

Évaluation radiographique de la minéralisation du régénérat après allongement osseux chez le lapin

Radiographic evaluation of regenerate mineralization after osseous lengthening in rabbit

Ellouze Z.¹, Ben Elhaj Bahri A.², Trigui M.¹, Aoui M.¹, Zribi W.¹, Elfeki H.², Ayadi K.¹, Keskes H.¹

¹Service de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique. Unité de Recherche d'Orthopédie et Traumatologie. Hôpital Habib Bourguiba – Sfax

²Faculté des Sciences de Sfax

CORRESPONDANCE : Dr Moez Trigui

Service de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique. Hôpital Habib Bourguiba, Route El-Aïn Km 0,5. 3029 Sfax, Tunisie.

E-mail : dr_moez_trigui@yahoo.fr.

RÉSUMÉ

La durée d'immobilisation nécessaire pour allonger et consolider un os est longue. Bien que la vitesse de distraction recommandée par la majorité des auteurs soit de 1 mm/j, des incertitudes persistent sur l'effet des vitesses rapides d'allongement osseux sur la qualité du cal.

But : Le but de cette étude était d'évaluer sur le plan radiologique l'effet de la vitesse d'allongement sur la consolidation osseuse et son efficacité et fiabilité dans l'évaluation du cal au cours de la phase de consolidation.

Matériel et Méthodes : La présente étude expérimentale a été destinée à évaluer radiologiquement le cal de distraction au cours des allongements du tibia chez le lapin en utilisant deux vitesses différentes (1,4 mm/j versus 2,1mm/j). Pour chaque animal, nous avons réalisé des clichés numérisés et analysés par ordinateur du tibia opéré de face et de profil après l'ostéotomie à J0, au cours d'allongement, en fin d'allongement (FA), puis à chaque semaine après FA pendant 5 semaines. Chacune des radiographies prises a été soumise pour évaluation quantitative du régénérat par un logiciel qui permet de calculer la densité osseuse du cal en pourcentage du niveau de gris par rapport à la densité de l'os sain et de calculer la surface du cal néoformé au niveau du gap créé. Une évaluation qualitative par deux observateurs différents et indépendants a été aussi faite.

Résultats : L'évaluation quantitative a permis de constater que pour les deux groupes de lapins, la surface du cal a augmenté avec le temps. Le comblement du defect tissulaire provoqué par la distraction était réel et constant au cours du temps pour les deux groupes. En revanche, la quantité du tissu néoformé chez les lapins du groupe d'allongement rapide était moins importante. Ce groupe avait un mauvais cal qui allongeaient la phase de consolidation avec retard d'union et de corticalisation. D'autre part, il n'y avait pas de différence significative de la forme du régénérat entre les deux groupes au cours des différentes phases d'allongement. Une différence significative dans la polarité du régénérat a été observée à partir de la deuxième semaine après la fin d'allongement. Une prédominance de la consistance striée du cal dans le groupe des allongements lents a été observée indépendamment des phases d'évolution.

Conclusion : Cette étude radiographique était en faveur d'un effet néfaste de l'application d'une vitesse rapide sur la production du tissu d'ostéogenèse dans l'espace de distraction (analyse quantitative) et sur la maturation et la différenciation du cal néoformé (analyse qualitative).

ABSTRACT

The duration of immobilization necessary to lengthen and consolidate a bone is long. Although the speed of distraction recommended by the majority of the authors is 1 mm/day, uncertainties persist on the effect of fast speeds of lengthening on the quality of the callus.

Objective: The goal of this study was to evaluate radiographically the effect of the speed of lengthening on the osseous consolidation and its effectiveness and reliability in the quality of the callus during consolidation.

Material and methods: The present experimental study was intended to evaluate radiographically the distraction callus during lengthening of the tibia in rabbit by using two different speeds (1.4 mm/j versus 2.1mm/j). For each animal, we carried out stereotypic digitized radiographs and analyzed by computer the callus after the osteotomy with J0, during lengthening, at the end of the lengthening, then at each week after during 5 weeks. Each of the radiographs were submitted for quantitative evaluation of the regenerate by software that calculates bone density of the callus expressed as a percentage of gray level compared to the healthy bone density and calculate the area of newly formed callus at the gap created. A qualitative assessment by two different and independent observers was also made.

Results: Quantitative evaluation revealed that for both groups of rabbits, the surface of the callus increased over time. The filling of the defect caused by distraction was real and constant over time for both groups. However, the amount of newly formed tissue in rabbits of the fast lengthening group was less significant. This group had a poor callus which lengthened the consolidation phase with delayed union and corticalization. On the other hand, there was no significant difference in the shape of the regenerate between the two groups during different phases of lengthening. A significant difference in the polarity of the regenerate was observed from the second week after the end of lengthening. A prevalence of the striated texture of the callus in the group of slow lengthening was observed independently of the phases of evolution.

