

UNIVERSITÉ DE LILLE  
**FACULTÉ DE MÉDECINE HENRI WAREMBOURG**  
Année : 2021

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT  
DE DOCTEUR EN MÉDECINE

**Reconstruction osseuse des membres par lambeau libre de fibula :  
Analyse rétrospective de 24 patients.**

Présentée et soutenue publiquement le 17 septembre 2021 à 18 heures  
au Pôle Formation  
par **Lisa BARRY**

---

**JURY**

**Président :**

**Madame le Professeur Véronique DUQUENNOY-MARTINOT**

**Assesseurs :**

**Monsieur le Professeur Christophe CHANTELOT**

**Madame le Docteur Alexandra ERBLAND**

**Directrices de thèse :**

**Madame le Docteur Elvire GUERRE**

**Madame le Docteur Louise PASQUESOONE**

---



## AVERTISSEMENT

La Faculté n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses :  
celles-ci sont propres à leurs auteurs.

# TABLE DES MATIERES

<b>I.</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>II.</b>	<b>RAPPELS</b> .....	<b>2</b>
A.	Anatomie de la fibula.....	2
B.	Voies d'abord.....	15
C.	Physiologie de la consolidation osseuse.....	17
D.	Intérêts des greffes vascularisées.....	18
E.	Avantages de la fibula vascularisée .....	23
<b>III.</b>	<b>MATERIELS ET METHODES</b> .....	<b>24</b>
A.	Critères recueillis .....	24
B.	Technique chirurgicale réalisée .....	27
C.	Analyses statistiques.....	39
<b>IV.</b>	<b>RESULTATS</b> .....	<b>40</b>
A.	Population .....	40
B.	Technique chirurgicale .....	40
C.	Analyse principale : taux et délai de consolidation .....	44
D.	Analyse secondaire : séquelles du site donneur.....	47
E.	Site receveur.....	47
F.	Satisfaction globale et score SF-36 .....	48
<b>V.</b>	<b>DISCUSSION</b> .....	<b>50</b>
A.	Consolidation .....	50
B.	Imagerie pré-opératoire .....	59
C.	Une des complications principales de la fibula vascularisée : la fracture du greffon .....	57
D.	Complications et séquelles du site donneur .....	59
E.	Indications .....	67
F.	Alternatives .....	69
G.	Limites de notre étude.....	77
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>79</b>
	<b>ANNEXE 1 : Rôle de la fibula dans l'articulation du genou</b> .....	<b>80</b>
	<b>ANNEXE 2 : Chronologie de la « creeping substitution »</b> .....	<b>82</b>
	<b>ANNEXE 3 : Score AOFAS (258)</b> .....	<b>83</b>
	<b>ANNEXE 4 : Echelle VSS (259)</b> .....	<b>84</b>
	<b>ANNEXE 5 : Anastomoses veineuses</b> .....	<b>85</b>
	<b>ANNEXE 6 : Imagerie pré-opératoire</b> .....	<b>87</b>
	<b>ANNEXE 7 : Autres complications du site donneur</b> .....	<b>91</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>92</b>

## LISTE DES ABBREVIATIONS

<b>AF</b>	Artère fibulaire
<b>AOFAS</b>	American Orthopaedic Foot and Ankle Society
<b>AOMI</b>	Artériopathie Oblitérante des Membres Inférieurs
<b>AP</b>	Artère poplitée
<b>ATA</b>	Artère tibiale antérieure
<b>ATP</b>	Artère tibiale postérieure
<b>LCF</b>	Ligament calcanéo-fibulaire
<b>LCL</b>	Ligament collatéral latéral
<b>LTFA</b>	Ligament talo-fibulaire antérieur
<b>LTFAI</b>	Ligament tibio-fibulaire antéro-inférieur
<b>LTFP</b>	Ligament talo-fibulaire postérieur
<b>LTFPI</b>	Ligament tibio-fibulaire postéro-inférieur
<b>MIO</b>	Membrane InterOsseuse
<b>NFP</b>	Nerf fibulaire profond
<b>NFS</b>	Nerf fibulaire superficiel
<b>PAM</b>	Peronea Arteria Magna
<b>TTF</b>	Tronc tibio-fibulaire
<b>VSS</b>	Vancouver Scar Scale

## I. INTRODUCTION

Les pertes de substance osseuses des membres sont fréquentes et d'étiologies variées : traumatiques, infectieuses, tumorales. Les techniques de reconstruction sont nombreuses et peuvent faire appel isolément ou de manière combinée à des greffes osseuses vascularisées ou non, un transport osseux ou encore du matériel prothétique. Toutes ces options doivent répondre à plusieurs objectifs thérapeutiques : préserver autant que possible la longueur et la fonction du membre (même si un raccourcissement peut être toléré dans certains cas (1,2)) tout en limitant la durée de l'immobilisation.

Dans les cas de pertes de substance étendues (> 6-8cm) ou d'échec de greffe conventionnelle (3,4), le lambeau libre de fibula ou greffe de fibula vascularisée représente parfois la seule alternative conservatrice. Sa première utilisation remonte à 1974 par Ueba (5) dans le cadre d'une résection d'un neurofibrome avec atteinte de l'ulna chez un enfant de 11 ans. Néanmoins, c'est à Taylor que l'on doit la première publication de la technique chirurgicale appliquée à deux cas de reconstruction tibiale post-traumatique en 1975 (6). Des raffinements techniques ont ensuite été décrits par Gilbert en 1979 avec notamment la voie d'abord postéro-latérale ou latérale (7). Ce lambeau présente pour avantages d'autoriser un prélèvement allant jusqu'à 25cm de longueur (8) et de permettre une consolidation plus rapide qu'une greffe non vascularisée au prix de séquelles souvent modérées au niveau du site donneur (9).

Bien que plusieurs séries aient été publiées sur l'utilisation de cette technique dans la reconstruction des os longs, elles concernent des échantillons de petite taille et retrouvent des résultats variables. L'objectif de cette étude était donc d'évaluer les résultats des lambeaux libres de fibula réalisés pour une reconstruction osseuse de membre par les équipes des Centres Hospitaliers Universitaires de Lille et de Bordeaux. L'analyse principale portait sur la consolidation et l'analyse secondaire évaluait les séquelles du site donneur.

