults by senior and junior radiologists': reply to Sammer et al. *Pediatr Radiol.* 2023 Feb;53(2):341-342

Zech JR, Ezuma CO, Patel S, Edwards CR, Posner R, Hannon E, Williams F, Lala SV, Ahmad ZY, Moy MP, Wong TT. Artificial intelligence improves resident detection of pediatric and young adult upper extremity fractures. *Skeletal Radiol.* 2024 Dec;53(12):2643-2651