Conclusion: This study was in favor of a harmful effect of the application of fast speed lengthening on the production of osteogenesis tissue in the space of distraction (quantitative analysis) and on the maturation and the differentiation of the newly formed callus (qualitative analysis).

I. INTRODUCTION

Les allongements des membres présentent de nombreuses indications en chirurgie orthopédique. Tout procédé d'allongement comporte deux phases distinctes : une phase de distraction osseuse et une phase de consolidation qui débute une fois la longueur d'allongement voulue est obtenue. La durée moyenne d'allongement et donc de maintien du fixateur externe en place nécessaire pour obtenir la consolidation clinique du segment allongé est généralement de 45 jours/cm allongé : c'est l'index de consolidation osseuse ou « index healing ». Cet index représente une moyenne observée en pratique courante mais ne repose sur aucune étude clinique fondée. De ce fait de nombreux auteurs ont cherché à diminuer la durée de cette période par différents procédés (stimulation mécanique, électrique ou ultrasonographique), difficiles à mettre en œuvre en pratique clinique et dont le bénéfice reste discutable, ou en agissant sur les facteurs qui exercent une influence considérable sur le cal de distraction [1, 2]. Bien que la vitesse de distraction recommandée par la majorité des auteurs soit de 1 mm/j, comme décrit par ILIZAROV, des incertitudes persistent sur l'effet des vitesses rapides d'allongement osseux sur la qualité de cal [3].

Le but de cette étude était d'évaluer sur le plan radiologique l'effet de la vitesse d'allongement sur la consolidation osseuse et son efficacité et fiabilité dans l'évaluation du cal au cours de la phase de consolidation.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

La présente étude a été destinée à évaluer radiologiquement le cal de distraction au cours des allongements du tibia chez le lapin en utilisant deux vitesses variables (1,4 mm/j versus 2,1mm/j). Pour chaque animal, nous avons réalisé un cliché de face du tibia opéré avec les articulations sus et sous-jacentes et un cliché de profil, en évitant la superposition du corps du fixateur externe avec la diaphyse tibiale (Figure 1).



Fig. 1 : Positionnement du membre pour la radiographie
Fig. 1: Member positioning for the radiography

Les clichés ont été réalisés selon les mêmes données techniques pour tous les animaux et pour toutes les séances : appareil Polymobil III Siemens ; rayonnement de 40 kvolts, 500 mA, 30 msec ; incidence crânio-caudale

avec le tibia au contact de la plaque ; film radiographique analogique de mammographie assurant une définition suffisante de l'image et permettant de visualiser à la fois le tissu osseux et le régénérat, puis numérisation à 300 dpi ; cassette : 24x30 cm tube side CURK AGFA EU cassette Made in Germany curix screens Blue C₂ ; articulations sus et sous-jacentes (genou et tibio-tarsienne) toujours incluses dans le champ ; une échelle centimétrique radio-opaque a été incluse dans le champ.

Les radiographies ont été numérisées et analysées par ordinateur. Puis une prise directe des mêmes clichés sur une cassette numérique a été réalisée (Figure 2).

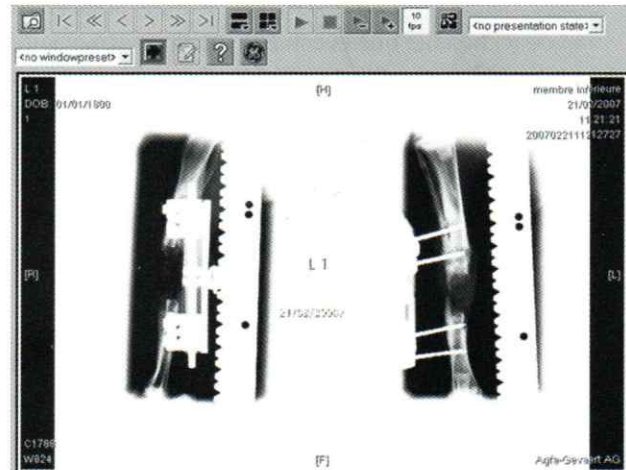


Fig. 2 : Prise des clichés sur une cassette numérique
Fig. 2: Taking of films on a numeric cassette

Pour disposer d'un maximum de fiabilité dans l'étude des images, toutes les radiographies ont été réalisées avec la même qualité de film et le même appareil radiologique que ceux utilisés pour effectuer les clichés postopératoires. Par ailleurs, on a conservé les mêmes conditions de développement des films. Le secteur d'image a été réduit au secteur du régénérat au même rapport optique que la radiographie et ajusté par éclat et contraste sur celui du film original, produisant un dossier d'image d'approximativement de 15 Méga-octet (Figure 3).