## II. RAPPELS

### A. Anatomie de la fibula

#### *Ostéologie et myologie*

La fibula appartient au squelette appendiculaire. C'est un os long à coupe triangulaire possédant quatre bords : le bord antérieur, le bord postérieur, le bord interosseux et la crête médiale. Ces quatre bords délimitent trois faces. La face latérale se trouve entre le bord antérieur et le bord postérieur. Sur cette face s'insèrent les muscles long et court fibulaires, ainsi que le biceps fémoral à l'apex. La face médiale, située entre le bord antérieur et la crête médiale, est séparée en deux zones par le bord interosseux qui supporte la membrane interosseuse (MIO). En avant de ce bord s'insèrent trois muscles de la loge antérieure de la jambe : le long extenseur des orteils, le long extenseur de l'hallux et le troisième fibulaire ou péronier antérieur. En arrière de ce bord s'insère le muscle tibial postérieur qui appartient à la loge postérieure de jambe. Enfin, la face postérieure est délimitée par le bord postérieur et la crête médiale. Elle porte les insertions du muscle soléaire à sa partie proximale et du long fléchisseur de l'hallux sur ses  $\frac{3}{4}$  inférieurs (7) (Figure 1, Figure 11).

Sur la fibula s'insèrent deux cloisons provenant de l'aponévrose jambière : le septum intermusculaire latéral sur le bord postérieur, et le septum intermusculaire antérieur sur le bord antérieur. Ils séparent les loges musculaires postérieure et latérale, puis latérale et antérieure respectivement.

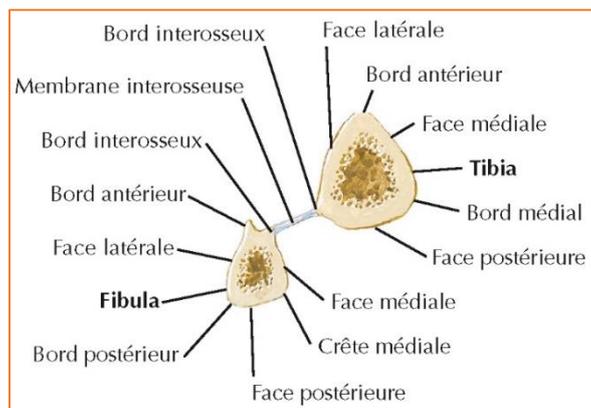


Figure 1: Coupe transversale des deux os de la jambe (11)

La fibula possède trois surfaces articulaires. L'articulation tibio-fibulaire proximale est une articulation synoviale se situant entre la face interne de la tête fibulaire et la face postéro-latérale du condyle tibial latéral (12). Elle présente de nombreuses variations anatomiques, que ce soit sur le type ou l'orientation des surfaces articulaires (13). Ses systèmes stabilisateurs sont multiples et principalement représentés par les ligaments tibio-fibulaires antéro- et postéro-supérieurs (14). S'y ajoutent la MIO, le tendon du biceps fémoral et les structures musculo-ligamentaires postéro-externes du genou (15,16) (ANNEXE 1 : Rôle de la fibula dans l'articulation du genou).

En distal, on retrouve les articulations talo-crurale et tibio-fibulaire distale. La partie latérale de l'articulation talo-crurale se trouve entre la face latérale du corps du talus et la face interne de la malléole fibulaire, surface de forme triangulaire à base supérieure. Elle est stabilisée par le ligament collatéral latéral (LCL) qui comprend trois faisceaux : le ligament talo-fibulaire antérieur (LTFA), le ligament calcanéo-fibulaire (LCF) et le ligament talo-fibulaire postérieur (LTFP). L'articulation tibiofibulaire distale est une syndesmose, articulant la partie médiale de la fibula distale avec l'incisure fibulaire du tibia. Elle est stabilisée par la MIO et les ligaments tibio-fibulaires antéro- et postéro-inférieurs (LTFAI, LTFPI) (17) (Figure 2).

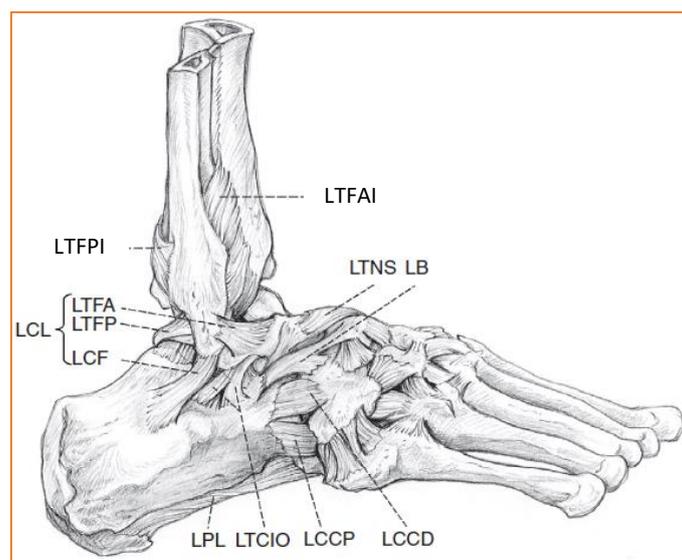


Figure 2: Vue latérale des ligaments de la cheville. LCL: ligament collatéral latéral, LTFA: ligament talo-fibulaire antérieur, LTFP: ligament talo-fibulaire postérieur, LCF: ligament calcanéo-fibulaire, LTFPI: ligament tibio-fibulaire postéro-inférieur, LTFAI: ligament tibio-fibulaire antéro-inférieur (17)

### *Biomécanique de la fibula*

La fibula transmet entre 3,5 et 15,5% du poids du corps en fonction du degré de flexion de la cheville (18). Lors de la flexion plantaire, les muscles fléchisseurs du pied entraînent une rotation latérale et un abaissement de la fibula. De plus, cette dernière réalise un mouvement de translation latérale qui permet le desserrage de la pince tibio-fibulaire (19). La mortaise s'approfondit et la stabilité de la cheville augmente (18). Lors de la flexion dorsale, ces mouvements sont inversés. La charge mécanique supportée par la fibula est alors maximale (20).

Au niveau du genou, la fibula joue un rôle important dans le contrôle de la rotation externe via les insertions tendino-ligamentaires qu'elle supporte : le biceps fémoral, le point d'angle postéro-externe et le ligament collatéral latéral du genou (21). Lors de la flexion du genou, la tête fibulaire se translate postérieurement sous l'effet du biceps fémoral. En extension, elle se déplace antérieurement via la mise en tension du ligament collatéral latéral (22). Par ailleurs, la cheville et le genou forment un couple de torsion. En effet, leurs mouvements sont liés par l'intermédiaire de la MIO et des articulations tibio-fibulaires proximale et distale. Par exemple, la dorsiflexion du pied entraîne une avancée de la tête fibulaire (23).

