

# Reconstruction du ligament croisé antérieur assistée par ordinateur : technique et résultats

## Anterior crucial ligament reconstruction by navigation : techniques and results

Stéphane Plaweski, Rémi Julliard

*Clinique universitaire de chirurgie orthopédique et traumatologie du sport, centre hospitalo-universitaire de Grenoble*

### Mots clés

- ◆ Genou
- ◆ LCA
- ◆ reconstruction ligamentaire
- ◆ navigation

### Résumé

La chirurgie du ligament croisé antérieur est l'une des applications les plus fréquentes en chirurgie orthopédique avec plus de 30 000 reconstructions ligamentaires par an en France. Ses résultats sont satisfaisants dans près de 90% des cas mais le taux d'échecs varie entre 10 et 15% selon les séries. Ces échecs sont dans leur grande majorité dus à un mauvais positionnement de la greffe. L'ordinateur est ainsi apparu comme un outil indispensable d'aide au bon positionnement selon des critères dits « anatomométriques ». Si la technologie élaborée est basée sur le *bone morphing* reproduisant l'anatomie la plus réaliste du patient avec une précision infra-millimétrique, sa mise en œuvre est aisée avec plus de 500 genoux « navigués » à ce jour. Nos résultats ont permis d'affirmer que les objectifs d'amélioration de la précision de positionnement de la greffe ont été obtenus avec élimination des erreurs majeures. Cette navigation permet aussi d'établir une cartographie de la laxité en temps réel et ainsi de proposer une véritable chirurgie dite « à la carte » faisant varier les options techniques de la simple reconstruction à un faisceau à une chirurgie de reconstruction dite anatomique ou de plastie extra-articulaire associée.

### Keywords

- ◆ Knee
- ◆ anterior cruciate ligament
- ◆ ACL reconstruction
- ◆ navigation

### Abstract

The optimal position for a graft will be one which recreates the anatomic path of the natural ACL and this should most accurately recreate its function. The ACL Logics Julliard Protocol is a very versatile software package that provides the surgeon with many measurements related to 3D anatomy, isometry, kinematics, and notch impingement. This system can be used in many different ways and so it can fit accordingly to any particular surgical philosophy. The use of computer assisted navigation techniques can allow a greater accuracy and consistency of results, even in very experienced hands. Also the computer assisted surgery was help to analyze the laxity of the knee and to adapt it to the technique of reconstruction.

En France, plus de 30 000 reconstructions du ligament croisé antérieur du genou sont réalisées par an. Certes, les résultats cliniques sont bons avec des taux de satisfaction des patients supérieur à 90%. Néanmoins, l'ensemble des séries publiées ne fait pas état du même taux de très bons résultats objectifs. La stabilité du genou opéré est obtenue quand elle est identique à moins de 2 millimètres près avec la laxité du genou controlatéral. Le taux d'échecs varie autour de 10%, ce qui représente plus de 3 000 genoux par an à reprendre sur le plan chirurgical. Rémi Julliard s'est posé la question dès les années 1990 de savoir si l'utilisation de l'ordinateur serait à même d'améliorer le taux de réussite de façon significative.

Nous avons depuis développé un système de navigation basé sur le concept de l'anatomométrie (1) permettant d'optimiser le placement de la greffe, d'obtenir en temps réel une cartographie de la laxité du genou et d'individualiser les faisceaux composants le LCA.

Parmi les différentes erreurs liées à un défaut technique, la principale concerne un mauvais positionnement du tunnel (2,3). Ce positionnement anisométrique est aussi la cause d'un étirement de la greffe et d'un mauvais contrôle de la rotation du genou et de la stabilité. Par exemple, un placement trop antérieur du tunnel fémoral produit une contrainte en flexion et une laxité en extension, tandis qu'un placement

### Correspondance :

CHU Grenoble, Hôpital Sud, 38434 Echirolles  
Email : [splaweski@chu-grenoble.fr](mailto:splaweski@chu-grenoble.fr)

trop postérieur de ce même tunnel fémoral produit une contrainte en extension et une laxité en flexion. Au niveau du tibia, un placement trop antérieur donnerait une contrainte trop importante en flexion et un conflit en extension. À l'inverse, un positionnement trop postérieur du tunnel tibial donnerait une contrainte en extension et un possible conflit avec le ligament croisé postérieur. Un tunnel tibial trop latéral ou trop médial peut être à l'origine d'un conflit avec le ligament croisé postérieur ou les condyles fémoraux.

Les techniques chirurgicales de reconstruction ligamentaire reposent seulement sur des critères anatomiques apparaissent insuffisantes. Ainsi certains s'aident d'un contrôle fluoroscopique per-opératoire avec des guides placés en extension afin de visualiser un éventuel conflit avec l'échancrure ; d'autres procèdent à la mesure empirique de la tension et de l'isométrie. Néanmoins, les repères arthroscopiques sont éminemment variables et parfois inappropriés, le contrôle fluoroscopique reste invasif et des approches conventionnelles trans-tibiales utilisant un guide *over the top* peut affecter le positionnement du tunnel fémoral ou tibial ; ainsi le tunnel fémoral peut être trop antérieur et vertical, alors que le tunnel tibial serait trop postérieur (4).

La navigation chirurgicale du ligament croisé antérieur est la seule procédure permettant de situer de façon idéale les tunnels fémoraux et tibiaux. Non seulement les cartes anatomiques de ce bon positionnement sont visibles, mais ils prennent en compte également l'isométrie et le potentiel de conflit avec l'échancrure. Le chirurgien navigue en permanence et en temps réel entre la vision arthroscopique et la vision virtuelle dont il peut contrôler la précision qui est inframillimétrique. Le choix des tunnels est ainsi contrôlé au mieux, ce qui permet d'optimiser un placement du greffon adapté à l'anatomie individuelle de chaque genou.

## Le système Praxim de navigation chirurgicale du ligament croisé antérieur

Le but de la reconstruction ligamentaire du LCA est de restaurer une stabilité ainsi qu'une fonction normale du genou s'adressant en général à une population jeune et active. Depuis 1993, date de création du système ligamentaire Praxim par R Julliard (5), le développement s'est fait vers :

- l'amélioration de la fonction du genou avec une augmentation de la précision des mesures de la cinématique ;
- des procédures d'acquisition et d'enregistrement sans imagerie pré- ou per-opératoire (sans risque d'exposition aux radiations du patient ou du chirurgien) ;
- l'obtention d'un procédé fiable et facile d'utilisation en pratique clinique quotidienne.

Le système ne nécessite aucune imagerie pré- ou per-opératoire (fluoroscopie, scanner, radiographie, IRM, tomodensitométrie) ; il est ubiquitaire et compatible avec tous les procédés techniques de reconstruction ligamentaire et d'instrumentation. Cette technique unique de navigation sans imagerie du LCA a été développée et utilisée pour la 1<sup>re</sup> fois par R Julliard en 1993 (6,7) et V Dessenne en 1995 (3).

Trois critères sont pris en compte pour optimiser le placement de la greffe :

- l'anatomie de l'articulation ;
- l'isométrie du ligament ;
- le conflit avec l'échancrure.

Les développements ultérieurs ont permis d'acquérir la laximétrie per-opératoire (6). Un véritable modèle ligamentaire tridimensionnel permet de simuler le comportement ligamentaire. Ce système est ainsi devenu un outil indispensable afin de comprendre et d'améliorer le traitement des laxités du genou (8,9).

## Méthodes

### Description du système

Le système Praxim est un système sans acquisition d'image pré- ou per-opératoire, qui utilise la technologie du *Bone morphing*. Cette aide à la chirurgie ligamentaire arthroscopique inclut : une station, un set extrêmement simplifié d'instruments et un logiciel d'installation spécifique.