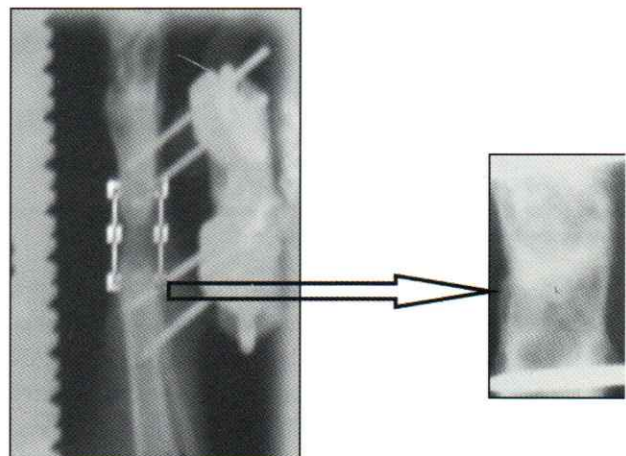


Fig. 3 : Ajustement du cal
Fig. 3: Regenerate adjustment

Une radiographie a été réalisée après l'ostéotomie à J0. Les autres radiographies ont été réalisées au cours d'allongement, en fin d'allongement (FA), puis à chaque semaine après FA pendant 5 semaines. Chacune des radi-



ographies prises a été soumise pour interprétation (évaluation quantitative et qualitative du régénérat).

L'évaluation des radiographies a été faite en deux temps :

- Dans un premier temps, une évaluation générale commence par une critique du cliché obtenu : évaluer le contraste, la position, le noircissement du film, les flous pour juger de la qualité de la radiographie et déterminer si elle est interprétable. L'évaluation du cal a été faite toujours sur deux clichés orthogonaux.

En effet, deux clichés orthogonaux permettent de visualiser les faces de l'os et d'éviter les erreurs d'interprétation. De plus, pour juger correctement l'alignement osseux, le cliché a inclus les articulations adjacentes afin de rechercher une éventuelle rotation segmentaire à l'origine d'erreur d'interprétation. Ensuite nous avons réalisé une évaluation de l'apposition des bouts osseux et de l'activité osseuse ainsi que de la minéralisation du cal et des segments osseux. Grâce au perfectionnement numérique des radiographies analogiques, le champ de visualisation a été réduit au régénérat osseux qui fera ensuite l'objet de la deuxième étape d'évaluation.

- Pour l'analyse quantitative, nous avons utilisé un logiciel qui permet de calculer la densité osseuse du cal en pourcentage du niveau de gris par rapport à la densité de l'os sain. Nous avons fait par ailleurs un calcul de la surface du cal néoformé au niveau du gap créé (Figure 4).

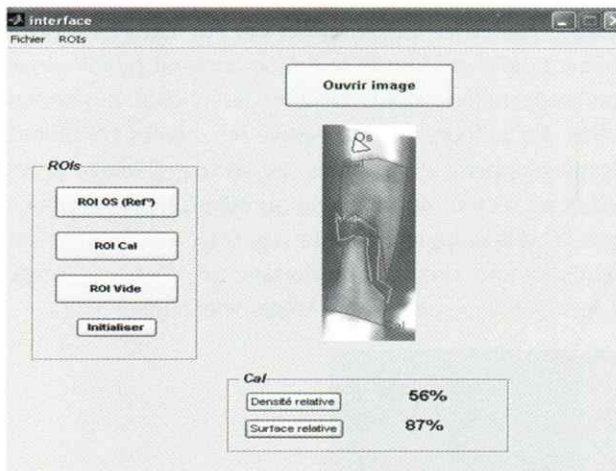


Fig. 4 : Surface globale du cal d'allongement et sa densité par rapport à la densité d'os sain

Fig. 4: Global regenerate surface and density compared with normal osseous density

L'analyse qualitative du régénérat osseux a été faite à l'aveugle, par deux observateurs différents et indépendants. Nous avons adopté la classification de DONNAN du cal osseux au cours d'allongement [4]. Les paramètres à considérer étaient la forme du cal (fusiforme, contenu, opposé ou atténué), la polarité du cal (polarisé ou non polarisé) et la consistance du cal (homogène, transparent, strié ou tacheté) (Figure 5).