### *Un rapport anatomique à connaître : le nerf fibulaire commun*

L'un des rapports anatomiques importants est le nerf fibulaire commun (ex-sciatique poplitée externe). Issu du nerf sciatique, il suit le tendon du biceps fémoral puis contourne le col fibulaire avant de pénétrer dans le tunnel des fibulaires où il se divise en deux branches principales (Figure 3). La première est le nerf fibulaire profond (NFP, ex-tibial antérieur), qui traverse le septum intermusculaire antérieur pour suivre l'artère tibiale antérieure entre le muscle long extenseur des orteils et le muscle tibial antérieur. C'est un nerf mixte qui chemine à proximité de la fibula. Son contingent moteur est responsable de l'extension de la cheville et des orteils via l'innervation des muscles tibial antérieur, long extenseur de

l'hallux, long extenseur des orteils et troisième fibulaire. Son contingent sensitif assure l'innervation du 1<sup>er</sup> espace interosseux dorsal (24,25).

La deuxième branche est le nerf fibulaire superficiel (NFS), qui traverse le muscle long fibulaire puis descend dans la loge latérale entre long et court fibulaires. Il chemine ensuite entre le muscle long extenseur des orteils et le court fibulaire puis traverse le fascia crural et devient sous-cutané environ 12 cm au-dessus de la malléole externe (26). C'est également un nerf mixte. Il est responsable de l'éversion du pied via l'innervation des muscles long et court fibulaires. Au niveau sensitif, il innerve l'essentiel du dorsum du pied et de la face antéro-latérale de la cheville via ses deux branches, les nerfs cutanés dorsaux intermédiaire et médial (27).

Il existe néanmoins des variations sur la hauteur de division du nerf fibulaire commun. Dans l'étude de Deutsch et al. (28) menée sur 70 membres inférieurs, cette division se trouve dans 81,4% des cas au niveau ou distalement au col fibulaire. Dans les autres cas, la division est soit proximale au genou (10%), soit entre le genou et le col fibulaire (8,6%). Dans l'étude de Rausch et al. menée sur 18 jambes (29), la division du nerf fibulaire commun a lieu en moyenne à 2,8cm (0,6-4,2cm) de la tête de la fibula. Deux autres mesures rapportées dans cet article ont une pertinence clinique importante. La distance entre la tête de la fibula et l'endroit où le NFP croise le milieu de la face externe de la fibula est de 3,8cm en moyenne (2,8-5,7cm). Pour le NFS, cette distance est en moyenne de 4,9cm (3,2-7,1cm).

Le NFS présente également des variations anatomiques à sa partie distale. Blair et Botte en ont décrit 3 types. Dans le type A (72%), il pénètre le fascia crural puis se divise en deux branches. Dans les types B (16%) et C (12%), ses deux branches naissent à des niveaux distincts. La différence porte alors sur l'émergence du nerf cutané dorsal intermédiaire, postérieur à la fibula dans le type B et antérieur à celle-ci dans le type C (30). Dans une étude menée sur 23 pièces anatomiques par Relvas-Silvas et al., le NFS traverse le fascia

crural à 11.4 +/- 4.4cm de la pointe de la malléole latérale, et à 0.6 +/- 0.8 cm du bord antérieur de la fibula. La division en deux branches a lieu à 8.1 +/- 6.9cm de la malléole (31).

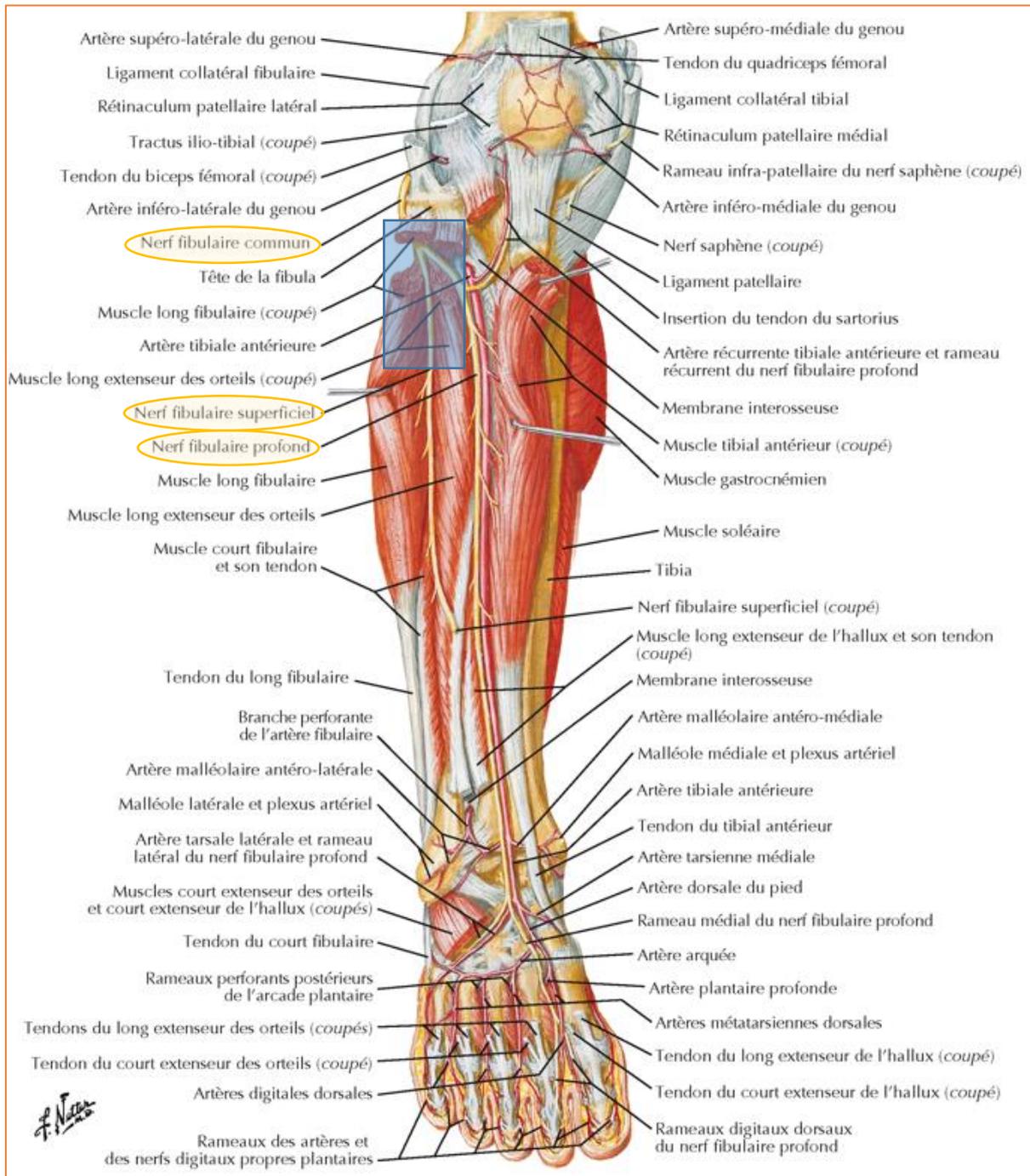


Figure 3: Vue antérieure du trajet des nerfs fibulaires superficiel et profond. En bleu, zone à risque de lésion lors du prélèvement (11)

## *Vascularisation*

### VASCULARISATION DE LA JAMBE

L'artère fémorale (anciennement fémorale superficielle) devient l'artère poplitée (AP) au niveau du hiatus du grand adducteur. Celle-ci donne alors plusieurs collatérales : l'artère du biceps fémoral, les artères géniculées supéro-médiale et supéro-latérale, l'artère médiane du genou, les artères géniculées inféro-médiale et inféro-latérale, ainsi que des branches pour les gastrocnémiens médial et latéral. Elle se termine en donnant naissance aux trois axes jambiers selon différentes configurations.