### Station et instruments

La station Praxim chirurgicale est un système de plateforme ouverte, indépendante de toutes les compagnies chirurgicales. Il a reçu l'agrément français et européen et a déjà aidé à réaliser plus de 10 000 implantations chirurgicales. Cette application LCA est supportée par la station Praxim Nano station et de fait, elle permet de s'intégrer à une plateforme digitale opératoire plaçant les différents éléments dans la salle opératoire : arthroscopie, vidéo, navigation, fluoroscopie... optimisant ainsi l'ergonomie. Un système de caméra infrarouge repère les données. Aucun autre outil n'est nécessaire ; les chirurgiens restent à tous moments libres de leur action, appuyant sur une pédale bleue pour avancer et une pédale jaune pour revenir en arrière, selon un protocole linéaire.

Un écran tactile situé sur la station permet de rentrer les données démographiques du patient et de sélectionner les différentes options, avant de commencer l'intervention :

- chirurgie ligamentaire de première intention ;
- chirurgie de reprise ;
- choix de la technique :
  - reconstruction à 1 faisceau,
  - reconstruction anatomique,
  - plastie extra-articulaire associée médiale ou latérale ;
- options de testing des laxités.

Toutes ces données seront enregistrées sur un CD-ROM.

L'instrumentation comprend 6 corps rigides (ou marqueurs de référence). Ces marqueurs sont sans fil et ont des formes facilement identifiables. Ils sont repérés par le système de localisation optique infra-rouge. L'ensemble de ces éléments est intégré dans la procédure technique chirurgicale habituelle. Au début de la procédure d'acquisition, ces différents instruments sont calibrés et repérés dans l'espace.

### Logiciel de reconstruction ligamentaire

Le choix du positionnement du tunnel fémoral n'est pas universel. Pour beaucoup, ce tunnel doit être placé à la partie postérieure la plus haute, proche de la zone dite « over top », donc loin du centre de l'attache anatomique du ligament croisé antérieur. Il est pourtant communément admis que le but de la reconstruction du ligament croisé antérieur est de stabiliser le genou en obtenant une bonne correction isométrique et l'absence de conflit du greffon avec l'échancrure.

L'isométrie est définie comme la variation maximale de distance calculée à partir des attaches tibiales et fémorales, données acquises durant la cinématique du genou. Le profil anisométrique est la courbe de cette distance tracée entre l'extension et la flexion. Un profil décroissant témoigne d'un ligament tendu en extension et détendu en flexion.

Le conflit est défini comme le contact entre la greffe et l'échancrure en extension. S'il y a conflit, un modèle de reconstruction tridimensionnel simule la pénétration de la greffe dans l'échancrure, ainsi que sa profondeur.

Ce logiciel LCA utilise la technologie du *Bone morphing* pour reconstruire l'anatomie exacte du patient en 3 dimensions (10,11). Le modèle de reconstruction ligamentaire est construit en temps réel, il est déformable. Ce logiciel évalue un

conflit éventuel entre la greffe et l'échancrure ; il permet de construire la courbe d'anisométrie donnant ainsi au chirurgien la possibilité d'optimiser le placement des tunnels.

### Protocole chirurgical

Ce protocole pour la reconstruction ligamentaire du LCA a été conçu à partir de la pratique chirurgicale ligamentaire. Il est conçu pour être intégré aux différents procédés techniques et instrumentaux.

- **Installation.** La station de navigation est placée à côté de la colonne d'arthroscopie, permettant ainsi au chirurgien de visualiser les 2 écrans de façon simultanée. Il est important de laisser libre le champ de vision des différents marqueurs (visibilité vérifiée lors des mouvements du genou). La figure 1 illustre une installation classique ; les corps rigides et les outils de navigation doivent toujours être visibles. Une fois le *drapping* réalisé, le chirurgien installe des corps rigides sur le tibia et le fémur. Le chirurgien procède au temps de prélèvement et de préparation de la greffe ainsi qu'au temps arthroscopique.
  - **Acquisition des données.**
  - **Points anatomiques.** Ils sont enregistrés sous arthroscopie (fig. 2) et en percutané :
    - centre de cheville (enregistrement du point malléolaire interne, de la malléole médiale et de la malléole latérale) ;
    - épines tibiales latérale et médiale ;
    - plateau tibial médial et latéral ;
    - point antérieur situé au niveau du ligament inter méniscal (pivot shift).
  - **Acquisition de la cinématique.** Un mouvement de flexion est réalisé permettant d'enregistrer les différentes données à partir des marqueurs fémoraux et tibiaux. Ces données permettent de calculer l'anisométrie et d'en déduire le profil du greffon. Au cours de cet enregistrement, il est impératif de ne pas reproduire un tiroir antérieur. S'il le souhaite, le chirurgien peut enregistrer le centre de la tête fémorale en réalisant des mouvements de circumduction (12).
  - **Reconstruction anatomique tridimensionnelle.** Le *bone morphing* consiste en l'acquisition des données issues du patient, permettant ainsi de déformer un modèle statistique, sans utilisation de l'enregistrement à base fluoroscopique ou scannographique. Quelques centaines de points sont ainsi acquis très rapidement par le chirurgien qui balaye les surfaces souhaitées. Le modèle statistique utilisant un algorithme 3D-3D peut être déformé et s'approcher au plus près du modèle osseux réaliste (10, 11). Le chirurgien vérifie la précision de son enregistrement (inframillimétrique). L'échancrure fémorale et la surface inter spinale sont reconstruites. Une modélisation tridimensionnelle du genou la plus réaliste possible et adaptée à chaque patient est ainsi reproduite (fig. 2).
  - **Évaluation de la stabilité pré- et post-opératoire.** S'il existe un certain nombre d'exams cliniques pouvant évaluer l'instabilité du genou, aucun test ne permet de quantifier de façon formelle cette laxité (13). Le logiciel permet d'établir une véritable cartographie ligamentaire du genou en évaluant les laxités habituellement recherchées (fig. 3) : réalisation des tests dynamiques et valeurs maximum en rotation recherchées en pré-opératoire (outil décisionnel) ; affichage des valeurs de laxité après fixation de la greffe : tiroir antérieur à 30° de flexion. Les valeurs pré-greffe maximales s'affichent : tiroir antérieur ; laxité en varus et valgus ; test de Lachmann ; pivot shift test ; laxités rotatoires. Ces tests peuvent être réalisés à tout moment de l'intervention. Ils permettent de quantifier la laxité avant de décider le geste opératoire et de guider le chirurgien dans son choix technique. Pour chaque test, les repères acquis précédemment permettent de déterminer la rotation et la translation des compartiments médial et latéral. Le système guide le chirurgien dans la réalisation de chaque test en reproduisant le modèle anatomique tridimensionnel en temps réel, tout au long de l'acquisition laximétrique entre l'extension et la flexion. Les différents points sont mesurés par leurs déplacements et quantifiés dans les 3 directions de l'espace. A la fin de cette acquisition de la laximétrie, un écran permet de résumer l'ensemble des résultats, résultats exprimés dans les 3 plans de l'espace, à 0°, 30° et 90° de flexion.
  - **Planning interactif et navigation** (fig. 4, 5).
  - **Références anatomiques.** Les repères radiologiques de positionnement des tunnels sont bien connus et leur position est définie par rapport aux différents repères tels que la ligne de Blumensaat, la ligne *over the top* et les épines tibiales. Le choix du tunnel tibial est guidé par le repère des épines, mais aussi par la projection de l'échancrure fémorale sur le tibia, en direction de la ligne de Blumensaat. Ce logiciel, en permettant de visualiser cette projection, autorise en toute sécurité un placement optimum au niveau du tibia, le plus antérieur possible, corrigeant au mieux le tiroir antérieur et sans conflit. Pour le tunnel fémoral, le repérage de la ligne *over the top* autorise le chirurgien à réaliser un compromis entre un positionnement du tunnel fémoral anatomique et isométrique.
  - **Simulation de la greffe et du conflit avec l'échancrure.** Une simulation tridimensionnelle de la greffe a été élaborée grâce à l'intégration d'un algorithme au système. Un modèle déformable est calculé et représenté en temps réel : positionnement de la greffe et mise en évidence de l'enveloppe fémorale de l'échancrure. Les points d'ancrage sont également visualisés. Cette simulation est basée sur un critère d'énergie non linéaire et une cartographie permet de guider le chirurgien dans l'appréciation des conflits avec l'échancrure. L'intensité de ce conflit est évaluée et visualisée de façon dynamique à tous les temps de flexion et d'extension du genou. Une zone rouge apparaît sur la surface fémorale et révèle la présence d'un conflit potentiel entre la greffe virtuel et l'échancrure. Le chirurgien peut ainsi réaliser une plastie de l'échancrure puis refaire les acquisitions afin d'évaluer l'efficacité de son geste (fig. 5).
  - **Description du profil anisométrique de la greffe** (fig. 6). L'anisométrie est globalement définie par la variation maximale de la longueur des fibres du greffon durant la flexion et l'extension du genou. Une cartographie colorée de l'isométrie s'affiche à l'écran. Les zones correspondant au minimum d'anisométrie sont colorées en vert et les valeurs maximales sont colorées en rouge. En déplaçant le palpeur sur la surface de l'os, le point d'insertion potentiel de la greffe apparaît sous forme d'un cercle ; le chirurgien peut ainsi visualiser en même temps l'anisométrie des fibres antérieure et postérieure du greffon. Pour un couple donné de points choisi, fémoral et tibial, sélectionnés par le chirurgien, la courbe de l'anisométrie est représentée, définissant le profil du comportement biomécanique de la greffe. Un profil favorable caractérise une fibre qui est tendue en extension et se détend pendant la flexion, tandis qu'un profil non favorable caractérise un greffon qui se tend en flexion.
  - **Optimisation de la stratégie :**
    - choisir un point sur le tibia qui respecte les références anatomiques données par le système et évite le conflit avec l'échancrure ;
    - le système établit une cartographie fémorale ;
    - choisir un point fémoral en une zone d'anisométrie favorable ;
    - tester la flexion et l'extension du genou et en fonction de la visualisation ou non d'un conflit avec l'échancrure pour que le chirurgien ajuste le point tibial.
  - D'autres stratégies peuvent être employées en particulier en cas de reconstruction anatomique à 4 tunnels.
- Navigation des tunnels** (fig. 7). Il existe autant de procédures

