

Correction simultanée des déviations angulaires proximales du tibia associée au traitement de la rupture du ligament croisé crânial par ostéotomie chez le chien

Dr Sanspoux Frédéric

frederic.sanspoux@sirius.vet

CES de Traumatologie Ostéo-articulaire et Orthopédie Animales

DIU de Prise en Charge des Infections Ostéoarticulaires

BioMedtrix Universal Hip Certification Program

Clinique Sirius, 2 Rue de Bourdelas – 87270 Couzeix



Table des matières

Introduction.....	3
Anatomie et biomécanique	3
Rappels sur l'axe mécanique du tibia	3
Définition et mesure des angles de référence : TPA, mMPPTA, mMDTA.....	5
Impact des déformations angulaires et torsionnelles sur la poussée tibiale crâniale et la fonction du ligament croisé.....	6
Diagnostic et planification préopératoire.....	6
Examen orthopédique et évaluation de la LMR associée	6
Imagerie : radiographies (vues orthogonales), planification CORA, intérêt du scanner 3D.....	6
Stratégie chirurgicale adaptée en fonction du type de déformation	10
TPLO-TCO (TPLO-Transverse Corrective Osteotomy).....	10
TTO modifiée (Triple Tibial Osteotomy modifiée)	11
TPLO-MCCWO (TPLO-Medial Crescentic Closing Wedge Osteotomy)	11
TPLMOCO (Tibial Plate Leveling Medial Opening Crescentic Osteotomy).....	12
Résultats cliniques et complications	14
Taux de consolidation et complications chirurgicales	14
Discussion	15
Références bibliographiques	18

Introduction

La rupture du ligament croisé crânial (LCCr) représente la cause la plus fréquente de boiterie du membre pelvien chez le chien. En tant que principal stabilisateur de l'articulation du grasset, sa rupture entraîne une instabilité articulaire caractéristique (2, 4, 7). L'insuffisance du LCCr est un problème clinique majeur qui peut survenir en présence de déformations tibiales proximales dans le plan frontal (varus ou valgus tibial), de torsion tibiale, d'un angle du plateau tibial excessif (eTPA), ou de luxation médiale de la rotule (LMR) (1, 2, 4, 7).

La rupture du LCCr se manifeste par une translation tibiale crâniale excessive, résultant d'une poussée tibiale crâniale générée par la mise en charge sur le plateau tibial incliné (1, 2, 4, 7). Les déformations angulaires tibiales, même en l'absence de rupture du LCCr, peuvent entraîner une maldistribution des forces à travers les articulations adjacentes (1, 3) et un mauvais alignement articulaire (3). Des études expérimentales sur les déformations angulaires du tibia proximal ont démontré des contraintes et un chargement anormal des stabilisateurs du grasset et du cartilage articulaire (1, 4, 8). Ces anomalies mécaniques sont corrélées à la sévérité de l'arthrose chez l'homme (1, 6, 8), et il est suggéré qu'un *genu varum* (associé à la *tibia vara*) peut prédisposer à l'arthrose du compartiment médial (4, 8), tandis qu'un *genu valgum* pourrait entraîner l'érosion du cartilage du compartiment latéral (6, 8).

L'ostéotomie de nivellement du plateau tibial (TPLO) est une procédure couramment utilisée pour neutraliser la poussée tibiale crâniale (1, 7). Cependant, les corrections angulaires ou de torsions majeures par TPLO seule sont limitées, car elles peuvent entraîner une perte d'apposition osseuse et compromettre la stabilité de l'ostéotomie (1, 6, 7). Pour les déformations importantes, il est nécessaire d'effectuer des ostéotomies multiples (7) ou des procédures combinées pour corriger simultanément la pente tibiale et l'angulation frontale/torsionnelle (1).

Compte tenu de l'incidence élevée et de la complexité biomécanique des déformations tibiales coexistantes, l'objectif de cette revue de littérature est de détailler la prise en charge complète de la rupture du LCCr associée à ces anomalies. Nous commencerons par un rappel des bases anatomiques et biomécaniques des axes tibiaux, pour ensuite décrire les protocoles diagnostiques et les méthodes de planification préopératoire. Enfin, nous présenterons une analyse détaillée des différentes options chirurgicales combinées (TPLO-TCO, TTO modifiée, TPLO-MCCWO, TPLMOCO et utilisation des guides de coupe 3D), leurs résultats cliniques, leurs complications et les perspectives d'innovation.

Anatomie et biomécanique

Rappels sur l'axe mécanique du tibia

L'évaluation précise des déformations angulaires du tibia est un prérequis essentiel à toute planification chirurgicale, en particulier en utilisant la méthodologie du Centre de

Rotation de l'Angulation (CORA) (2, 7, 8). L'évaluation des déviations angulaires repose sur la détermination de l'axe mécanique (MA) du tibia, défini comme la ligne droite connectant les centres de ses articulations proximale et distale. Chez le chien, les repères spécifiques de l'axe mécanique, mesurés sur des vues radiographiques crâniocaudales (plan frontal), sont définis comme : un point au centre de l'aspect le plus proximal de la fosse intercondylienne du fémur (pour le repère proximal), et le point le plus distal de l'os sous-chondral de la crête tibiale intermédiaire distale (pour le repère distal). La connaissance de la relation entre cet axe mécanique et les surfaces articulaires adjacentes est fondamentale pour la quantification des déviations (2).

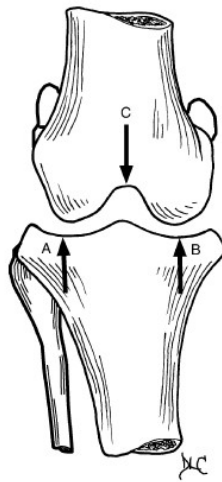


Figure 1 : Repères pour la ligne d'orientation articulaire proximale du tibia dans le plan frontal : les points les plus distaux des condyles tibiaux médial (flèche « B ») et latéral (flèche « A »). Repère proximal pour l'axe mécanique du tibia : centre de la partie la plus proximale de la fosse intercondyalaire du fémur (flèche « C »). Référence 2.

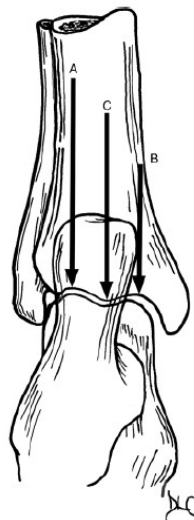


Figure 2 : Repères pour la ligne d'orientation articulaire distale du tibia dans le plan frontal : les points les plus proximaux des sillons arciformes médial (flèche « B ») et latéral (flèche « A ») de la trochlée tibiale. Repère distal pour l'axe mécanique du tibia : crête intermédiaire distale du tibia (flèche « C »). Référence 2.