La classification principalement utilisée pour décrire l'anatomie de l'AP et de ses branches est la classification de Lippert modifiée par Kim (32). Le type IA, qui est le plus fréquent (92%), correspond à une hauteur de division « normale » de l'AP, c'est-à-dire au niveau du bord inférieur du muscle poplité. Elle donne alors naissance à l'artère tibiale antérieure (ATA) puis au tronc tibio-fibulaire postérieur (TTF) qui se divise en artère tibiale postérieure (ATP) et artère fibulaire (AF) environ 7 à 10 cm sous le sommet de la tête de la fibula (33). Le type II correspond à une division haute de l'AP, au-dessus du muscle poplité. Le type III correspond à une division de hauteur normale mais avec une hypo- ou aplasie d'un ou plusieurs des trois axes jambiers (Tableau 1). A noter qu'il n'existe pas de corrélation entre la longueur du tibia et la hauteur de division de l'AP (34).

Tableau 1: Classification de Kim-Lippert. AP : artère poplitée, ATA : artère tibiale antérieure; ATP: tibiale postérieure; AF: artère fibulaire; TTF: tronc tibio-fibulaire. \* : D'après Kim et al.(32)

Type	Description	Fréquence*	
Type I	Division à hauteur du bord inférieur du muscle poplité		
	IA	Naissance de l'ATA, puis TTF postérieur qui donne l'ATP et l'AF	92,2 %
	IB	Trifurcation de l'AP qui donne l'ATA, l'ATP et l'AF	2 %
	IC	Bifurcation de l'AP en ATP et TTF antérieur, qui se divise en ATA et AF	1,2 %
Type II	Division au-dessus du bord inférieur du muscle poplité		
	IIA	Naissance de l'ATA au niveau ou au-dessus du genou, puis TTF postérieur	3,7 %
	IIA1	Course proximale postérieure au muscle poplité	3 %
	IIA2	Course proximale antérieure au muscle poplité	0,7 %
	IIB	Naissance de l'ATP au niveau ou au-dessus du genou, puis TTF antérieur	0,8 %
	IIC	Naissance de l'AF au niveau ou au-dessus du genou, puis tronc tibial antéro-postérieur	0,16 %
Type III	Division à hauteur du bord inférieur du muscle poplité mais hypo- ou aplasie de l'ATA et/ou l'ATP : Artère fibulaire dominante		
	IIIA	ATP hypo- ou aplasique, supplée distalement par l'AF	3,8 %
	IIIB	ATP et ATA hypo- ou aplasiques; artère pédieuse issue de l'AF	1,6 %
	IIIC	ATP et ATA hypo- ou aplasiques; ATP distale et artère pédieuse suppléées par l'AF	0,2 %

Les types IIIA, IIIB et IIIC sont également désignés sous le nom d'artère fibulaire dominante. Elle concernerait environ 5.2% de la population générale (35) et serait plus fréquente chez les femmes et chez les personnes mesurant moins d'1m50 (36). Aucun facteur ethnique n'a été retrouvé (35). Le type IIIC correspond quant à lui à la peronea arteria magna (PAM). Sa prévalence est évaluée entre 0.2 et 8.3% dans la littérature (37). D'autres classifications mentionnent également un type IIID (38) ou IV (35) qui correspond à une hypo- ou une aplasie de l'AF (IVA et IVB respectivement). Ceux-ci seraient présents chez 0.1 à 4% des patients (39,40).

Ces variations anatomiques sont parfois bilatérales. Abou-Foul et al. retrouvent dans leur revue 10 cas de bilatéralité sur 25 patients (41). Dans une seconde revue, 20% des patients présentant un type III d'un côté ont également une artère dominante du côté controlatéral ; ce nombre monte à 30% pour les types IIIA isolés (35). Dans l'article de Keen et al., 27.5% des types IIIC sont bilatéraux (42).

La classification de Lippert a des conséquences cliniques sur la levée d'un lambeau de fibula. D'abord, le type IIIC contre-indique ce lambeau au risque d'entraîner une ischémie du pied (43,44). Ensuite, les types IIIA et IIIB doivent bénéficier d'une évaluation de la dominance du réseau fibulaire sur la vascularisation du pied avant section de l'AF (Cf. V. Discussion – Imagerie ). Enfin, il existe également un risque de claudication post-opératoire dans les types IIIA et IIIB (45). Dans les types IV, la vascularisation du lambeau peut être compromise (Figure 4).

L'AF peut donc naître de l'AP ou du TTF, antérieur ou postérieur. Son trajet est parallèle à celui de l'ATP, à la face postérieure de la fibula en regard de la crête médiale. Elle chemine entre les insertions des muscles tibial postérieur et long fléchisseur de l'hallux (33). Dans le type le plus fréquent (IA), elle donne naissance à deux collatérales à sa partie distale : un rameau communiquant, qui s'anastomose avec l'ATP, et l'artère malléolaire postéro-latérale. Celle-ci s'anastomose avec l'artère malléolaire antéro-latérale, branche de l'artère pédieuse. L'AF se termine par des rameaux calcanéens latéraux à la face postéro-latérale du calcanéum. Elle ne participe donc habituellement pas à la vascularisation du pied. Cette dernière est assurée par l'ATA via l'artère pédieuse ainsi que par l'ATP via les artères plantaires médiale et latérale.