Figure 1.

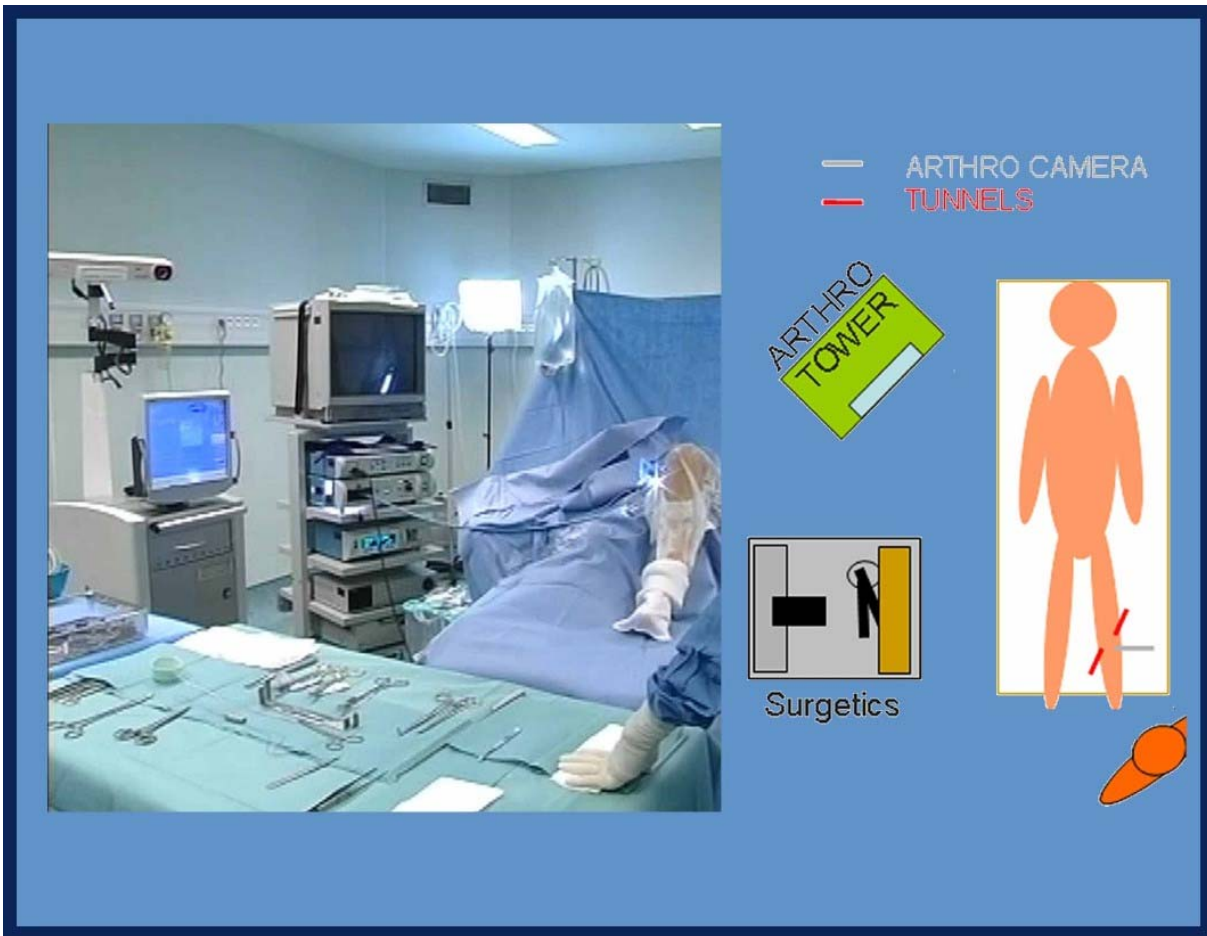
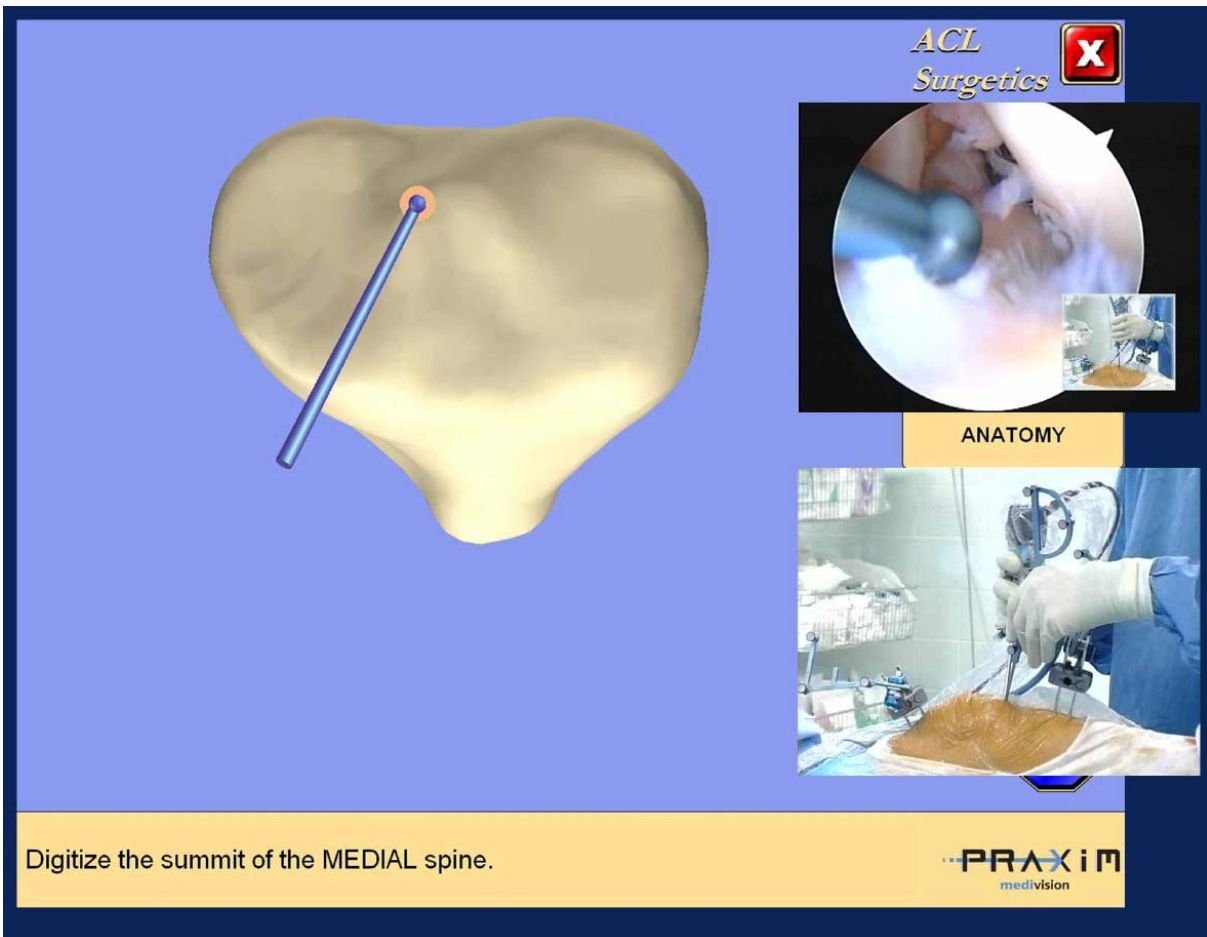