Définition et mesure des angles de référence : TPA, mMPTA, mMDTA

Trois angles radiographiques sont particulièrement critiques pour évaluer la conformation tibiale et guider la correction des déformations (2, 7, 8) :

- L'Angle du Plateau Tibial (TPA) est mesuré sur une vue radiographique médio-latérale du grasset et sert à quantifier la pente tibiale (2, 4, 7, 8). L'objectif de la TPLO est de neutraliser la poussée tibiale crâniale en nivelant le plateau tibial à une pente postopératoire cible, généralement de 5° à 6° (4, 7, 8).
- L'Angle Tibial Proximal Médial Mécanique (mMPTA) mesure l'angulation de la partie proximale du tibia par rapport à l'axe mécanique (2, 7, 8). L'intervalle de référence normal pour les chiens atteints de rupture du LCCr est rapporté entre 89,7° et 96,9° (2, 8). Une valeur de mMPTA supérieure à 97° est considérée comme indicatrice d'une déformation en valgus tibial proximal (2, 8). Les mMPTA préopératoires moyens dans les cas de valgus sont fréquemment supérieurs à 100°, atteignant 101° (8), 99,5° (2) ou même 109° dans un cas clinique détaillé (7).
- L'Angle Tibial Distal Médial Mécanique (mMDTA) est l'angle mesuré distalement, utilisé pour évaluer l'alignement distal du tibia (2, 8). L'intervalle de référence normal est de 90,6° à 101,4° (2, 8).

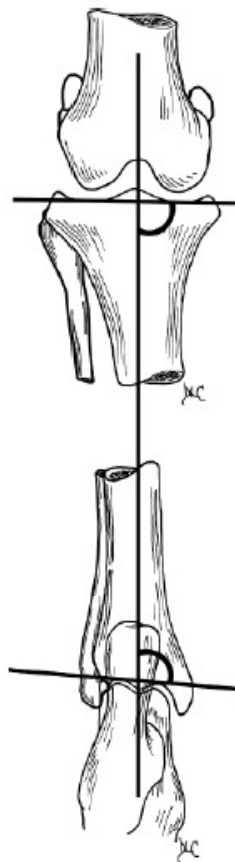


Figure 3 : Angles entre l'axe mécanique et les lignes d'orientation articulaire, mesurés sur les aspects proximomédial et distomédial des lignes d'orientation articulaire afin de déterminer le mMPTA (angle supérieur) et le mMDTA (angle inférieur). Référence 2.

Impact des déformations angulaires et torsionnelles sur la poussée tibiale crâniale et la fonction du ligament croisé

Les déformations angulaires et torsionnelles associées à la rupture du LCCr compliquent l'instabilité et altèrent la biomécanique du grasset (7, 8). Les déformations angulaires tibiales provoquent une maldistribution des forces à travers les articulations adjacentes (2, 3), ce qui peut générer des contraintes et un chargement anormal sur les stabilisateurs et le cartilage articulaire (2, 4, 8). Chez le chien, un genu varum (souvent lié à un tibia vara) peut prédisposer à l'arthrose du compartiment médial (8), tandis qu'un genu valgum (valgus tibial proximal) est associé à une érosion du cartilage du compartiment latéral (4, 7, 8). La torsion tibiale sévère était d'ailleurs présente chez 68,4 % des membres présentant des déformations complexes dans une série de cas (8). Cependant, la présence de torsion rend la quantification précise des déformations frontales difficile sur les radiographies standard, qui ne fournissent qu'une représentation bidimensionnelle d'une anomalie tridimensionnelle (2, 7). Par conséquent, lorsque la torsion est présente, l'évaluation et la correction des déformations angulaires reposent souvent sur une estimation grossière préopératoire et une évaluation intraopératoire à l'aide de fils guides (2, 8).

Diagnostic et planification préopératoire

Examen orthopédique et évaluation de la LMR associée

L'évaluation des chiens présentant une rupture du LCCr associée à des déformations tibiales complexes commence par un examen orthopédique complet, qui vise à enregistrer la boiterie (gradée de 0 à 5) (6), la stabilité articulaire (tiroir crânial et poussée tibiale crâniale) (7, 8) et la conformation du membre (7, 8). L'amplitude des déformations angulaires et torsionnelles est initialement évaluée par un examen clinique et une évaluation brute (8). La LMR est une affection fréquemment associée, présente dans 57,9 % des cas complexes selon une étude (8) et 55,6 % selon une autre (6), et sa présence ainsi que son grade doivent être consignés (6, 8). Lorsqu'une LMR de grade III ou IV est notée, des radiographies centrées sur le fémur sont recommandées pour identifier une possible déformation en varus ou valgus du fémur distal (8).

Imagerie : radiographies (vues orthogonales), planification CORA, intérêt du scanner 3D

La radiographie constitue l'outil de première intention pour l'évaluation des déformations angulaires et la planification chirurgicale (2, 7, 8). Des vues orthogonales (crâniocaudales et médiolatérales) permettent de mesurer les angles de référence et de définir la stratégie de correction selon la méthodologie du CORA, qui recommande une correction réalisée au niveau du centre de déviation (2, 7, 8).

Les mesures standardisées incluent le TPA, avec un objectif postopératoire situé entre 5° et 6° (4, 7, 8), ainsi que les angles mécaniques dans le plan frontal. Le mMPTA

présente une plage normale de $89,7^{\circ}$ à $96,9^{\circ}$, et une valeur supérieure à 97° indique un valgus tibial proximal. Le mMDTA varie entre $90,6^{\circ}$ et $101,4^{\circ}$, et permet d'évaluer l'alignement distal. Le calcul de la correction repose généralement sur une valeur de référence médiane de $92\text{-}93^{\circ}$ pour le mMPTA (2, 8).

Toutefois, l'imagerie bidimensionnelle reste limitée pour apprécier les anomalies tridimensionnelles, notamment en cas de torsion tibiale (2, 7, 8). Dans ces situations, la planification peut nécessiter une évaluation peropératoire par fils guides et observation visuelle (2, 8). Le recours au scanner, considéré comme l'examen de référence, permet une analyse tridimensionnelle précise et peut être complété par la création de modèles stéréolithographiques (impression 3D) pour simuler et affiner la correction chirurgicale (7, 8).



Figure 4 : Exemples de projections radiographiques préopératoires. (A) Vue craniocaudale : aspect global du tibia montrant une LMR et une déviation en valgus proximal. (B) Vue médiolatérale : utilisée pour l'évaluation du TPA, non représenté ici. (C) Détermination des axes mécaniques : l'angle mécanique tibial proximal médial (mMPTA) est mesuré à 100° , au-dessus de la plage de référence ($89,7\text{--}96,9^{\circ}$), confirmant un valgus tibial proximal marqué. L'angle mécanique tibial distal médial (mMDTA) est de 92° , valeur comprise dans la plage de référence normale ($89,4\text{--}101,4^{\circ}$). (D) Comparaison entre les angles mesurés et les valeurs de référence : la différence entre le mMPTA mesuré (100°) et la valeur de référence (92°) indique une déformation en valgus de 8° , localisée au niveau proximal du tibia. Cette quantification a guidé la planification chirurgicale, la correction étant prévue à hauteur du CORA identifié. Référence 8.

L'utilisation de l'impression tridimensionnelle a récemment permis de franchir une nouvelle étape dans la planification et la réalisation des ostéotomies correctrices. L'étude de Jeon et al. décrit la conception et l'emploi de guides chirurgicaux personnalisés imprimés en 3D, destinés à la correction des déformations tibiales chez les chiens de petit format. Ces guides, conçus à partir des données tomodensitométriques et d'un modèle stéréolithographique, permettent de matérialiser précisément les plans de coupe, de réduction et de compression avant la chirurgie.