Cette analyse qualitative nous a permis de recueillir 168 fiches d'évaluation du cal par observateur. Nous avons reporté toutes les données des fiches sur une feuille de calcul Epi info 3.2.2 et nous les avons exportés vers SPSS permet-

tant de visualiser toutes les informations et de réaliser le traitement statistique des données expérimentales.

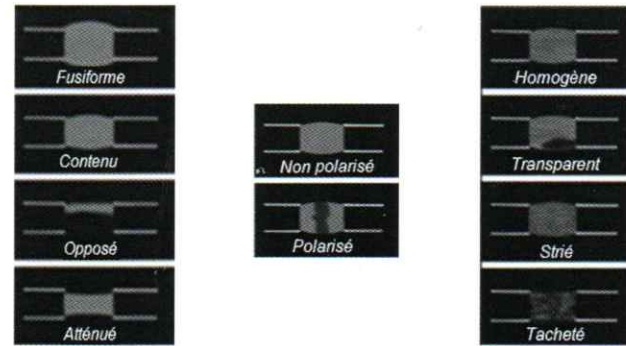


Fig. 5 : Classification de DONNAN évaluant :

La forme du cal : Fusiforme (Cal plus large que l'os d'origine) ; Contenu (Même largeur que l'os d'origine) ; Opposé (Présent uniquement sur la face opposée au fixateur) ; Atténué (Plus étroit que l'os d'origine)
La polarité du cal : Non polarisé (Pont continu entre les 2 berges de l'ostéotomie) ; Polarisé (espace radio-transparent au milieu du cal)
La consistance du cal : Homogène (Différenciation corticale et médullaire) ; Transparent (Zone ostéopénique dans les colonnes du cal) ; Strié (Colonnes longitudinales séparées par des zones radio transparentes) ; Tacheté (Petits îlots osseux non contigus entre eux)

Fig. 5: DONNAN classification evaluating :

The form of the callus: Fusiform (Callus larger than the original bone); Content (the same width than original bone); Opposite (Present only on the face forward to fixator); Attenuated (Smaller than original bone)
Callus polarity: None polarized (Continuous bridge between the 2 banks of osteotomy); Polarized (Radio-transparent gap at the middle of the callus)

Callus consistency: Homogenous (Cortical and medullar differentiation); Transparent (Osteopenic zone inside callus columns); Striated (Longitudinal columns separated by radio transparent zones); Punctuated (Small and non contiguous osseous zones)

III. RÉSULTATS

Les clichés radiographiques successifs nous ont permis d'avoir des informations continues sur le processus de consolidation osseuse dans chacun des deux groupes, en suivant les recommandations techniques précédemment exposées (Figures 6, 7). Grâce à cette technique d'imagerie médicale nous avons obtenu en tout 168 clichés ou images radiographiques.

Évaluation quantitative :

L'évaluation quantitative a été possible grâce au calcul de la surface du cal observée sur le gap d'allongement (Figure 8).

Nous avons constaté que pour les deux groupes de lapins, la surface du cal a augmenté avec le temps. Le comblement du defect tissulaire provoqué par la distraction était réel et constant au cours du temps. Cette croissance du cal néoformé était régulière et progressive pour les deux groupes. En revanche, une différence nette et constante existait dans l'évolution de la surface du cal. La quantité de tissu néoformé chez les lapins du groupe d'allongement rapide était inférieure à celle produite par les animaux du groupe d'allongement lent, toutefois la différence n'était pas statistiquement significative.

Nous avons constaté que les allongements à 2,1 mm/j donnaient un mauvais cal et allongeaient la phase de consolidation comparativement aux allongements de 1,4 mm/j. Les animaux ayant reçu la vitesse rapide accusaient un retard d'union et de corticalisation du cal néoformé sur la quasi-totalité des animaux de ce groupe.