Figure 2.



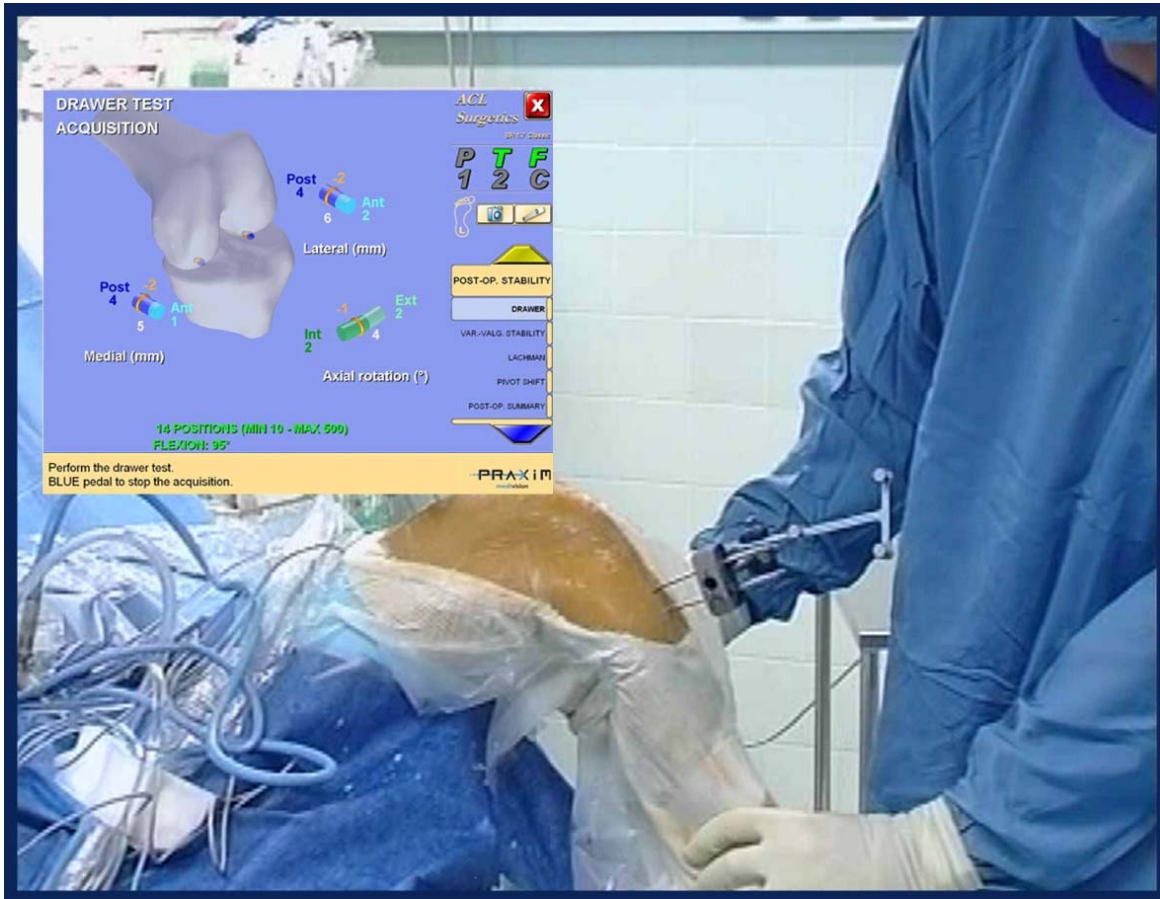


Figure 3a.

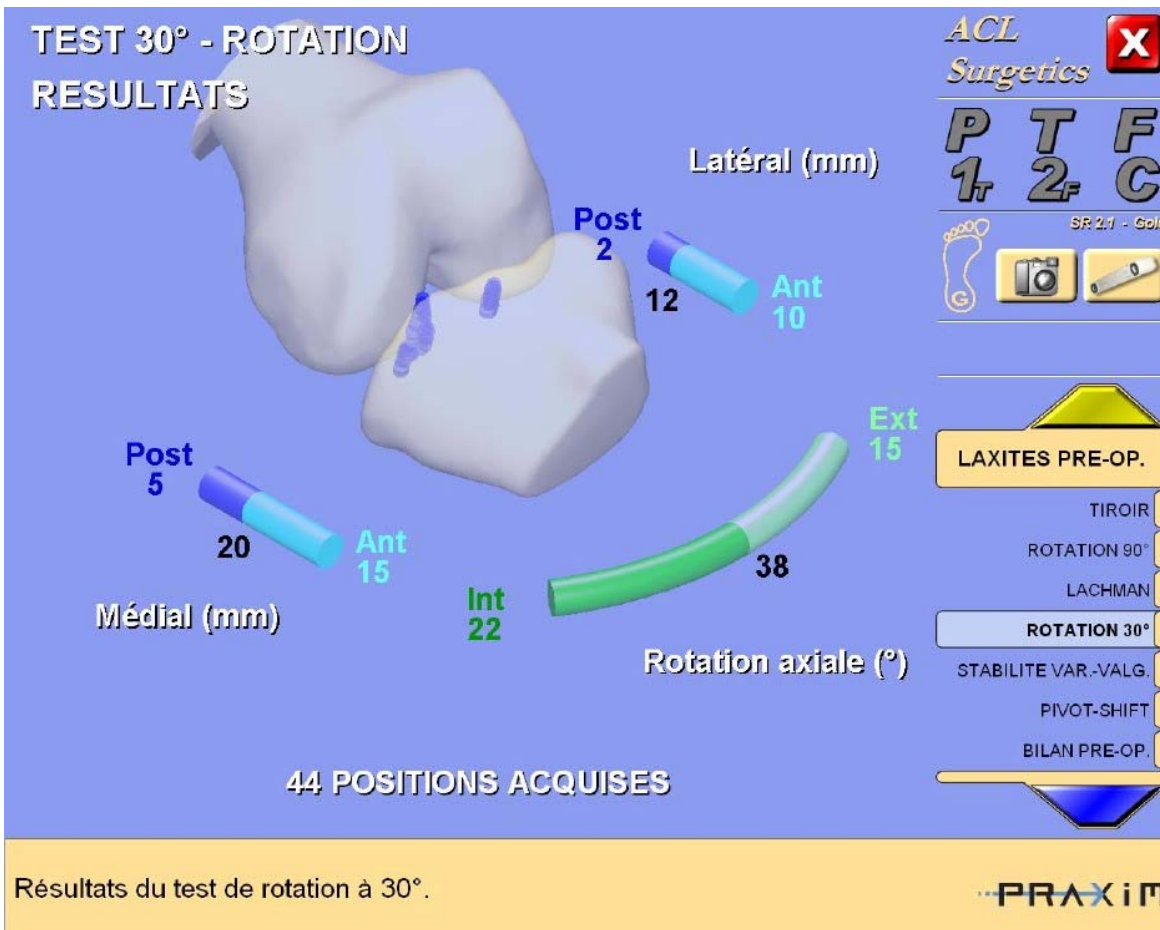


Figure 3b.