Les corrections obtenues ont montré une exactitude remarquable, avec un écart moyen entre l'angle prévu et l'angle postopératoire inférieur à 3° sur les trois plans de l'espace (sagittal, frontal et transverse). Ce degré de précision a conduit à une correction complète des déformations et à une récupération fonctionnelle jugée excellente dans la majorité des cas, sans nécessité de réintervention. Ces résultats confirment l'intérêt croissant de la planification assistée par ordinateur et des dispositifs 3D personnalisés, qui offrent une reproductibilité accrue et une marge d'erreur considérablement réduite lors des corrections osseuses complexes (5).

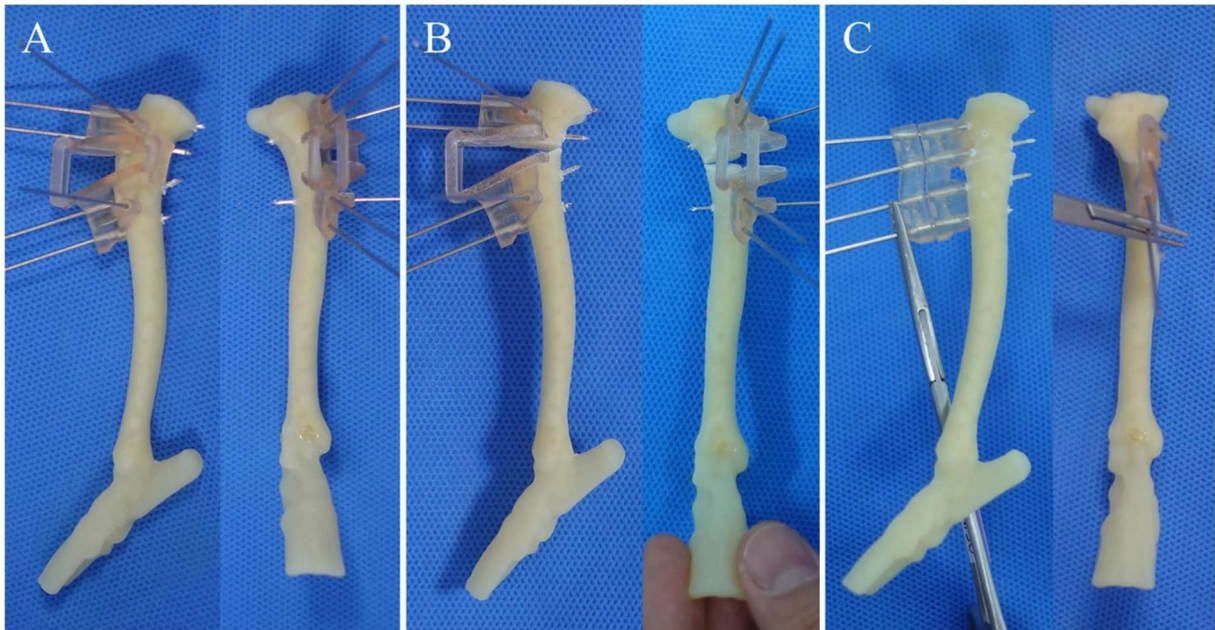


Figure 5 : Chirurgie d'essai utilisant un modèle tibial imprimé en 3D et des guides personnalisés chez le cas 4. A — Après la mise en place du guide d'ostéotomie à l'emplacement prévu, des broches de Kirschner temporaires et définitives ont été insérées à travers les manchons du guide d'ostéotomie. B — Le coin osseux a été retiré après la réalisation de l'ostéotomie. C — Après le retrait des ponts, des broches temporaires et des guides d'ostéotomie, les broches de fixation définitives ont été insérées à travers les guides de réduction et de compression. La broche la plus proximale était parallèle aux autres broches du guide de réduction, tandis qu'après application du guide de compression, elle était légèrement courbée proximale, conformément à l'orientation oblique prévue pour obtenir une compression interfragmentaire. La correction du valgus, de la torsion et la réduction de l'angle du plateau tibial ont été réalisées simultanément. Des pinces hémostatiques de type mosquito ont été utilisées pour empêcher la dislocation du guide de compression. Référence 5.

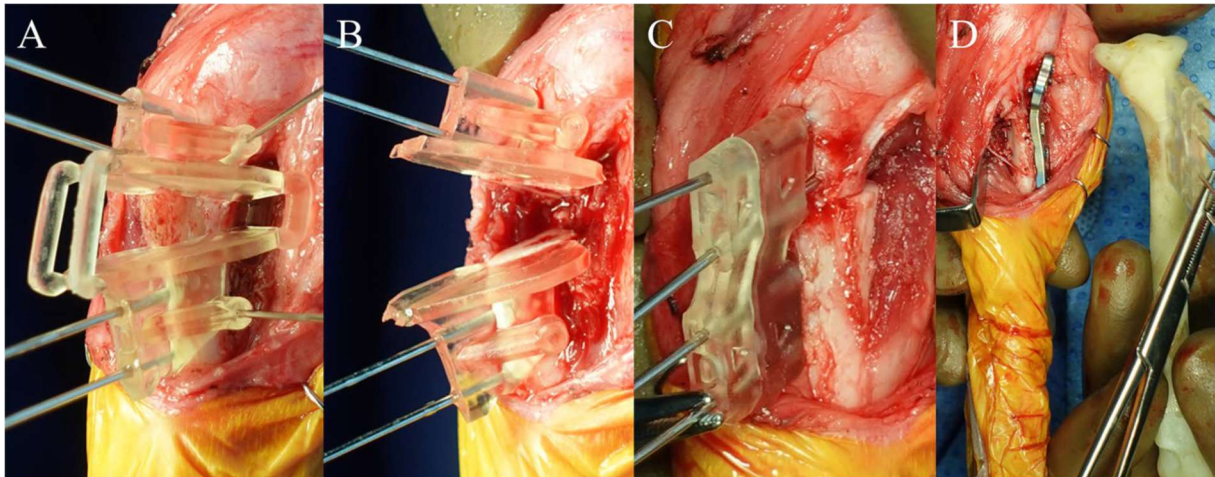


Figure 6 : Images peropératoires d'une correction tibiale biplanaire avec correction de torsion chez le cas 4. A — Le guide d'ostéotomie est fixé à l'aide de deux broches de Kirschner de 0,8 mm et de quatre broches de 1,0 mm. B — Après la réalisation complète de l'ostéotomie, les ponts fins du guide ainsi que les broches temporaires de fixation sont retirés. C — Les déformations tibiales sont corrigées en alignant les broches avec les guides de réduction et de compression. La broche la plus proximale est légèrement courbée vers le haut, comme lors de la chirurgie d'essai. D — L'ostéotomie est stabilisée à l'aide d'une plaque de TPLO de 1,5/2,0 mm. Référence 5.