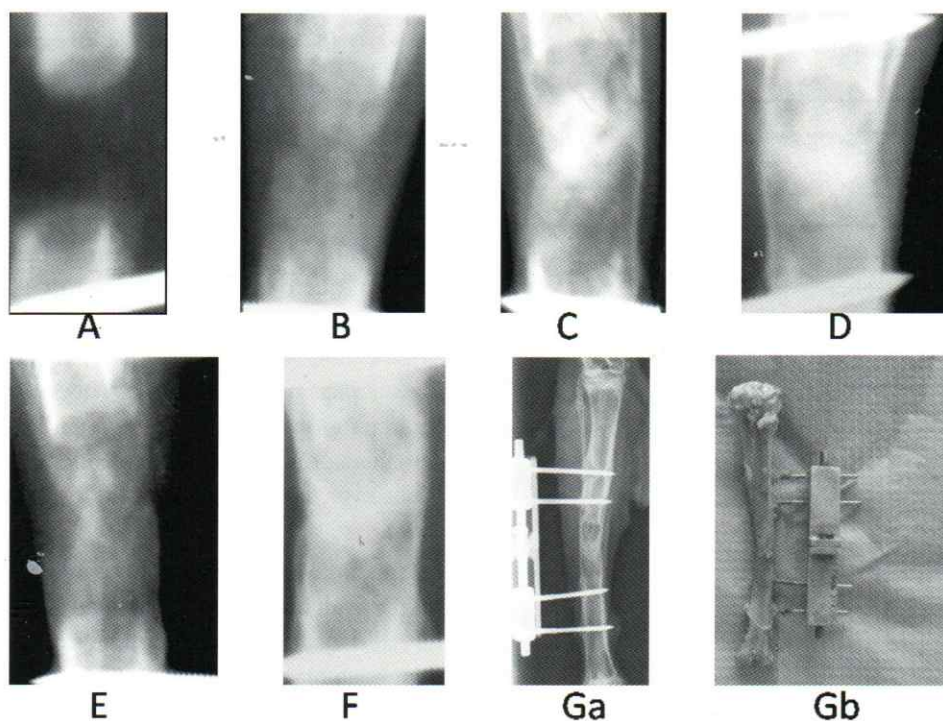


Fig. 6 : Aspects radiologiques du cal osseux chez un lapin du groupe d'allongement à vitesse lente. A : au cours d'allongement ; B : fin d'allongement (FA) ; C : 1 semaine après FA ; D : 2 semaines après FA ; E : 3 semaines après FA ; F : 4 semaines après FA ; G : 5 semaines après FA (a : aspect radiologique, b : aspect du segment osseux allongé après consolidation).

Fig. 6 : Radiographic aspects of the osseous callus in a rabbit of the group of low speed lengthening. A : during lengthening; B : at the end of lengthening; C : 1 week after end of lengthening; D : 2 weeks after end of lengthening; E : 3 weeks after end of lengthening; F : 4 weeks after end of lengthening; G : 5 weeks after end of lengthening (a : radiographic aspect, b : aspect lengthened osseous segment after healing).