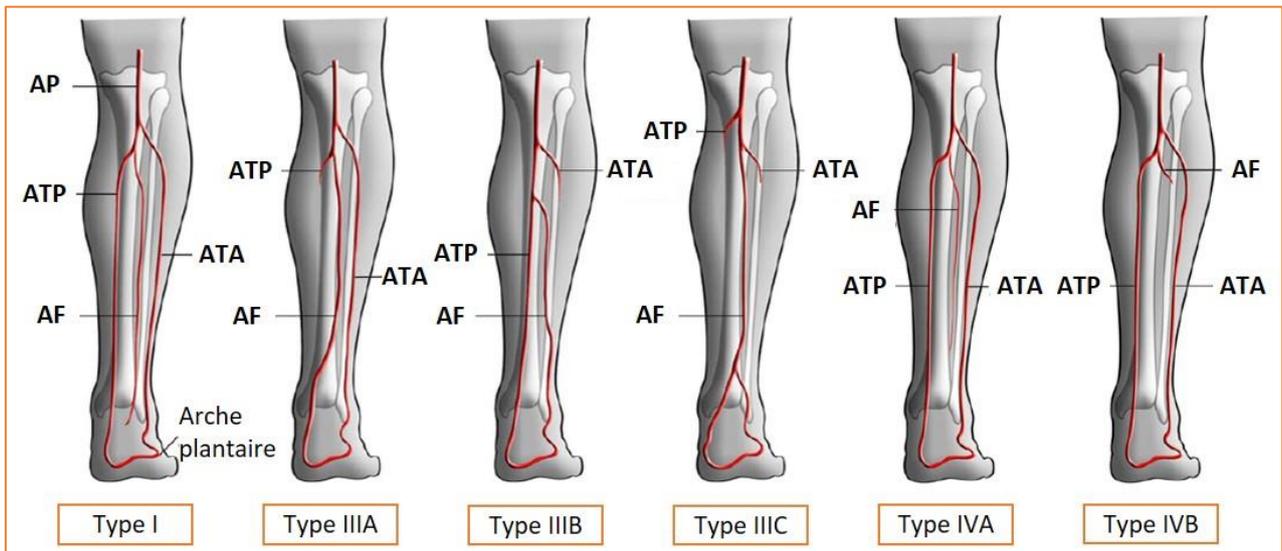


Figure 4: Variations anatomiques de l'artère poplitée. Type le plus fréquent (type I) et types à risque en cas de prélèvement d'une fibula vascularisée. D'après (35).

## VASCULARISATION DU LAMBEAU LIBRE DE FIBULA

Histologiquement, l'os peut être divisé en deux zones : l'os cortical, délimité en externe par le périoste et en interne par l'endoste, et l'os médullaire ou spongieux. Au sein de l'os cortical, les vaisseaux cheminent dans les canaux de Havers, reliés entre eux mais également à la surface osseuse et au canal médullaire via les canaux de Volkman. Il est admis que la vascularisation corticale est assurée par le système endosté et périosté dans des proportions variables, avec une zone de jonction dynamique entre les deux systèmes. On considère généralement que le système périosté assure la vascularisation des 30% externes de la corticale (46), mais ce pourcentage peut augmenter notamment chez les sujets âgés ou lors de l'interruption de la vascularisation endostée.

Il existe trois types de systèmes vasculaires (47) dans le système osseux appendiculaire (membres et ceintures pelvienne et scapulaire). L'artère nourricière pénètre l'os par le foramen nourricier pour assurer la vascularisation corticale diaphysaire et métaphysaire via le périoste et l'endoste. Elle donne également des artères médullaires ascendantes et descendantes (48). Dans le cas de la fibula, la branche descendante est plus longue et communique avec les branches périostées dans la région supra-malléolaire externe (33). Ensuite, les vaisseaux périostés pénétrants situés en métaphyse et en épiphyse participent à la vascularisation périostée et dans une moindre mesure à la vascularisation endostée. Ils ne permettent donc pas la levée d'un greffon vascularisé bicortical mais uniquement monocortical ou cortico-spongieux. Enfin, il existe des vaisseaux périostés non pénétrants qui participent à la vascularisation périostée uniquement, soit directement, soit après passage à travers un muscle ou un fascia (Figure 5).

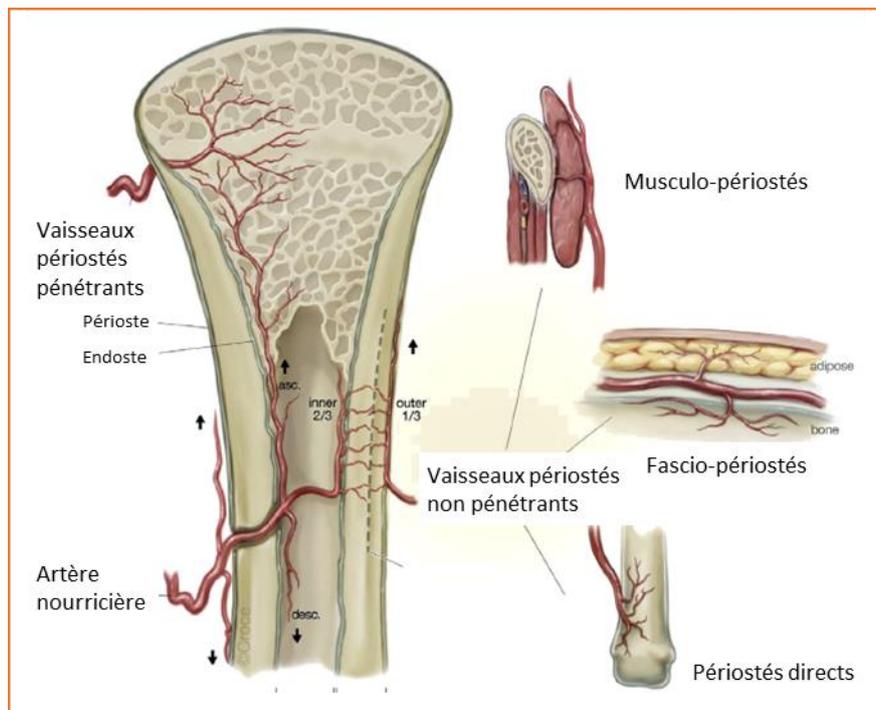


Figure 5: Vascularisation osseuse selon (47)

Selon Taylor (6), la vascularisation de la diaphyse fibulaire est assurée par une artère nourricière et des vaisseaux périostés non pénétrants directs et musculo-périostés. L'artère nourricière est l'artère fibulaire qui pénètre l'os en médio-diaphysaire (8). Dans l'étude de McKee et al. portant sur 305 fibulas, 86.4% des fibulas présentent un foramen nourricier unique. Celui-ci se trouve verticalement dans 96% des cas au niveau du tiers moyen de la fibula. Dans un plan axial, il est majoritairement situé à la face postérieure de l'os (68%), puis en regard de la crête médiale (18%) ou de la face médiale (13%). Il n'existe pas de corrélation entre la hauteur du foramen et sa localisation antéro-postérieure. Il est également intéressant de constater qu'aucun foramen n'est retrouvé dans 5.6% des cas, privant ainsi la fibula de sa vascularisation endostée. Les conséquences cliniques de cette situation sur le transfert de fibula vascularisée ne sont pas connues (49). Dans l'étude de Cariou et al., 100% des foramens se situent au niveau du tiers moyen dont 4/5<sup>ème</sup> d'entre eux à plus ou moins 3cm du milieu de l'os (50).