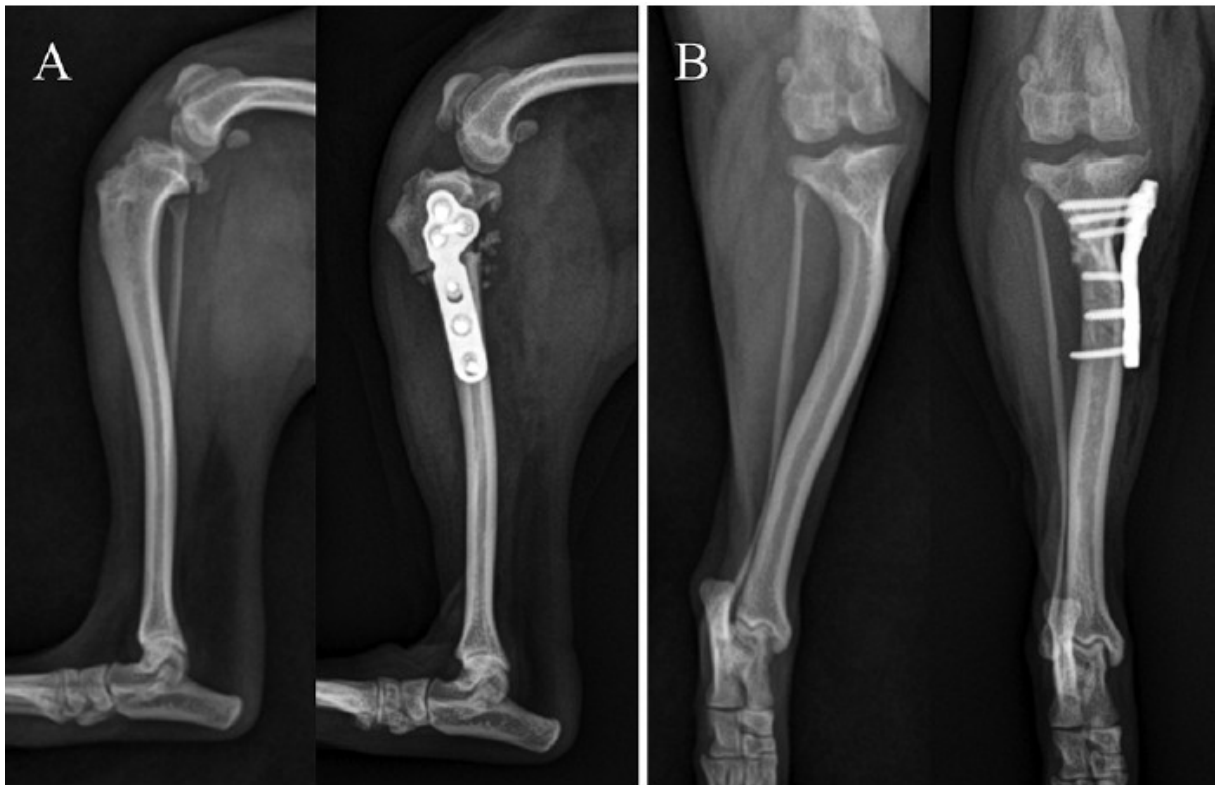


Figure 7 : Radiographies pré- et postopératoires du cas 4 (A et B) après correction biplanaire et torsionnelle du tibia, et tomodynamométrie du cas 3 (C et D) après correction d'un TPA excessif (eTPA) et de la torsion. A — Une diminution du TPA est observée sur les vues médio-latérales. Des autogreffes spongieuses ont été prélevées à partir du coin osseux retiré. B — La correction du valgus tibial proximal et de la torsion est visible sur les vues crânio-caudales. Référence 5.

Stratégie chirurgicale adaptée en fonction du type de déformation

La stratégie chirurgicale est déterminée par la combinaison des déformations présentes (7,8). Lorsque la déformation angulaire est sévère, des ostéotomies multiples ou combinées sont nécessaires, car la TPLO standard seule ne permet pas de corriger l'ensemble des anomalies et risquerait de compromettre l'apposition osseuse (6,7,8). Ces techniques incluent notamment l'association d'une TPLO à une ostéotomie correctrice transversale, décrite pour traiter des déformations complexes (8). Pour corriger spécifiquement un valgus tibial proximal, une approche validée consiste en une TPLO modifiée associée à une Medial Crescentic Closing Wedge Osteotomy (MCCWO) (7). La correction de la torsion tibiale est généralement réalisée visuellement au niveau de l'ostéotomie transversale, en ajustant l'alignement du segment distal avant fixation (2, 8). Enfin, lorsqu'une LMR est associée, elle est prise en charge simultanément, le plus souvent par une transposition de la tubérosité tibiale (TTT) effectuée sur le site de l'ostéotomie transversale (5, 7).

TPLO-TCO (TPLO-Transverse Corrective Osteotomy)

La technique combinant la TPLO et une ostéotomie correctrice transversale a été décrite pour le traitement des déformations tibiales proximales complexes, incluant varus, valgus, pente tibiale excessive (eTPA), torsion et LMR. La correction angulaire est obtenue en retirant un coin osseux et en refermant le gap créé. L'ostéotomie est stabilisée par une plaque TPLO standard avec vis verrouillées. Les résultats à long terme rapportés font état d'une amélioration clinique marquée et d'un haut niveau de satisfaction des propriétaires. Le délai moyen de consolidation radiographique était d'environ 10,4 semaines. Toutefois, des complications postopératoires ont été observées dans 21 % des membres opérés, toutes classées comme majeures car nécessitant une réintervention chirurgicale. Parmi celles-ci figuraient un desserrement ou une rupture d'implant (5,3 %), un sérome persistant (5,3 %), une arthrite septique (5,3 %) et une infection du tibia proximal (5,3 %) (8).

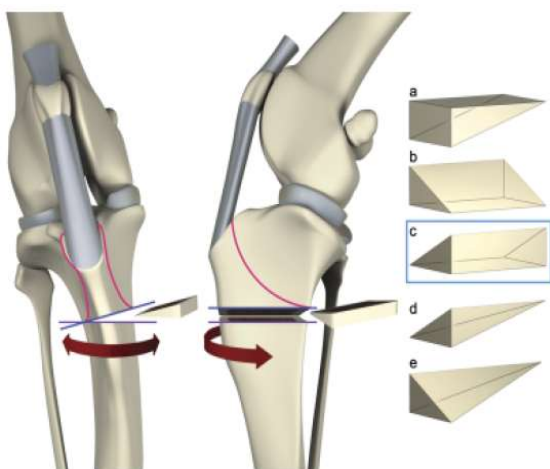


Figure 8 : Représentation schématisée d'une déformation en valgus du tibia proximal et de son traitement par TPLO associée à une seconde ostéotomie transversale coplanaire médiale en coin fermé. L'ostéotomie transversale est réalisée au niveau du bord caudal de l'ostéotomie radiale de la TPLO. L'encart (c) illustre le segment coplanaire médial en coin fermé retiré du tibia [d'autres segments peuvent être retirés selon le type de déformation angulaire tibiale proximale présent : (a) coin fermé coplanaire crânial, (b) coin fermé coplanaire latéral, (d) coin fermé biplanair médial et crânial, et (e) coin fermé biplanair latéral et crânial]. La torsion tibiale est corrigée au niveau de cette ostéotomie transversale (perpendiculaire à l'axe longitudinal du tibia) par rotation du tibia distal, sans limitation de l'ampleur de la rotation (flèches). Un contact osseux complet est obtenu à tous les niveaux d'ostéotomie (TPLO-TCO, avec ou sans correction de la torsion tibiale). Référence 8.