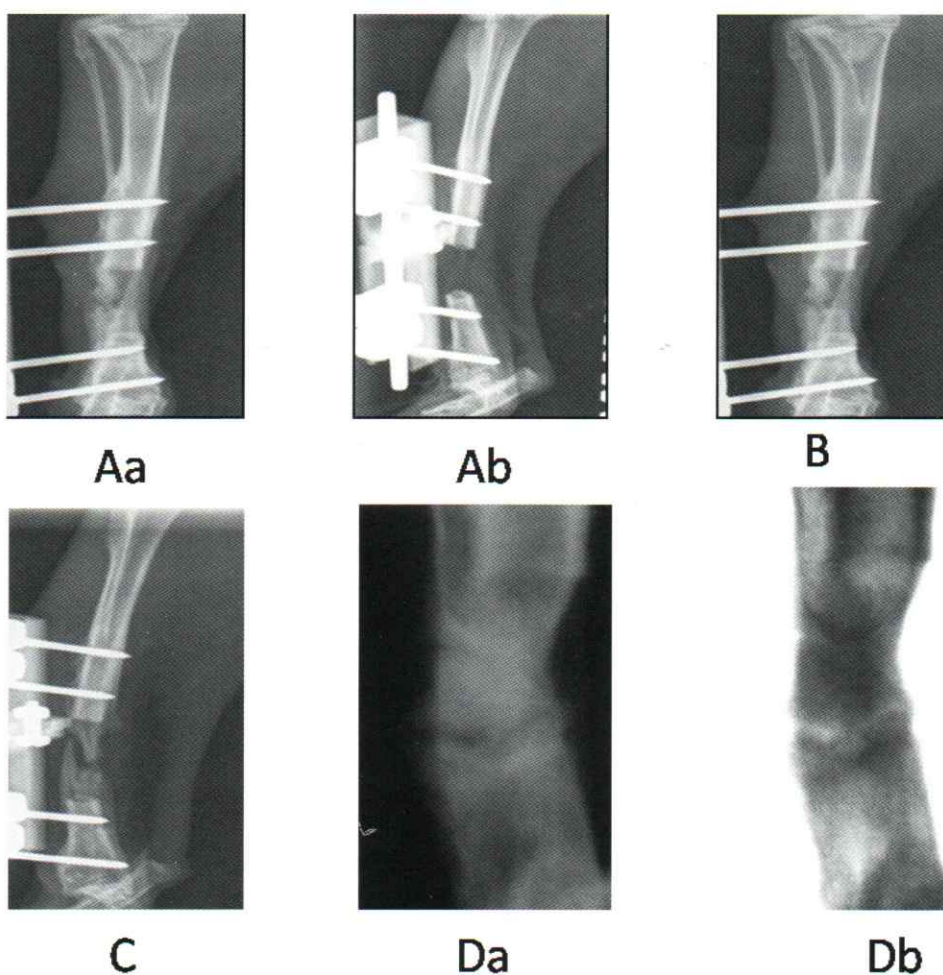


Fig. 7 : Aspect radiologique du cal osseux chez un lapin du groupe d'allongement à vitesse rapide. A : au cours d'allongement (a : face, b : profil) ; B : fin d'allongement (FA) ; C : 2 semaines après FA ; D : 5 semaines après FA (a : face, b : négatif)

Fig. 7 : Radiographic aspects of the osseous callus in a rabbit of the group of low speed lengthening. A : during lengthening (a : AP incidence, b : lateral incidence); B : at the end of lengthening; C : 2 weeks after end of lengthening; D : 5 weeks after end of lengthening (a : AP incidence, b : negative)



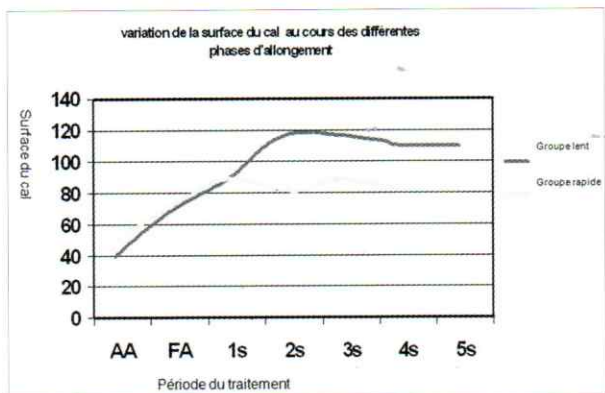


Fig. 8 : Variation de la surface du cal au cours des différentes phases d'allongement et en fonction de la vitesse

Fig. 8: Variation of the callus surface during different steps of lengthening according to lengthening speed

évaluation qualitative :

Nous avons obtenu pour chaque critère :

- En fonction de la forme du régénérat, nous avons remarqué qu'il n'y avait pas de différence significative entre les deux groupes au cours des différentes phases d'allongement (Tableau I).

Tableau II : Forme du cal en fonction de la vitesse d'allongement
Table II: Callus shape according to the lengthening speed

Forme du cal	Avant FA (p = 0,8)		FA (p = 0,36)		1 S après FA (p = 0,49)		2 S après FA (p = 0,21)		3 S après FA (p = 0,25)		5 S après FA (p = 0,22)	
	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R
Fusiforme	3	3	4	4	3	4	2	4	1	3	1	3
Contenu	2	1	3	0	3	1	3	0	2	0	2	0
Opposé	3	2	3	3	2	1	0	1	0	0	0	0
Atténué	0	1	1	3	1	0	1	0	1	0	0	0

FA : fin d'allongement, S : semaines, L : vitesse lente, R : vitesse rapide.

IV. DISCUSSION

L'intérêt princeps de l'étude radiologique du régénérat osseux d'allongement réside dans l'évaluation qualitative de la minéralisation mais également quantitative par le calcul de la surface du cal. Nos résultats radiographiques étaient en faveur d'un effet néfaste de l'application d'une vitesse rapide sur la production du tissu d'ostéogenèse dans l'espace de distraction (analyse quantitative) et sur la maturation et la différenciation du cal néoformé (analyse qualitative).

Le cliché postopératoire immédiat permet de se disposer d'une image de départ à partir de laquelle une comparaison pour juger l'avancée du processus de réparation est effectuée. Une fois le cal commence à être calcifié, les clichés sont réalisés toutes les semaines après l'ostéotomie [4-7] afin d'évaluer la progression du cal et adapter le rythme de distraction.