Les vaisseaux périostés forment quant à eux un réseau circonférentiel segmentaire le long de la diaphyse, qui autorise les ostéotomies (51). En effet, celles-ci interrompent la

vascularisation endostée et sont donc à risque de dévascularisation du lambeau dans les zones situées à distance du foramen nourricier (47). C'est alors la vascularisation périostée qui prend le relai (46). La distribution de ces vaisseaux périostés a été étudiée notamment par Fry et al. Ils ont montré que le fragment de fibula ostéotomisée devait mesurer au moins 2 cm. Il y a alors 94% de chance d'avoir au moins un vaisseau périosté sur celui-ci. Pour un fragment d'1 cm, ce nombre chute à 65% (52).

L'épiphyse proximale possède une vascularisation multiple. Deux artères sont constantes : l'artère géniculée inféro-latérale (branche de l'artère poplitée) et l'artère du col de la fibula, issue de l'artère tibiale antérieure, du tronc tibio-fibulaire, de l'artère poplitée ou de l'artère fibulaire (53). D'autres branches peuvent également provenir directement de l'artère poplitée ou de la tibiale antérieure. Grâce aux anastomoses entre l'artère tibiale antérieure et l'artère fibulaire, le prélèvement de l'épiphyse et de la diaphyse (13 cm) est théoriquement possible sur l'artère tibiale antérieure seule lorsque celle-ci est à l'origine de l'artère du col (54).

Cela est très utile dans le cadre d'une reconstruction osseuse chez l'enfant, afin de transférer la plaque de croissance. En effet, la plaque de croissance reçoit une vascularisation triple : via l'artère nourricière au niveau de la surface métaphysaire, via les vaisseaux épiphysaires au niveau de la surface épiphysaire, et via une vascularisation périchondrale qui s'anastomose avec les deux autres réseaux (47). En cas d'interruption de la vascularisation métaphysaire, on observe un allongement de la couche hypertrophique sans mort cellulaire, et sans atteinte des couches germinales ni prolifératives. En cas d'interruption de la vascularisation épiphysaire, les couches de réserve et proliférative disparaissent, entraînant un arrêt de la croissance (54). La préservation des vaisseaux épiphysaires est donc indispensable au transfert de la plaque de croissance.

Le drainage veineux de la fibula est assuré par les veines comitantes qui se jettent dans deux veines fibulaires (8). Ces dernières ne s'abouchent pas au même endroit. La veine

située en dedans de l'artère se termine en distalité de la bifurcation artérielle, tandis que la veine située en dehors de l'artère se termine au niveau ou proximale à celle-ci (33).

En dehors des veines microanastomosées, le lambeau de fibula libre se draine également par le fourreau musculaire laissé en place sur le transplant ainsi que par la cavité médullaire au niveau de la tranche de section osseuse (55).

Le diamètre des vaisseaux à leur origine est d'environ 1,5 à 2,2 mm pour l'artère, et de 2,5 à 4 mm pour les veines (56).

## B. Voies d'abord

Trois voies d'abord ont été décrites. Initialement, Taylor réalisait un abord postéro-latéral à travers le muscle soléaire (6). Dans les années 1980, une voie médiale a été proposée (Figure 6, Figure 7). Celle-ci emprunte le plan de dissection situé entre le muscle soléaire et le long fléchisseur commun des orteils. Elle a pour avantages théoriques de permettre la visualisation directe du pédicule fibulaire (et ses anomalies éventuelles), de limiter le risque de lésion du nerf fibulaire et donne accès à la veine grande saphène en cas de nécessité de pontage veineux. Par ailleurs, la cicatrice médiale reste peu visible car souvent masquée par la jambe controlatérale (57). D'après une étude réalisée sur 42 patients, l'abord médial donne de meilleurs résultats fonctionnels chez les femmes et est moins pourvoyeur de complications neuro-vasculaires que la voie latérale (58). Néanmoins, il ne permet pas la levée d'un lambeau ostéo-cutané ni de la tête fibulaire (57,58). De plus, le risque de lésion des vaisseaux tibiaux antérieurs et postérieurs n'est pas négligeable.

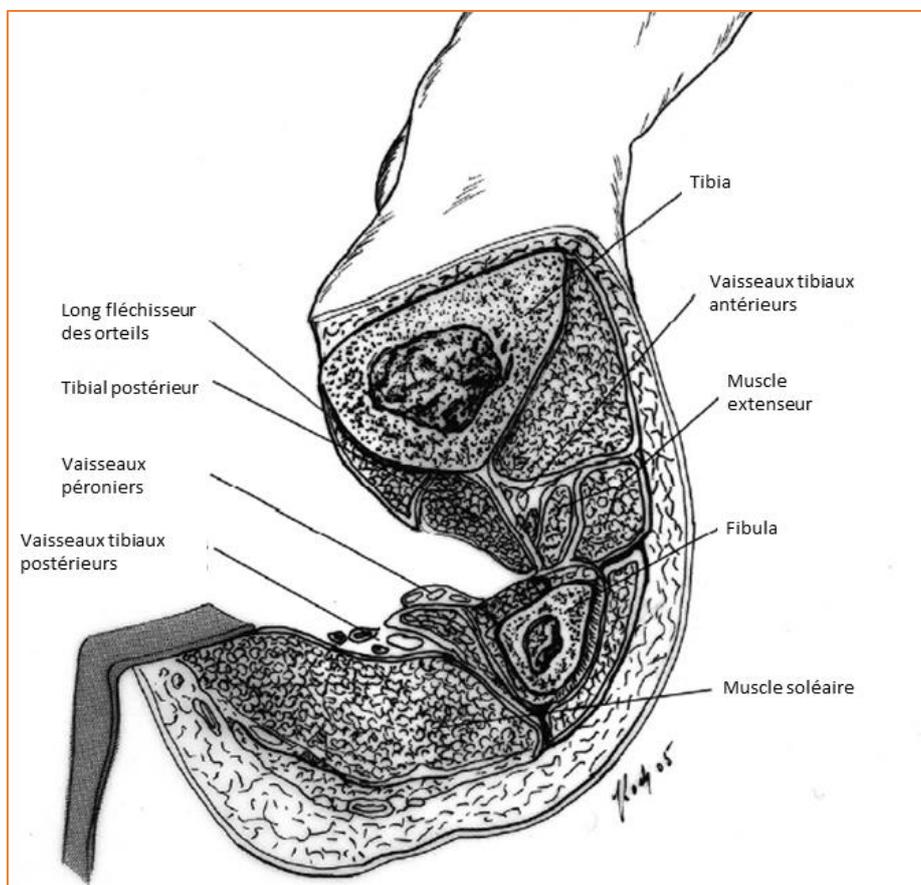
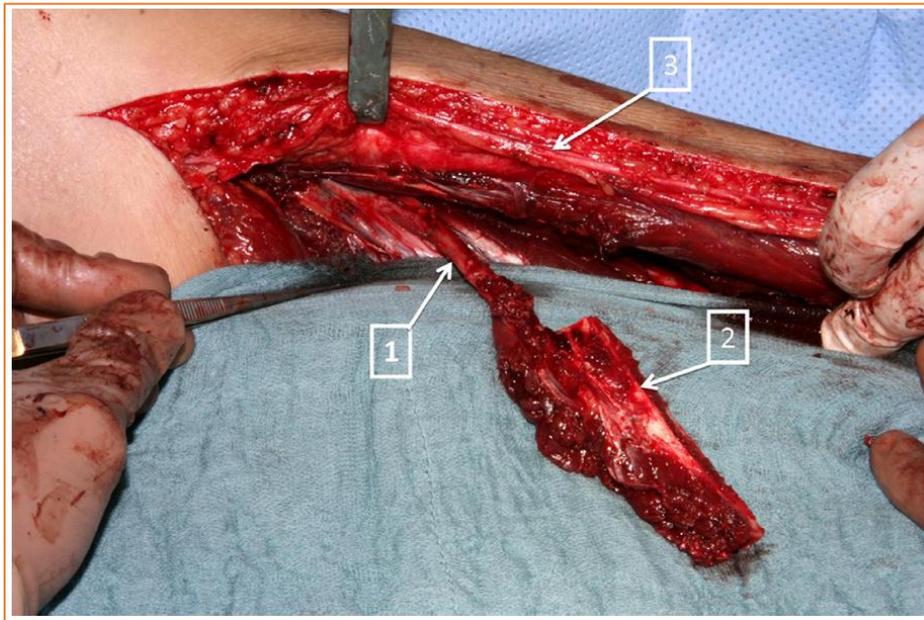