TTO modifiée (Triple Tibial Osteotomy modifiée)

La TTO modifiée combine un nivellement partiel du plateau tibial et un avancement de la tubérosité tibiale avec une ostéotomie cunéiforme fermée biplanaire destinée à corriger le valgus. Elle est particulièrement indiquée dans les cas où une LMR est associée, car la transposition de la crête tibiale peut être réalisée sans interférer avec la fixation de la plaque médiale. Dans la série rapportée, le mMPTA moyen est passé de 99,5° en préopératoire à 91,5° en postopératoire. La principale limite de cette technique est un taux élevé de fracture de l'extrémité distale de la crête tibiale, survenant dans 55,6 % des cas, le plus souvent en peropératoire. Enfin, la localisation de l'ostéotomie médiale en coin n'est pas basée sur le CORA, ce qui peut entraîner une translation d'axe postopératoire (6).

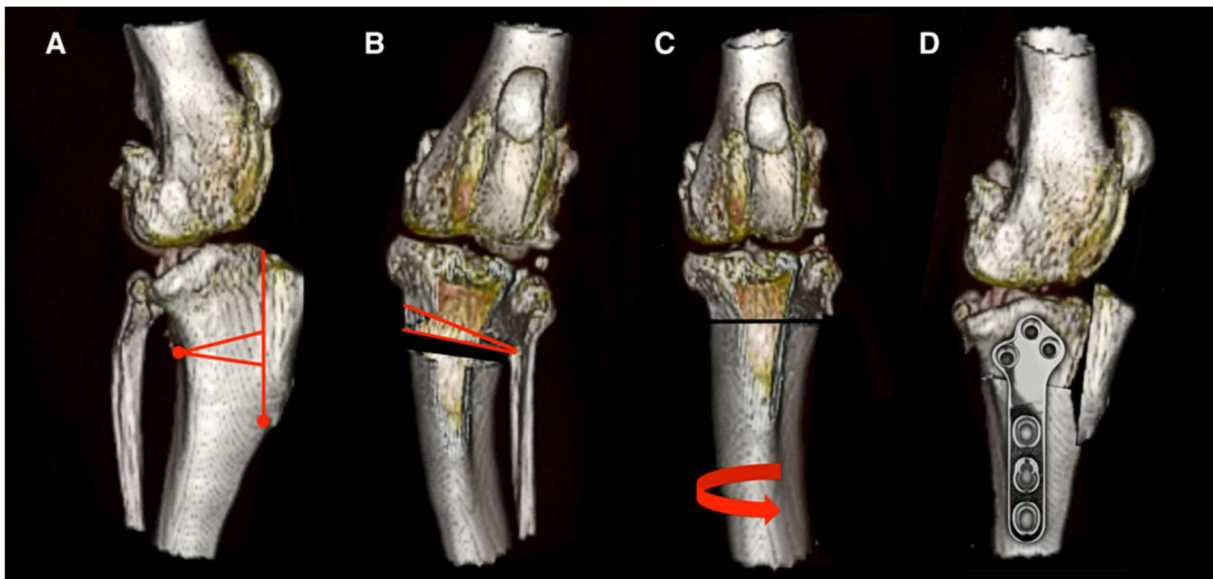


Figure 9 : Représentation schématique de la triple ostéotomie tibiale modifiée. (A) Une triple ostéotomie tibiale classique est d'abord réalisée. (B) En cas de déformation en valgus tibial, une ostéotomie en coin fermée médiolatérale est effectuée (la tubérosité tibiale a été retirée sur le schéma pour plus de clarté). (C) La réduction des fragments tibiaux est ensuite réalisée ; à ce stade, la torsion tibiale peut être corrigée par rotation du fragment tibial distal (flèche rouge ; la tubérosité tibiale est également retirée pour plus de clarté). (D) Les fragments sont ensuite stabilisés à l'aide d'une plaque de TPLO. En présence d'une LMR, la tubérosité tibiale est transposée latéralement et fixée à l'aide de broches de Kirschner, avec ou sans hauban métallique. Référence 6.

TPLO-MCCWO (TPLO-Medial Crescentic Closing Wedge Osteotomy)

Dans les cas de valgus tibial proximal marqué, la réalisation d'une TPLO standard ne permet pas toujours de rétablir correctement l'axe mécanique. Une variante, décrite initialement par Jacqmin et al. (4) puis développée par Vezzoni et al. (7), associe la coupe radiale classique de la TPLO à une seconde coupe coplanaire permettant l'excision d'un coin osseux médial fermé (MCCWO). Cette technique, souvent appelée « TPLO double cut », est indiquée lorsque le mMPTA dépasse 97°, traduisant un genu valgum sévère.

La série publiée par Vezzoni et al. (7) rapporte une correction très précise, avec un mMPTA réduit de 101° à 92,8° et un TPA postopératoire moyen de 6,5°. Le profil de complications est particulièrement favorable : seulement deux incidents peropératoires

mineurs (sur-rotation corrigée immédiatement et fissure corticale stabilisée) et aucune complication postopératoire. L'un des principaux avantages de cette approche réside dans la stabilité mécanique conférée par l'ostéotomie en coin fermé, permettant l'utilisation de plaques TPLO standard sans avoir recours à des implants spécifiques supplémentaires.

Cette technique doit toutefois être réservée aux genu valgum proximaux significatifs. Elle n'est pas conçue pour corriger des déformations complexes multi-planaires (torsion, varus ou combinaison), où d'autres approches sont préférables.

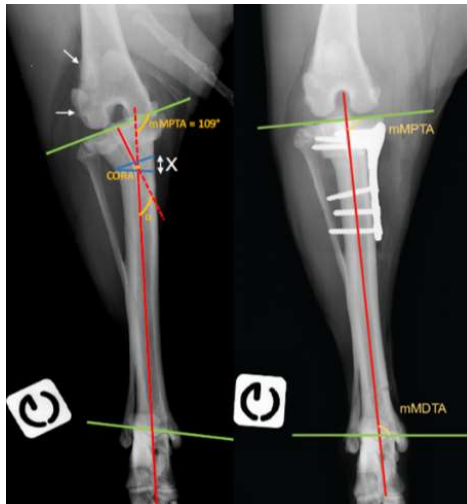


Figure 10 : Vues radiographiques préopératoires caudo-crâniale et médio-latérale. Détermination du CORA et de l'angle de déformation angulaire sur la radiographie caudo-crâniale. 20° = angle de correction angulaire. Flèche blanche double : épaisseur X de l'ostéotomie à réaliser. Flèche blanche simple : ostéophytose. Référence 7.