L'évaluation qualitative du cal nous a montré que la vitesse rapide d'allongement n'a pas entraîné d'interruption du processus physiologique d'ostéogenèse par distraction. Néanmoins la nature de ce tissu d'ostéogenèse doit être précisée. Les animaux du groupe de la cinquième semaine étaient particulièrement intéressants puisque c'était le temps le plus tardif pendant lequel la différenciation du cal est la plus avancée. Cette évaluation qualitative reste subjective et peut être à l'origine de différence

Tableau I : Résultats de la consistance en fonction de la vitesse d'allongement
Table I: Results of the consistency according to the lengthening speed

Consistance du cal	Groupe d'allongement	
	Lent	Rapide
Incomplet	2	2
Parsemé	0	5
Strié	9	4

- En fonction de la polarité du régénérat, nous avons constaté que dans les phases précoces d'allongement précisément au cours d'allongement, en fin d'allongement et une semaine après, la continuité du régénérat n'avait pas montré une différence significative entre les deux groupes. Ce n'est qu'à partir de la deuxième semaine après la fin d'allongement qu'on a commencé à observer une différence entre les deux groupes (p < 0,05).
- En fonction de la consistance, nous avons remarqué qu'il y avait une prédominance de la consistance striée du cal dans le groupe des allongements lents et ce indépendamment des phases d'évolution. Cette consistance striée témoigne indirectement de la maturation du cal (Tableau II).

d'évaluation en fonction du lecteur et de son expérience. C'est pourquoi il est intéressant de faire un suivi radiographique régulier pour juger de l'évolution des images dans le temps [4]. En plus, la radiographie nous a permis de détecter quasiment toutes les complications intervenant au cours de l'allongement (fractures, réactions périostées, défaut d'alignement, déminéralisation). Les observateurs ont lu toutes les radiographies sans avoir connaissance de l'avancement de l'allongement, et peu de différence ont été notées dans leurs évaluations car des critères objectifs ont été prédéfinis par une échelle.

Plusieurs systèmes de classification radiographique du cal osseux ont été rapportés [4, 7-10]. CATAGNI [8] a rapporté son évaluation radiologique de régénérat osseux pendant la distraction avec un appareillage d'ILIZAROV basée sur une étude clinique de plus de 800 cas d'allongement de membre. Sa classification du régénérat osseux pendant l'allongement osseux en normotrophique, hypertrophique et hypotrophique a montré la nécessité de contrôler soigneusement les caractéristiques du site ou l'emplacement de la régénération qui peut influencer le résultat final d'allongement. Bien que cette classification ait fourni une grande efficacité dans les domaines de prédiction des problèmes d'ostéogenèse, elle ne tenait pas compte de la réponse osseuse due à l'âge du patient, à la



nature de l'os allongé, au site d'ostéotomie et à la pathologie en cause [11, 12].

HAMANISHI et al. [9] ont essayé d'aborder la question de l'aspect radiologique du cal et son rapport avec l'index de guérison (mois/cm de longueur gagné). Leur classification en 6 grades de forme de régénérat a été employée pour classer des segments osseux à des temps non spécifiques pendant l'allongement, l'intervalle d'âge était large (9-51 ans) et non défini, les os allongés étaient divers (17 fémurs, 7 tibias, 2 radius, 1 cubitus, 1 humérus, 1 métatarse) et ainsi le site d'ostéotomie était variable et a inclus 6 distractions épiphysaires.

Toutes ces études ont permis d'affirmer que l'aspect du cal osseux ne permettait pas de prédire de manière absolue l'évolution du cal à terme. Nous ne pouvons donc pas considérer ces critères comme étant prédictifs de l'évolution du cal ou de l'index de guérison. Par contre, ils permettent de détecter des retards de consolidation ou des complications, et sont donc de bons indicateurs pour le suivi de l'allongement.

Nous pensons qu'une classification reproductible doit être simple, se basant sur la continuité du cal. Parmi 5 classifications, nous avons adopté la classification de DONNAN [4] qui tient compte de la forme, de la polarité et de la consistance du cal. DONNAN estime par ailleurs, que ces trois groupes définissent aux mieux la qualité et la quantité du régénérat.

Dans notre expérience, l'étude de la continuité du régénérat nous a permis de déterminer une date « seuil » à partir de laquelle on peut prévoir la qualité du cal final. Cette date correspondait à la 2^{ème} semaine après la fin d'allongement.

La radiographie semblerait être un bon moyen de mesure de l'espace de distraction puisqu'elle permet une vue globale de l'os. Néanmoins, cette mesure doit prendre en compte un facteur d'agrandissement du fait que la taille de l'objet réel n'est pas la même que la taille de l'objet sur la radiographie. C'est pourquoi nous avons inclus une échelle centimétrique radio-opaque (réglette) dans le champ servant de référence afin d'avoir des mesures exactes. En partant de l'idée que l'opacité aux rayons X du tissu osseux est liée à sa charge aux minéraux, on peut donc envisager d'évaluer la minéralisation par la mesure du niveau de gris. Ce qui nous a permis de suivre l'évolution de la surface du cal. La radiographie dans l'évaluation de la réparation osseuse est peu onéreuse, rapide, largement répandue, facilement accessible et c'est la technique qui procure la meilleure résolution spatiale. Cependant, cette technique n'a pas répondu à l'attente des praticiens du fait de nombreuses causes d'erreurs dues à la mesure physique et à l'interprétation subjective. Elle ne donne que des renseignements vagues sur le processus histologique de la cicatrisation. Elle ne permet pas d'éviter les superpositions du matériel d'allongement. Dans tous les cas, dès qu'une image anormale est constatée sur une vue, il faut réitérer la radiographie sous une autre incidence afin de voir s'il s'agit d'un artéfact de position ou dû au matériel ou une réelle anomalie. C'est pourquoi nous avons préféré d'anesthésier l'animal afin de faciliter la prise des