Figure 6: Représentation schématique de la voie médiale (57)



*Figure 7: Vue per-opératoire d'un lambeau de fibula levé par voie médiale (1: pédicule; 2: fibula; 3: veine grande saphène)(58)*

La troisième voie d'abord possible est la voie latérale popularisée par Gilbert et majoritairement utilisée aujourd'hui (7). Toutes les fibulas libres de notre série ont été levées par cet abord ; ainsi, nous ne décrivons que celui-ci (cf. matériels et méthodes) (Figure 11).

## C. Physiologie de la consolidation osseuse

Dans le cas d'une fracture fermée traitée orthopédiquement, on observe une première phase de cal mou à partir de 48 heures qui correspond à l'invasion de l'hématome fracturaire par du tissu fibreux. Vers le 30<sup>ème</sup> jour commence la phase de cal dur avec formation d'un os immature. Celui-ci se remodèle progressivement grâce aux contraintes mécaniques.

Dans le cas d'une fracture fermée traitée par plaque, la consolidation est plus lente à cause des facteurs suivants :

- L'hématome fracturaire et ses facteurs de croissance sont évacués en per-opératoire ;
- Le déperiostage altère la vascularisation du foyer de fracture ;
- L'artère centro-médullaire est fragilisée par les vis ;
- La plaque détourne une partie des contraintes mécaniques de l'os.

Dans le cas d'une fracture ouverte, le risque de retard de consolidation est important du fait de l'évacuation de l'hématome péri-fracturaire et de la dévascularisation osseuse. S'y ajoute un risque infectieux majeur, facteur surajouté de non-consolidation (59).

Au-delà d'un certain délai de non-consolidation, on parle de pseudarthrose. Celle-ci est définie comme l'absence de consolidation à 6 mois sans aucun signe radiologique de remodelage osseux (60). Sa prise en charge dépendra de son type, hypertrophique ou atrophique. Elle peut faire appel à des stratégies mécaniques telles qu'un changement d'ostéosynthèse, ou à des stratégies biologiques telles que des greffes osseuses (61).

## D. Intérêts des greffes vascularisées

### *Absence de « creeping substitution »*

Les greffes conventionnelles non vascularisées subissent un procédé de « creeping substitution ». Celui-ci désigne les mécanismes qui mènent à l'intégration de la greffe au niveau du site receveur, et associe formation et résorption osseuse (ANNEXE 2 : Chronologie de la « creeping substitution »).

A l'opposé, l'intégration des greffes vascularisées ne passe pas par une « creeping substitution » (62–64). Cependant, la survie de l'os transféré n'est pas complète. Dans l'étude d'Arata et al. (65) réalisée sur modèle canin, seulement 52,4% des ostéocytes sont identifiés comme viables sur une coupe histologique de greffe vascularisée. Cela peut sembler faible mais est à comparer à l'analyse du contrôle sur coupe d'os sain qui retrouve 66,8% d'ostéocytes viables. La différence est néanmoins statistiquement significative. Sur la coupe de greffe non vascularisée, ce nombre chute à 28,5%. Dans une autre étude, Klein et al. (66) retrouvent une perte de masse osseuse de 12% dans les fibulas vascularisées vs. 48% dans les fibulas non vascularisées. Muramatsu et al. (64) ont également mis en évidence sur modèle murin une raréfaction des ostéocytes au sein des lacunes du système haversien lors de la première semaine post-fibula vascularisée. Dans tous les cas, l'architecture de la greffe est préservée (3).

Ces résultats peuvent être expliqués par l'ischémie osseuse en per-opératoire et pendant les premiers jours post-opératoires du fait de la section des capillaires lors du prélèvement. En effet, les trois premières semaines post-opératoires sont marquées par une hypervascularisation liée à la réponse inflammatoire à l'ischémie ainsi qu'à la vasodilatation du pédicule (liée à la sympathectomie inhérente au prélèvement)(67). Ainsi, on observe une nécrose puis un remodelage osseux mais dans une moindre mesure comparée aux greffes non vascularisées (66). La consolidation se fait donc plus rapidement (68).

*Hypertrophie progressive du transplant*

Après réalisation d'une fibula vascularisée, on observe une hypertrophie progressive du transplant qui n'est pas retrouvée dans les fibulas non vascularisées (69,70). Elle est considérée comme significative lorsque l'index de De Boer et Wood est supérieur à 20% (71) (Figure 8).