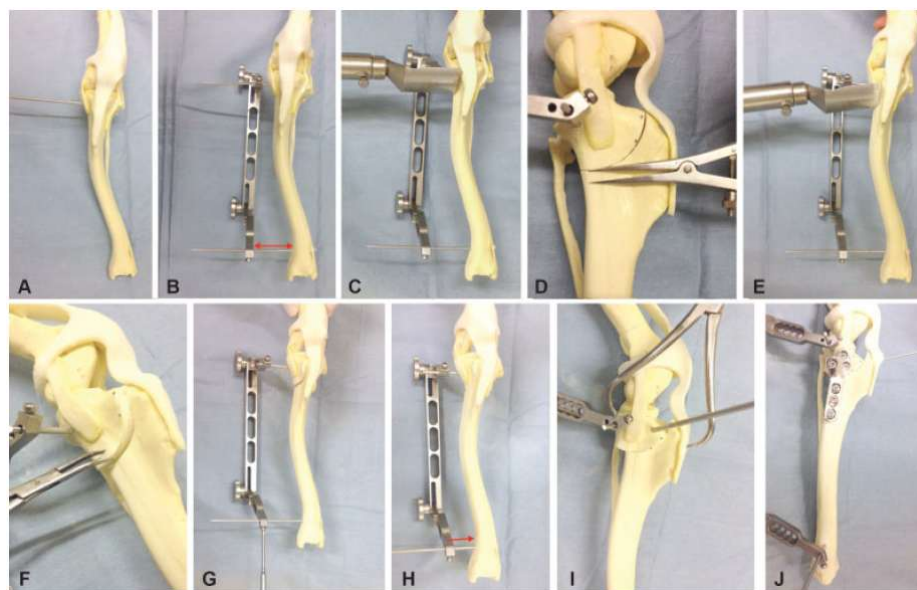


Figure 11 : Modèle osseux illustrant la position de la broche proximale du guide, placée parallèlement à la surface articulaire tibiale proximale et perpendiculairement au ligament patellaire (A). En raison du valgus tibial proximal, la distance entre la partie distale du guide et la corticale médiale du tibia est augmentée (B). La lame de scie est maintenue parallèle à la broche distale du guide pour débuter l'ostéotomie radiale standard de TPLO, initialement réalisée en

sectionnant la corticale cis (C). Avant de compléter l'ostéotomie, la largeur du coin osseux à retirer pour l'ostéotomie en wedge fermé est marquée à l'aide d'un ostéotome au niveau de D3 (D). La seconde coupe est ensuite réalisée distalement à la première, en orientant la lame selon un angle par rapport à la broche du guide correspondant à la correction planifiée (E). Après réalisation des deux ostéotomies, le coin osseux résultant est retiré (F), créant un espace au niveau de la corticale médiale. La vis distale du guide est alors desserrée (G), et l'extrémité distale du guide est rapprochée de la diaphyse tibiale pour refermer l'espace de l'ostéotomie médiale (H). Le segment tibial proximal est ensuite tourné (I) et l'ostéotomie est stabilisée à l'aide d'une plaque TPLO standard (J). Référence 7.

TPLMOCO (Tibial Plate Leveling Medial Opening Crescentic Osteotomy)

La TPLMOCO est spécifiquement indiquée pour le traitement du tibia vara (déformation en varus proximal) associé à une insuffisance du LCCr, souvent

compliquée par une démarche de type *pivot shift*. La correction du varus est obtenue par une ouverture médiale de l'ostéotomie en croissant, l'espace créé étant comblé par une greffe osseuse spongieuse. Dans la série rapportée par Fitzpatrick et al., cette méthode a permis de résoudre la boiterie et de corriger l'anomalie de la démarche *pivot shift* dans l'ensemble des cas traités, avec une morbidité postopératoire jugée faible (3).

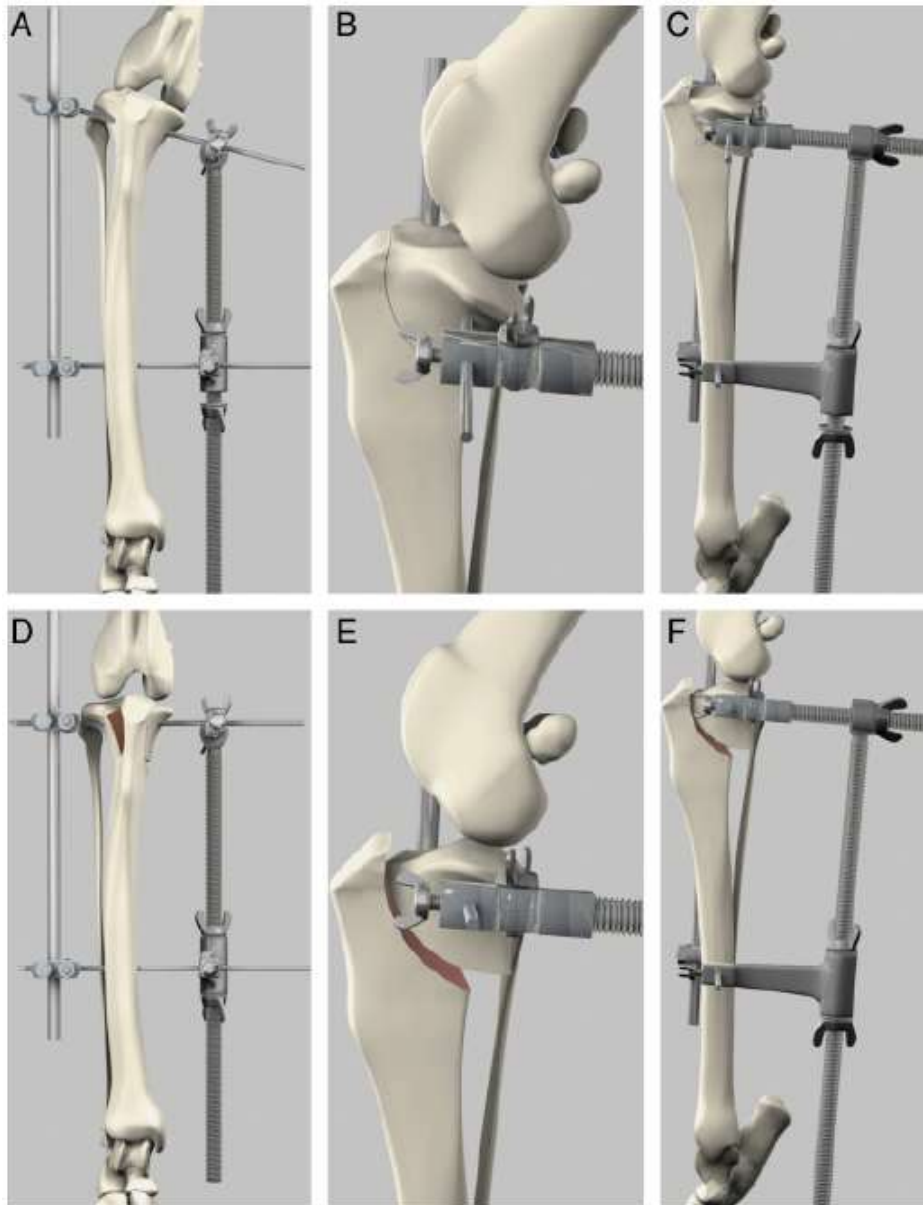


Figure 12 : Représentations schématiques illustrant l'identification et la correction d'une déformation dans le plan sagittal. Vue schématique des aspects crânial (A) et médial (B et C) du tibia montrant une conformation typique en varus, avec la position des broches guides, de la barre latérale et des pinces, ainsi que d'un distracteur orthopédique appliqué médialement. La rotation du segment de nivellement du plateau tibial a été réalisée en C. Représentation schématique des aspects crânial (D) et médial (E et F) du tibia montrant la correction d'une déformation dans le plan frontal. À noter que la barre latérale et les pinces maintiennent le contact au niveau latéral de l'ostéotomie en croissant pendant la distraction effectuée par le distracteur orthopédique médial. Référence 3.

Résultats cliniques et complications

Taux de consolidation et complications chirurgicales

Les études disponibles rapportent des taux de consolidation osseuse élevés et des complications globalement faibles, confirmant la fiabilité biomécanique des ostéotomies combinées. La guérison radiographique complète est observée dans la majorité des cas entre 8 et 11 semaines postopératoires, selon la technique employée.