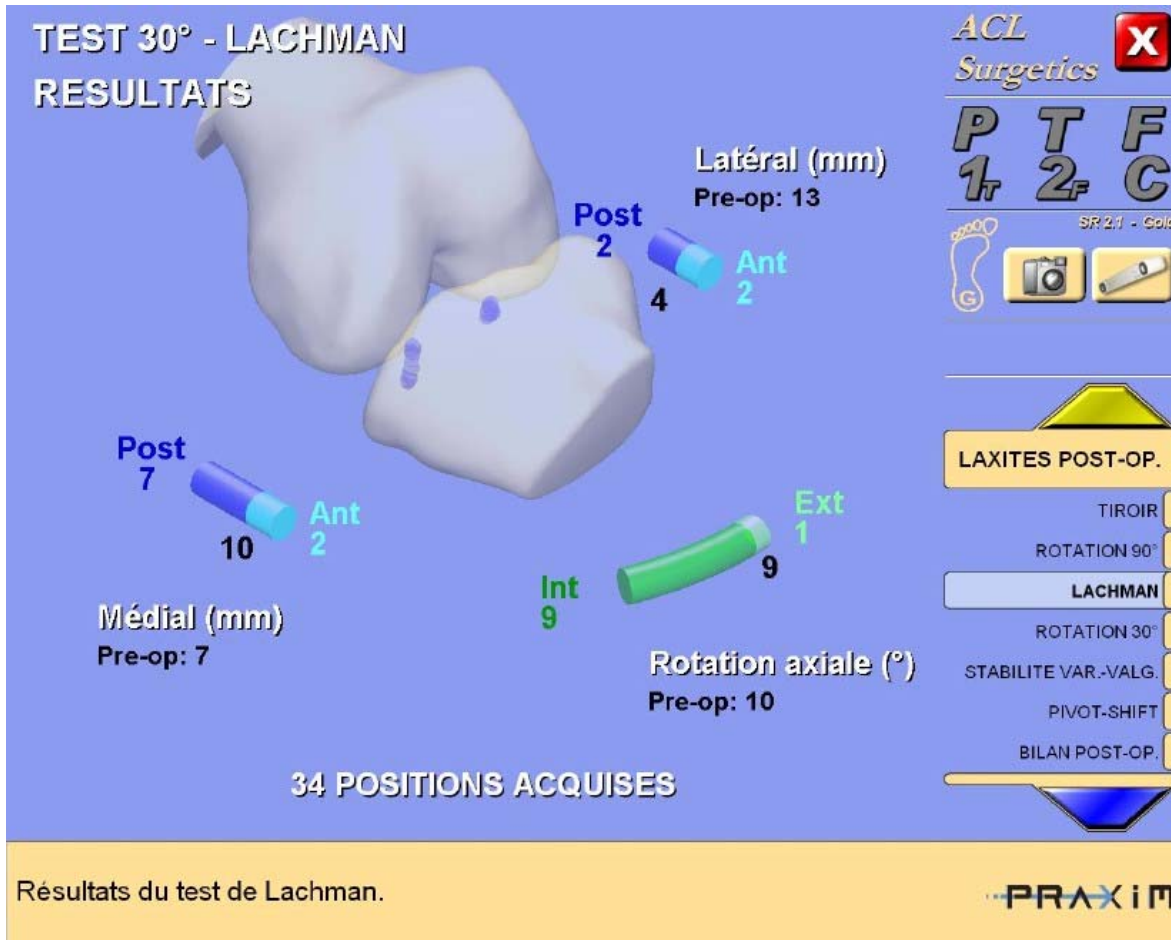


Figure 3c.



Figure 4.