clichés et de limiter le nombre de manipulateurs soumis aux rayonnements secondaires.

Il est aussi difficile de décider de la date de retrait du fixateur. C'est pourquoi il paraît intéressant de numériser ces radiographies afin de pouvoir les agrandir, améliorer leurs détails et faciliter leur interprétation [4]. Par ailleurs, le développement des radios numériques a apporté un avantage indéniable à cet examen : l'analyse devient particulièrement précise grâce à l'application de filtres, aux options de manipulation (zoom, mesures de distances ou d'angles) et aux comparaisons possibles entre niveaux de gris. KOLBECK et al. [13] ont décrit une échelle de gris basée sur la comparaison entre la région d'intérêt du cal d'allongement et l'aspect radiographique d'une feuille d'aluminium. Cette échelle permet d'obtenir une évaluation densitométrique, laquelle est fortement corrélée aux propriétés biomécaniques du cal d'allongement.

La tomодensitométrie donne une meilleure valeur objective de la concentration minérale osseuse que la radiographie. La radiographie présente donc de nombreuses limites. Néanmoins elle reste très utilisée dans le suivi des allongements osseux car elle est simple d'utilisation par rapport aux autres moyens (surtout en médecine vétérinaire où l'absorptiométrie et l'échographie osseuse sont peu répandues), et permet un suivi correct de l'alignement et de la formation du cal et de sa différenciation lorsqu'il devient minéralisé. Il pourrait être intéressant de proposer dans l'avenir une comparaison entre les techniques d'imagerie disponibles.

V. RÉFÉRENCES

- Mizumoto Y., Moseley T., Drews M., Cooper V.N., Reddi A.H. Acceleration of regenerate ossification during distraction osteogenesis with recombinant human bone morphogenetic protein-7. *J Bone Joint Surg* 2003; 85A:124-30.
- Shimazaki A., Inui K., Azuma Y., Nishimura N., Yamano Y. Low-intensity pulsed ultrasound accelerates bone maturation in distraction osteogenesis in rabbits. *J Bone Joint Surg* 2000; 82B:1077-82.
- Al Ruhaimi K.A. Comparison of different distraction rates in the mandible: an experimental investigation. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2001; 30:220-7.
- Donnan, L.T., Saleh M, Rigby AS, MC Andrew A. Radiographic assessment of bone formation in tibia during distraction osteogenesis. *J Pediatr Orthop* 2002; 22:645-51.
- Vade A., Eissenstat R. Radiographic features of bone lengthening procedures. *Radiology* 1990; 174:531-7.
- Young J.W., Kovelman H., Resnik S., Paley D. Radiologic assessment of bones after Ilizarov procedures. *Radiology* 1990; 177:89-93.
- Minty I., Maffulli N., Hughes T.H. Radiographic features of limb lengthening in children. *Acta Radiol* 1994; 35:555-9.
- Catagni M. Imaging techniques: the radiographic classification of bone regenerate during distraction. *Operative principles of Ilizarov*. London 1991; Williams & Wilkins, pp:53-7.
- Hamanishi C., Yasuwaki Y., Kikuchi H. Classification of the callus in limb lengthening: radiographic study of 35 limbs. *Acta Orthop Scand* 1992; 63:430-3.
- Orbay J.L., Frankel V.H., Finkle J.E. Canine leg lengthening by the Ilizarov technique: a biomechanical, radiologic, and morphologic study. *Clin Orthop* 1992; 278:265-73.
- Aronson J., Shen X. Experimental healing of distraction osteogenesis comparing metaphyseal with diaphyseal sites. *Clin Orthop Relat Res* 1994; 301:25-30.
- Fischgrund J., Paley D., Suter C. Variables affecting time to bone healing during limb lengthening. *Clin Orthop Relat Res* 1994; 301:31-7.
- Kolbeck S., Bail H., Weiler A., Windhagen H., Haas N., Raschke M. Digital radiography predictor of regenerate bone stiffness in distraction osteogenesis. *Clin Orthop Relat Res* 1999; 366:221-8.