Pour la combinaison TPLO-TCO, Weh et al. (8) décrivent un délai moyen de consolidation radiographique de 10,4 semaines, avec un taux de complications majeures de 21 %. Ces complications incluent principalement des infections superficielles ou profondes (arthrite septique), des séromes et des desserrages d'implants, soit un taux comparable à celui observé après TPLO standard. Malgré ces incidents, la fonction locomotrice finale était excellente dans 100 % des cas, sans perte de correction.

Dans l'étude de Livet et al. (6), portant sur la TTO modifiée, la consolidation était obtenue en moyenne en 10,8 semaines chez l'ensemble des patients. Aucune complication majeure n'a été observée, hormis un cas d'infection superficielle isolée. En revanche, une fracture per- ou postopératoire de la crête tibiale distale a été rapportée dans 55,6 % des cas, sans impact fonctionnel durable. Ces fractures sont attribuées à la fragilité mécanique du pont osseux distal et à la courbure de la crête tibiale.

La technique TPLO-MCCWO décrite par Vezzoni et al. (7) présente une consolidation rapide en 8 à 10 semaines, avec aucune complication postopératoire recensée. Deux incidents peropératoires mineurs ont été notés : une sur-rotation immédiatement corrigée et une fissure corticale stabilisée avant la fin de la chirurgie. La stabilité mécanique du montage et l'apposition corticale médiale favorable expliquent la guérison osseuse systématique et rapide observée dans cette série.

Dans la série de Fitzpatrick et al. (3) sur la TPLMOCO, le taux de complication est très faible (6,7 %, soit 1 cas d'infection superficielle sur 15 membres). La consolidation osseuse n'est pas chiffrée, mais l'auteur rapporte une récupération fonctionnelle complète dans tous les cas et une stabilité articulaire excellente, ce qui témoigne d'une bonne intégration osseuse.

Enfin, les travaux récents de Jeon et al. (5) confirment l'intérêt de la planification tridimensionnelle et de l'utilisation de guides personnalisés imprimés en 3D. Dans cette étude, la guérison complète était obtenue chez tous les patients entre 8 et 9 semaines, avec aucune complication infectieuse ou mécanique rapportée. Les auteurs insistent sur la précision du positionnement des ostéotomies et la réduction significative des erreurs angulaires ($<3^\circ$), facteurs qui contribuent probablement à la diminution du risque de retard de consolidation ou de malunion.

Discussion

La technique doit être individualisée selon la topographie et la complexité de la déformation, notamment lorsqu'elle est triplanaire (angulaire, torsionnelle, sagittale) (7,8).

- L'association TPLO-TCO est la plus polyvalente pour corriger simultanément varus, valgus, eTPA, torsion tibiale et LMR (8). Elle offre de bons résultats fonctionnels mais au prix d'un taux de complications supérieur à celui d'une TPLO isolée (8).
- Pour des déformations localisées, on privilégie des approches ciblées : TPLO-MCCWO pour le valgus tibial proximal, avec correction précise et excellente stabilité par apposition corticale (7) ;
- La TPLMOCO est indiquée pour corriger un tibia vara proximal et s'accompagne d'une amélioration du pivot shift décrite dans la série publiée (3).
- La TTO modifiée est pertinente en cas de LMR associée, la transposition de crête tibiale ne gênant pas la plaque ; son écueil principal reste le risque de fracture de crête tibiale, le plus souvent per- ou immédiatement postopératoire (6).

La planification est déterminante. Les radiographies orthogonales avec méthode CORA restent la base pour quantifier valgus/varus et pente tibiale, mais leur fiabilité diminue en cas de torsion ; le scanner 3D précise l'orientation des coupes et la part de correction dans chaque plan (2). Quand l'exigence de précision est élevée (corrections biplanaires/triplanaires, petits gabarits, géométries atypiques), modélisation et guides personnalisés standardisent l'exécution et réduisent l'écart planifié—obtenu (5).

L'étape opératoire déterminante est la qualité de l'ostéotomie : qu'il s'agisse d'un coin fermé pour le valgus proximal, d'une ouverture médiale pour le varus, ou d'une correction triplanaire avec coupe transversale, la précision des coupes, la maîtrise de la charnière corticale et le contrôle de la rotation conditionnent l'apposition, la stabilité et le maintien de la correction.

- Coin fermé (valgus proximal) : la charnière corticale et le dimensionnement du coin conditionnent apposition, stabilité et maintien de la correction ; un coin trop petit sous-corrige, un coin excessif fragilise la charnière et expose à la fissuration (7). Une bonne apposition cortico-corticale s'associe à une consolidation rapide et fiable (6,7).
- Ouverture médiale (varus proximal) : l'angle d'ouverture et la symétrie doivent être strictement contrôlés pour éviter l'affaissement ; un comblement spongieux soigné est indispensable et la fixation doit offrir une rigidité suffisante pour résister au moment d'ouverture (3).
- Corrections triplanaires avec coupe transversale : la référence rotatoire peropératoire (broches repères, gabarits de réduction, guides) est déterminante pour obtenir l'angle et la rotation prévus avant la fixation (8). Si l'erreur tolérable

est faible, l'imagerie 3D et des guides personnalisés renforcent encore la précision (5).

Les coins fermés offrent une stabilité intrinsèque par apposition ; des plaques de TPLO standard conviennent le plus souvent si la couverture osseuse (portée proximale/distale) et la stratégie de visserie (verrouillage/compression) sont adéquates (7). Les ouvertures médiales exigent une fixation plus rigide (verrouillage, plaque plus longue, vis de plus grand diamètre selon le morphotype) pour prévenir affaissement et perte de correction (3). Les montages avec coupe transversale et correction rotatoire imposent d'anticiper les contraintes en torsion et en flexion (longueur de plaque, répartition des vis, éventuel renfort) (8). Dans toutes les configurations, priorité à l'appui cortical, à la longueur de levier de la plaque et à une densité de vis verrouillées pertinente ; les dispositifs « spécifiques » n'apportent d'intérêt que s'ils améliorent réellement la mécanique.

Les radiographies orthogonales avec CORA posent la stratégie, mais leur caractère 2D limite la fiabilité en présence de torsion, avec risque de discordance mesures–anatomie (2,7). Le scanner 3D affine l'évaluation des anomalies complexes ; l'impression 3D (modèles) aide à simuler les coupes et à choisir la stratégie (5,7,8). Les guides de coupe et de réduction personnalisés, tels que décrits par Jeon, permettent d'exécuter fidèlement le plan : correction complète valgus/varus avec erreur angulaire moyenne $< 3^\circ$, consolidation rapide et absence de complications dans la série (5). En peropératoire, l'évaluation visuelle et les broches de Kirschner restent indispensables pour caler les plans, contrôler l'alignement et ajuster la correction avant fixation (2,7,8).