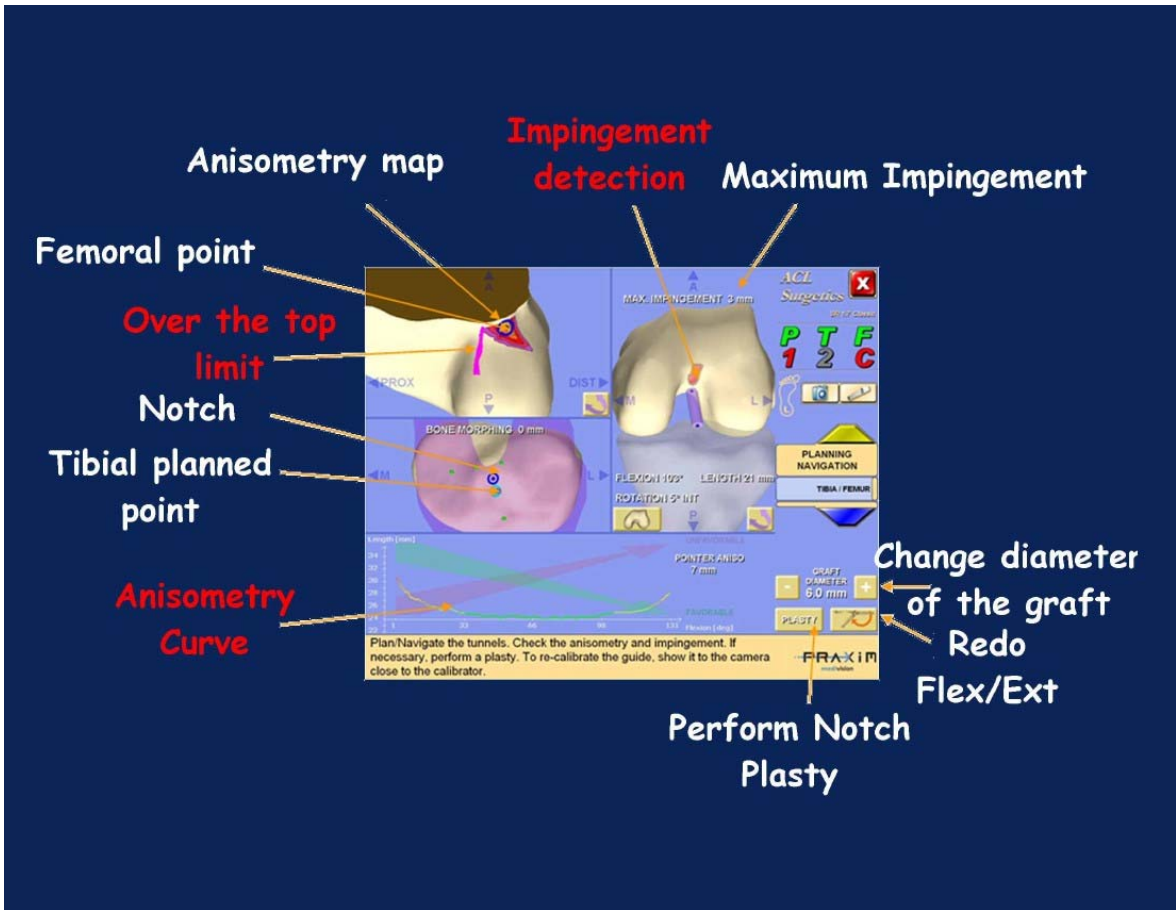


Figure 5

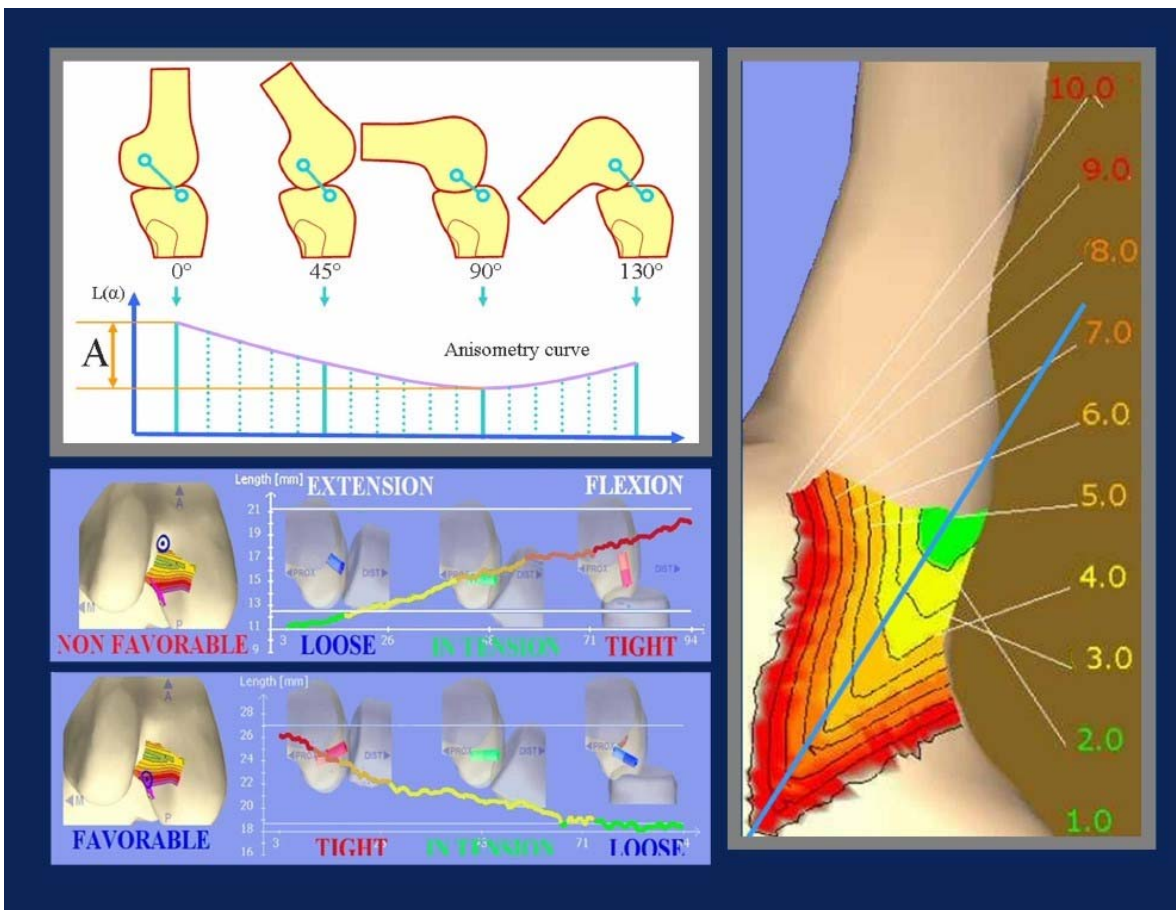


Figure 6

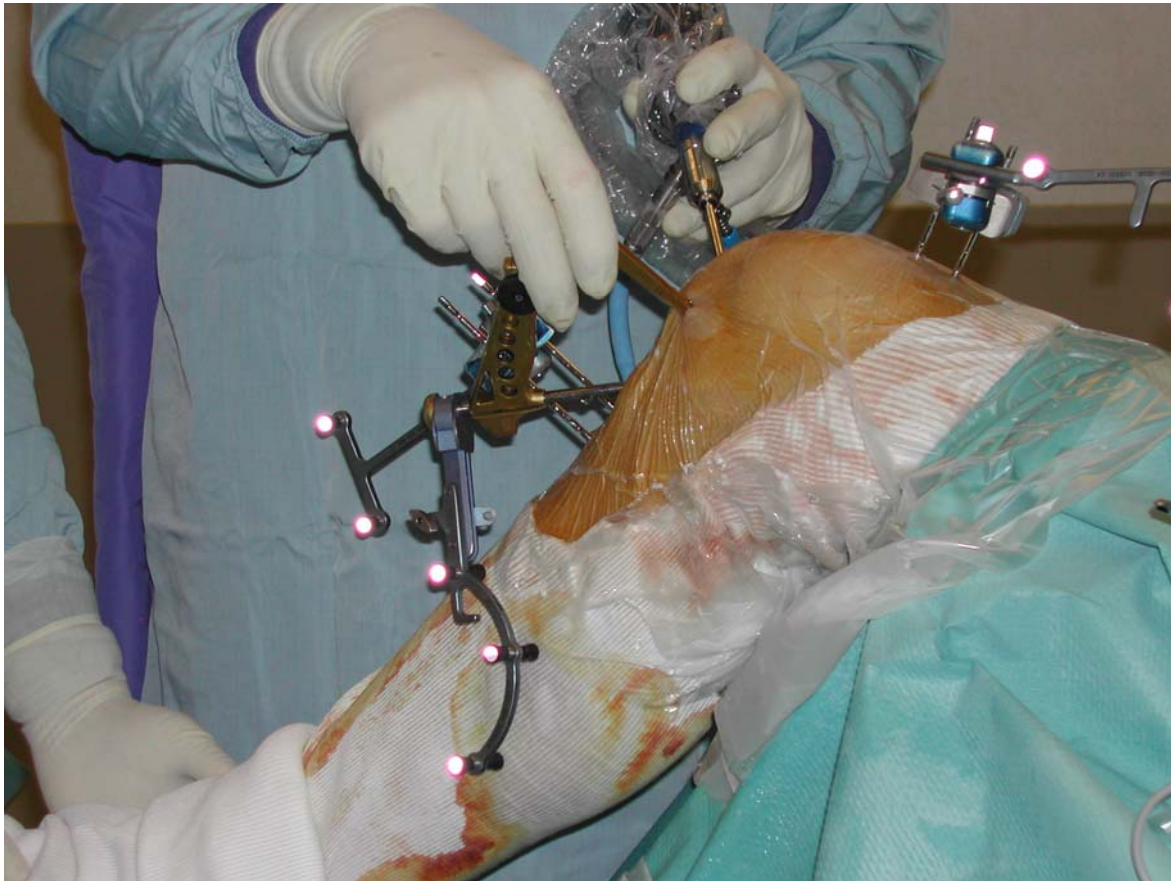


Figure 7

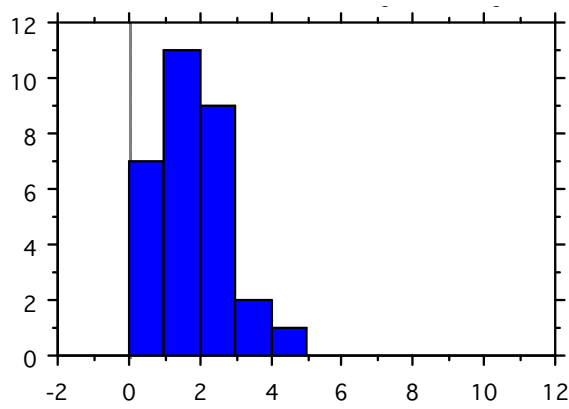
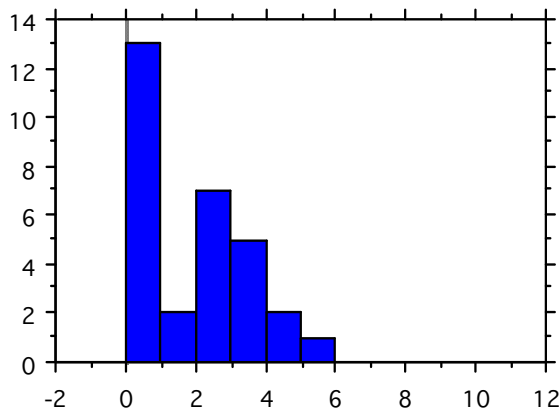


Figure 8. Histogramme de la laxité en mm mesurée au Telos à 200 N. a : groupe non navigué ; b : groupe navigué

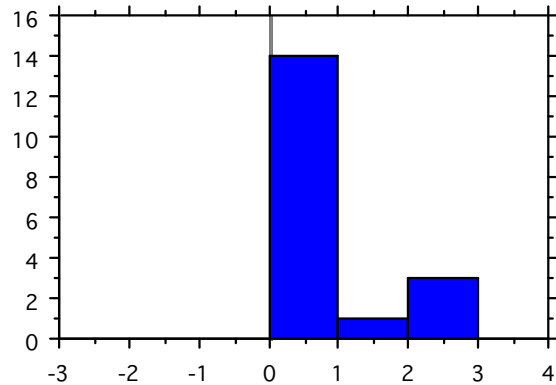
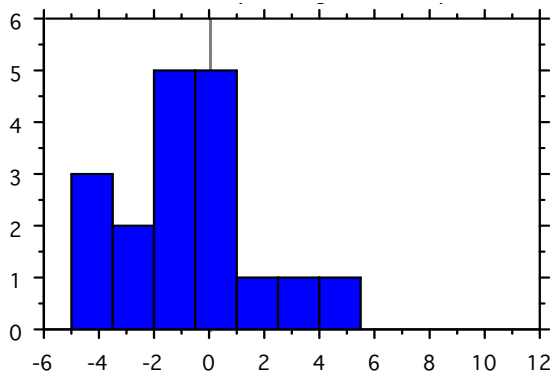


Figure 9. Dispersion de la valeur ATB. a : groupe non navigué ; b : groupe navigué



chirurgicales de réalisation des tunnels que de méthodes de fixation de la greffe. L'outil de navigation permet de s'adapter à toutes ces exigences. Il s'agit d'un système extrêmement flexible, interactif et également intuitif pour le chirurgien. Des marqueurs sont placés sur les guides tibial et fémoral ou sur le moteur (un seul guide est alors suffisant). Le chirurgien voit à l'écran en temps réel le point d'émergence articulaire. Il lui suffit alors d'atteindre le point souhaité à l'aide de son système conventionnel. Une opération similaire est réalisée pour le tunnel fémoral : le chirurgien peut ainsi réaliser ce tunnel par voie arthroscopique (portale) antéro-médiale, par voie trans-tibiale ou de dehors en dedans. Une fois la greffe fixée, le chirurgien peut palper un couple de fibre et visualiser en temps réel, non seulement le comportement isométrique de ce couple de points, mais également un éventuel conflit avec l'échancrure et ainsi réaliser une plastie si nécessaire.

## Applications

Quatre grandes applications sont retenues et actuellement à la disposition du chirurgien.

### Greffe à un faisceau de première intention

C'est l'application du protocole définissant le positionnement d'un seul tunnel tibial et d'un tunnel fémoral.

### Reconstruction anatomique du ligament croisé antérieur

L'originalité de cette application consiste à naviguer successivement : le faisceau antéro-médial puis le faisceau postéro-latéral. La procédure consiste à débiter par l'enregistrement du faisceau antéro-médial. La procédure habituelle est alors appliquée. Le faisceau postéro-latéral est ensuite choisi en naviguant avec les outils de visée tibiale et fémorale. Le chirurgien peut disposer à tous moments d'une véritable cartographie à la fois sur les surfaces tibiale et fémorale. Il peut ainsi, soit utiliser les ancillaires conventionnels de reconstruction anatomique, soit visualiser ces points à la demande. Il peut également à tout moment inverser la navigation des 2 faisceaux.

### Chirurgie de révision

De la même façon, le protocole permet d'enregistrer les tunnels de l'ancienne greffe. Le chirurgien peut ainsi contrôler le bon positionnement des tunnels tibiaux et fémoraux et en déduire l'éventuelle correction. Au niveau du tibia, le conflit avec l'échancrure est établi ; le chirurgien peut corriger le positionnement de ce tunnel sans aucune difficulté. Au niveau fémoral, la cartographie permet de constater si l'ancien greffon a un bon profil de son anisométrie. Dans les cas où l'anisométrie est défavorable, le chirurgien choisit le nouveau tunnel fémoral dans la zone d'anisométrie favorable. Cet outil est le seul permettant de faire le diagnostic de mauvais positionnement du greffon et d'établir ainsi la correction souhaitée (fig. 6).

### Plastie extra-articulaire

Une procédure spécifique à ce logiciel permet de réaliser une cartographie de l'isométrie des compartiments médiaux et/ou latéraux du genou. L'étude de la laximétrie pré-opératoire est un élément décisionnel fondamental d'adopter ou non une plastie extra-articulaire à la reconstruction intra-articulaire. Si l'option est de réaliser une plastie extra-

articulaire, le chirurgien a le choix de coupler le point de sortie du tunnel fémoral avec le point de retour extra-articulaire tibial (plastie dite mixte). Il peut aussi dissocier les plasties (plastie extra-articulaire isolée) ; il réalisera alors une véritable cartographie sur la surface fémorale ou tibiale à partir du point d'insertion de la greffe (fig. 7).

## Résultats

### Etude prospective randomisée

Dans une étude prospective randomisée, S Plaweski et al (14) ont comparé les résultats d'une série de 60 patients qui ont bénéficié d'une reconstruction ligamentaire du LCA avec ou sans le système de navigation. Aucune complication liée au système de navigation n'a été constatée. Après un recul clinique de 2 ans, le score IKDC était classé A dans 22 cas sur 30 pour le groupe non navigué avec une laxité différentielle calculée au Telos à 1,5 mm (0 à 6) et dans 26 cas pour le groupe navigué avec une laxité de 1,3 mm (0 à 5). La laxité était de moins de 2 mm dans 96,7% des cas dans le groupe navigué alors qu'elle n'était que de 83% dans le groupe non navigué. Pour les auteurs, l'utilisation de l'ordinateur a permis de resserrer la courbe de Gauss et d'éliminer les *outliers* (fig. 8). Le placement du tunnel tibial a été optimisé avec une différence statistiquement significative ( $p < 0,037$ ) évitant le conflit avec l'échancrure dans tous les cas des genoux navigués (fig. 9).

À ce jour, plus de 500 reconstructions ligamentaires utilisant ce système, ont été réalisées dans notre centre. Basé sur cette étude et notre propre expérience, nous avons comparé *in vivo*, à propos d'un groupe de 96 patients, le placement des tunnels, réalisés soit de façon classique avec une instrumentation manuelle, soit avec le système de navigation.

### Méthodes

La technique de reconstruction était constante : semi-tendineux et droit interne fixés au niveau du tibia par une vis bio-résorbable et au niveau du fémur par un endobouton. Les guides manuels étaient : guide tibial Acufex PCL related (Smith and Nephew, Andover, MA USA) et guide fémoral « In/Out ».

Le positionnement des tunnels donnés par l'ancillaire était d'abord choisi de façon aveugle par l'opérateur ; le logiciel de navigation enregistrait leur position. Les objectifs de placement étaient d'avancer au plus le tunnel tibial tout en évitant le conflit avec l'échancrure et de minimiser au maximum l'anisométrie avec une courbe favorable.