Dans les déformations triplanaires sévères, la TPLO-TCO réaligne efficacement avec une consolidation moyenne autour de 10,4 semaines ; le taux de complications est plus élevé mais cohérent avec la complexité des cas (8). La TTO modifiée consolide en $\approx 10,8$ semaines avec bonne récupération fonctionnelle, au prix d'un risque notable de fracture de crête tibiale (6). La TPLO-MCCWO se distingue par une consolidation rapide (8–10 semaines) sans complication postopératoire dans la série publiée, reflet de la stabilité d'un coin fermé bien apposé (7). La TPLMOCO corrige efficacement le varus proximal avec une morbidité faible ; le délai de consolidation n'est pas chiffré, mais la récupération est complète et durable (3). Les approches guidées 3D illustrent l'intérêt d'une planification-exécution intégrée pour réduire les erreurs, sécuriser l'alignement et accélérer la consolidation (5).

Pour conclure, les ostéotomies combinées permettent de traiter simultanément LCCr et déformations tibiales avec consolidation rapide et excellente récupération quand l'indication est bien posée et la planification rigoureuse. En pratique :

- TPLO-TCO pour les déformations triplanaires sévères (8) ;
- TPLO-MCCWO pour le valgus proximal (7) ;
- TPLMOCO pour le varus (3) ;

- TTO modifiée quand une LMR est associée, avec vigilance sur la crête tibiale (6).

La 3D (modèles, guides) tend à standardiser l'exécution et sécuriser la correction angulaire et rotationnelle (5,7,8).

Le succès à long terme repose sur l'expérience du chirurgien, le respect des principes d'ostéosynthèse et, lorsque possible, la préférence pour des coins fermés offrant la meilleure stabilité biomécanique.

Technique	Valgus	Varus	Délai moyen de consolidation	Taux de complications majeures	Avantages clés	Inconvénients / Limites notables
TPLO-TCO (8)	Oui	Oui	10,4 semaines	21 % (desserrage, sérome, infection)	Correction multi-planaire (valgus, varus, eTPA, torsion, LMR) ; résultats fonctionnels satisfaisants	Fixation souvent à renforcer ; morbidité plus élevée que TPLO isolée
TTO modifiée (6)	Oui	Non	10,8 semaines	Rare (1 infection superficielle)	Prise en charge conjointe LCCr + LMR ; transposition de la crête tibiale aisée ; bonne récupération fonctionnelle	Ostéotomie non centrée sur le CORA ; risque élevé de fracture de crête tibiale (55,6 %)
TPLO-MCCWO (7)	Oui	Non	8–10 semaines	0 %	Correction précise et stable par coin fermé ; excellente apposition corticale ; consolidation rapide	Coin à dimensionner avec précision ; dépendance à la charnière corticale ; pas d'action sur torsion/eTPA sans geste associé.
TPLMOCO (3)	Non	Oui	Non précisé	6,7 % (infection superficielle)	Correction efficace du varus proximal ; amélioration du pivot shift ; morbidité faible	Ostéotomie en ouverture intrinsèquement moins stable ; greffe spongieuse et fixation rigide nécessaires
Guides 3D (5)	Oui	Oui	8–9 semaines	0 %	Planification/exécution très précises avec guides personnalisés ; consolidation rapide	Requiert scanner 3D, modélisation et impression ; série clinique limitée (6 cas) ; non spécifique LCCr ; ressources/coût/courbe d'apprentissage

Tableau 1 : Synthèse des techniques combinées de correction tibiale proximale, précisant pour chacune l'applicabilité au valgus/varus, le délai moyen de consolidation, le taux de complications majeures, ainsi que les avantages clés et les principales limites.

Note méthodologique – Utilisation de l'intelligence artificielle

Dans le cadre de la préparation de ce manuscrit, plusieurs outils d'intelligence artificielle ont été utilisés de manière complémentaire et encadrée, afin de faciliter certaines étapes techniques et d'optimiser le travail de rédaction.

- **Sélection des articles** : l'outil *Consensus* a été utilisé pour orienter la recherche bibliographique et sélectionner les publications pertinentes à partir de mots-clés et de critères définis.
- **Traduction et indexation** : *Notebook LM* et *ChatGPT* ont servi à produire la traduction intégrale des articles retenus, ainsi qu'à générer et organiser les références bibliographiques au format standard.
- **Relecture de style** : *ChatGPT* a également été mobilisé pour proposer des ajustements concernant la grammaire, le style rédactionnel et la fluidité de lecture, dans une optique d'harmonisation du manuscrit.

Il est cependant important de préciser que toutes les données scientifiques, résultats chiffrés et références citées dans le texte ont été **vérifiés manuellement à partir des articles sources**. Les outils d'intelligence artificielle n'ont été utilisés que comme appui technique ; l'analyse, l'interprétation des résultats et la rédaction finale relèvent exclusivement de l'auteur.

Références bibliographiques

1. Dallago M, Baroncelli AB, Hudson C, Peirone B, De Bakker E, Piras LA. Effect of Plate Type on Tibial Plateau Levelling and Medialization Osteotomy for Treatment of Cranial Cruciate Ligament Rupture and Concomitant Medial Patellar Luxation in Small Breed Dogs: An In Vitro Study. *Vet Comp Orthop Traumatol*. 2023;36:212–7. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0043-1768163>
2. Dismukes DI, Tomlinson JL, Fox DB, Cook JL, Song KJ. Radiographic Measurement of the Proximal and Distal Mechanical Joint Angles in the Canine Tibia. *Vet Surg*. 2007;36:699–704. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1532-950X.2007.00323.x>
3. Fitzpatrick N, Johnson J, Hayashi K, Girling S, Yeadon R. Tibial Plateau Leveling and Medial Opening Crescentic Osteotomy for Treatment of Cranial Cruciate Ligament Rupture in Dogs with Tibia Vara. *Vet Surg*. 2010;39(4):444–53. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1532-950X.2010.00667.x>
4. Jacqmin M, Taroni M, Livet V, Viguier E. Traitement d'une rupture du ligament croisé crânial associée à une déformation en valgus de la partie proximale du tibia à l'aide d'une TPLO associée à une ostectomie en coin chez un chien. (Titre original : Tibial plateau leveling osteotomy combined with closing wedge tibial ostectomy for treatment of cranial cruciate ligament rupture in a dog with tibial valgus deformity).
5. Jeon J-W, Kang K-W, Kim W-K, Jung C, Kang B-J. Three-dimensional-printed patient-specific guides for tibial deformity correction in small-breed dogs. *Am J Vet Res*. 2023;84(1):1–9. DOI: <https://doi.org/10.2460/ajvr.23.06.0146>
6. Livet V, Taroni M, Ferrand FX, Carozzo C, Viguier E, Cachon T. Modified Triple Tibial Osteotomy for Combined Cranial Cruciate Ligament Rupture, Tibial Deformities, or Patellar Luxation. *J Am Anim Hosp Assoc*. 2019;55:----- DOI: <https://doi.org/10.5326/JAAHA-MS-6823>
7. Vezzoni L, Bazzo S, Boiocchi S, Vezzoni A. Use of a Modified Tibial Plateau Levelling Osteotomy with Double Cut and Medial Crescentic Closing Wedge Osteotomy to Treat Dogs with Cranial Cruciate Ligament Rupture and Tibial Valgus Deformity. *Vet Comp Orthop Traumatol*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0039-1700565>
8. Weh JL, Kowaleski MP, Boudrieau RJ. Combination tibial plateau leveling osteotomy and transverse corrective osteotomy of the proximal tibia for the treatment of complex tibial deformities in 12 dogs. *Vet Surg*. 2011;40(6):670–86. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1532-950X.2011.00826.x>