### Résultats

Le temps opératoire est augmenté de 17 minutes en moyenne (10 à 30) ; aucune complication per- ou post-opératoire n'a été notée. Pour le tibia, la sélection du tunnel, proposée par l'instrumentation manuelle, était dans tous les cas trop postérieure. L'utilisation du système navigué a permis de modifier le positionnement du tunnel tibial en l'avancant et en le médialisant. Ces modifications ont été possibles dans tous les cas grâce à la visualisation de la projection de l'échancrure sur le tibia et ainsi d'éviter tout conflit. Pour le fémur, l'instrumentation manuelle a proposé une bonne position avec une bonne anisométrie dans 60% des cas et une courbe favorable dans 85% des cas. L'opérateur a changé la position initiale, proposée par l'instrumentation manuelle, dans 40% des cas, évitant 15% de mauvais positionnement du tunnel fémoral. Ainsi, ce système a permis d'optimiser constamment le placement du tunnel tibial de façon la plus antérieure possible, augmentant la stabilité antérieure du genou. Les outils de navigation ont été utiles dans 40% des cas pour le positionne-

ment du tunnel fémoral (14,15).

### Étude clinique à propos de 30 cas de chirurgie de révision

L'utilité clinique du système de navigation a été également évaluée pour les procédures de révision des reconstructions ligamentaires du LCA.

#### Méthodes

L'étude a inclus 30 patients ayant bénéficié d'une première reconstruction ligamentaire (2 ligaments synthétiques, 17 DIDT, 11 KJ). Ils présentaient une laxité importante témoignant de l'échec de la plastie. La chirurgie de reprise a consisté en la réalisation de 13 plasties au DIDT à 4 faisceaux et 17 reconstructions au ligament rotulien type Kenneth Jones.

La position des tunnels tibiaux et fémoraux a été analysée et enregistrée grâce au système de navigation : la courbe d'anisométrie de la plastie initiale a été enregistrée par ordinateur. L'opérateur a ensuite reconstruit le ligament croisé suivant les standards de la navigation.

#### Résultats

Pour 18 genoux, les auteurs ont rapporté un mauvais positionnement des tunnels (68% des cas) : 8 tunnels tibiaux étaient trop antérieurs, en conflit avec l'échancrure ; 10 étaient trop postérieurs avec une anisométrie supérieure à 8 mm. Seulement 12 tunnels étaient placés correctement. Dans 60% des cas (18 genoux) la courbe d'anisométrie était défavorable, due à un mauvais positionnement du tunnel fémoral (fig. 6).

#### Discussion

La difficulté habituelle de reprise ligamentaire apparaît dans l'analyse de l'échec et la réalisation des nouveaux tunnels. Ce système de navigation nous autorise à comprendre les raisons de l'échec et d'éviter de reproduire un mauvais positionnement des nouveaux tunnels. Le système de navigation Praxim est ainsi devenu un outil indispensable dans cette application. Il permet également une justification médico-légale. Associé à l'outil de navigation, le chirurgien peut choisir parmi la grande panoplie des ancillaires et systèmes de fixation le procédé le plus adéquat, ce qui nous a permis de simplifier grandement cette chirurgie de révision.

### Discussion et conclusion

La reconstruction ligamentaire du LCA est un traitement de choix pour les patients jeunes et actifs, présentant une déficience de ce ligament ainsi que des symptômes d'instabilité. Les procédés de réparation sont largement validés, mais avec un taux estimé d'échec relativement élevé, compris entre 10% et 20%. Ceci conduit les recherches cliniques à se tourner vers des techniques de reconstruction plus élaborées de type reconstruction anatomique (16).

Les raisons de ces échecs peuvent être associées à l'inadéquation entre la capacité du chirurgien à reconstruire de façon anatomique et isométrique les faisceaux du LCA, et de restaurer une cinématique normale du genou.

La navigation chirurgicale permet non seulement de choisir le bon positionnement des greffons, mais aussi visualise en temps réel la laximétrie multidimensionnelle du genou, en proposant un véritable échange interactif, entre le *testing* per opératoire et un écran où les valeurs de laxité peuvent s'afficher.

Elle autorise également le chirurgien à contrôler l'efficacité de sa reconstruction ligamentaire, en affichant ces mêmes valeurs, une fois le ou les greffons fixés.

À l'heure actuelle, naviguer la chirurgie ligamentaire du ge-

nou permet d'évaluer en temps réel l'aspect dynamique de la cinématique et la stabilité du genou. Ceci autorise le chirurgien à proposer une chirurgie de reconstruction ligamentaire dite « à la carte », pouvant associer plusieurs techniques : chirurgie à un faisceau ; chirurgie de reconstruction anatomique ; chirurgie de reprise ; plastie extra-articulaire associée ou non à la plastie intra-articulaire.

### Références

1. Lavallée S, Julliard R, Orti R, Cinquin P, Carpentier E. Anterior Cruciate Ligament reconstruction: computer assisted determination of the most isometric femoral attachment point. *Orthop Traumatol* 1993;3:87-92.
2. Harner CD, Giffin JR, Duntzman RC, Annunziata CC, Friedman MJ. Evaluation and treatment of recurrent instability after anterior cruciate ligament reconstruction. *Instr Course Lect* 2001;50:463-74.
3. Wirth CJ, Kohn D. Revision anterior cruciate ligament surgery: experience from Germany. *Clin Orthop Relat Res* 1996;325:110-5.
4. Julliard R, Cinquin Ph., Lavallee S. La surgétique du ligament croisé antérieur. La navigation sans imagerie. *Rev Chir Orthop* 2002;88:1S88-1S90.
5. Dessenne V, Lavallée S, Julliard R, Orti R, Martelli S Cinquin P. Computer-assisted knee anterior cruciate ligament reconstruction: first clinical tests. *J Image Guid Surg* 1995;1:59-64.
6. Julliard R, Lavallee S, Dessenne V. Computer Assisted Anterior Cruciate Ligament reconstruction. *Clin Orthop Relat Res* 1998; (354):57-64.
7. Julliard R, Plaweski S, Lavallee S. ACL Surgetics: an efficient computer-assisted technique for ACL reconstruction. In: *Navigation and robotics in total joint and spine surgery*. Springer edit 2003:405-11.
8. Colombet P, Allard M. Computer-assisted surgery of the anterior cruciate ligament. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 2004;90:3S21-28.
9. Colombet P, Allard M, Granchi C, Plaskos C, Lavallée S. Anterior Cruciate Ligament Reconstruction using knee joint laxity measurements and bendable ligament model. In *CAOS Annual Meeting Helsinki Finland, 2005*.
10. Fleute M. Shape reconstruction for computer-assisted surgery based on non-rigid registration of statistical models with intraoperative point data and X-ray images. *TIMC IMAG Laboratory, 2001*.
11. Fleute M, Lavallee S, Julliard R. Incorporating a statistically based shape model into a system for computer-assisted anterior cruciate ligament surgery. *Med image Anal* 1999;3(3):209-22.
12. Stindel E, Gil D, Briard JL, Merloz P, Dubrana F, Lefevre C. Detection of the center of the hip joint in computer-assisted surgery: an evaluation study of the Surgetics algorithm. *Comput Aided Surg* 2006;10(3):133-9.
13. Solomon D, Pearle A, Lenhoff M, Granchi C, Wickiewicz T, Warren R. Evaluation of coupled knee motions and force on the ACL with varus loading in posterolateral corner deficient knees. *ORS 52nd Annual Meeting, Chicago 2006*.
14. Plaweski S, Cazal J, Rosell P, Merloz P. Anterior cruciate ligament reconstruction using navigation: a comparative study on 60 patients. *Am J Sports Med* 2006;34(4):542-52.
15. Menetrey J, Suva D, Genoud P, Sati M, Fritschy D, Hoffmeyer P. Validation de différents guides de visée utilisés dans la reconstruction du LCA par le système CAOS. Communication. *Congrès de la Société Française d'Arthroscopie. Annecy 2000*.
16. Harner CD. Controversies in ACL Surgery. *AOSSM 2005 Annual Meeting. Keystone 2005*.

### Remerciements

Les auteurs remercient Carine Granchi, Stéphane Lavallée, les Drs Mikael Kirchmeier et Philippe Colombet et le Pr Philippe Merloz pour leur contribution aux travaux présentés dans cet article.