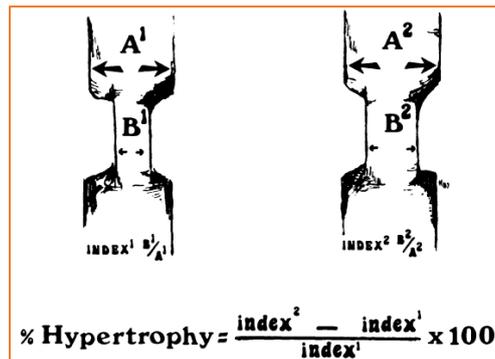


Figure 8: Index d'hypertrophie De Boer et Wood. A : diamètre de l'os receveur et B : diamètre de la greffe aux temps 1 : post-opératoire immédiat et 2 : lors du suivi (71)

Plusieurs hypothèses étiologiques ont été avancées. La première est mécanique : selon la loi de Wolff (72), l'os est un tissu dynamique dont la formation et la résorption dépendent des contraintes qu'il supporte (73). L'augmentation de ces contraintes seraient à l'origine de l'hypertrophie. Néanmoins, certaines études ne retrouvent pas de différence significative de l'index d'hypertrophie entre membres supérieur et inférieur (62), ni entre les reconstructions de fémur ou de tibia (74); or ils ne sont pas soumis aux mêmes forces mécaniques. Par ailleurs, Fujimaki et Suda ont mis en évidence une hypertrophie au niveau de fibulas vascularisées transférées au membre inférieur avant la remise en charge des patients (70). Ainsi, la théorie mécanique ne peut expliquer à elle seule ce phénomène. Une autre hypothèse avancée est celle de la bonne vascularisation du périoste qui serait à l'origine d'une reprise de l'ostéogénèse dans la couche cambiale (70). Enfin, certains auteurs suggèrent que l'hypertrophie correspond à la consolidation de fractures de fatigue au niveau du greffon (74,75).

Cette hypertrophie semble être plus fréquemment rencontrée au niveau des membres inférieurs que des membres supérieurs et sa prévalence varie entre 38 et 100% des patients en fonction des études (62,70,71,74,76).

Sur le plan histologique, Muramatsu et al. ont mis en évidence trois types d'hypertrophie dans une étude portant sur les transferts de fibula vascularisée sur modèle murin (69). Le premier correspond à un épaississement cortical en rapport avec une ostéogénèse sous-périostée. Le deuxième implique le développement d'un néo-cortex entre le cortex initial et la moelle néo-constituée. Le troisième est retrouvé au niveau de la moelle elle-même dans laquelle les structures d'os spongieux augmentent en nombre. Ces trois types sont parfois associés.

Sur le plan radiologique, De Boer et Wood distinguent 2 types d'hypertrophie. L'hypertrophie périostée correspond à des appositions osseuses autour du cortex de la fibula transférée, ce dernier restant visible. L'hypertrophie endostée est définie par une augmentation de diamètre du cortex et du canal médullaire (71). D'après Shi et al., le type périosté est initialement prédominant puis décroît dans le temps tandis que le type endosté évolue en sens inverse (62). Dans tous les cas, le diamètre du greffon ne dépasse généralement pas les limites de l'os receveur (62,70).

Par ailleurs, la localisation de l'hypertrophie sur le transplant est intéressante. Lorsque le greffon est fixé en apposition dans la perte de substance (ou « onlay »), l'hypertrophie se développe au niveau de ses extrémités c'est-à-dire aux zones de jonction avec le site receveur. A contrario, en cas de placement intra-médullaire (ou « inlay »), l'hypertrophie est retrouvée non pas aux extrémités du greffon mais à sa partie médiane, sur toute la hauteur de la perte de substance. En effet, les contraintes sont partagées par l'os receveur et le transplant dans la portion intra-médullaire (77). Muramatsu et al. rapportent un cas clinique qui montre clairement cette différence de localisation (78) (Figure 9, Figure 10).

Sur le plan chronologique, El-Gammal et al. mettent en évidence une augmentation moyenne de l'hypertrophie d'environ 3.3% par mois. Cette progression n'est plus significative au-delà de 2 ans post-transfert (74). Lazar et al. retrouvent également un arrêt de la progression à deux ans (76). A noter aussi qu'il existe une corrélation positive entre l'hypertrophie radiologiquement significative et le délai de consolidation (74).

Cependant, nous n'avons pas retrouvé dans la littérature d'article étudiant la résistance mécanique de l'os hypertrophique.

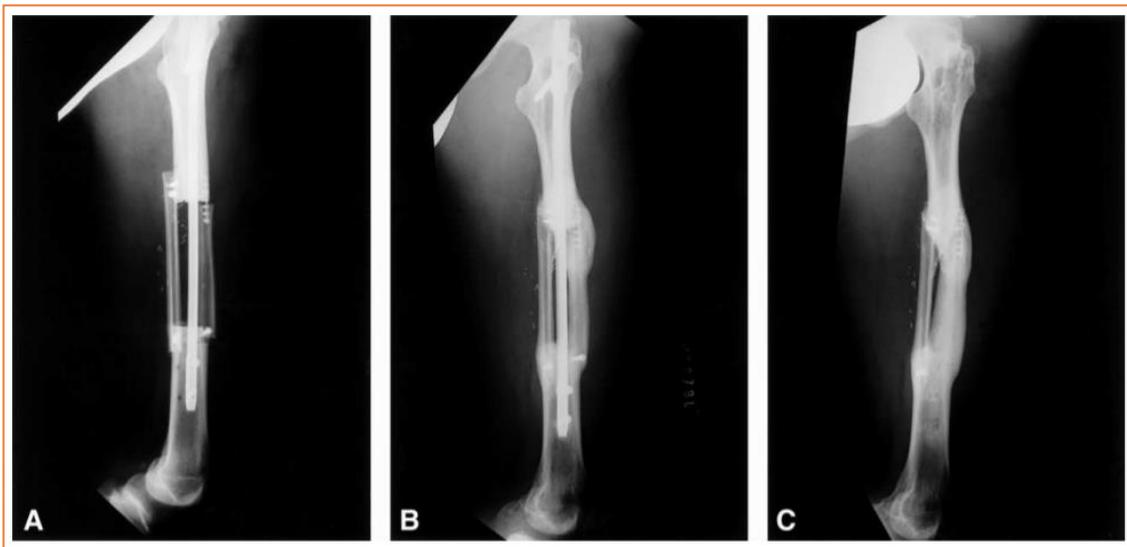


Figure 9: Cas clinique de reconstruction diaphysaire fémorale par double-fibula vascularisée. A : à 1 mois ; B : à 1 an ; C : à 2 an après ablation du matériel. La fibula inlay (externe) présente une hypertrophie sur toute la hauteur du greffon tandis que la fibula onlay (interne) n'est hypertrophiée qu'à ses extrémités (78)

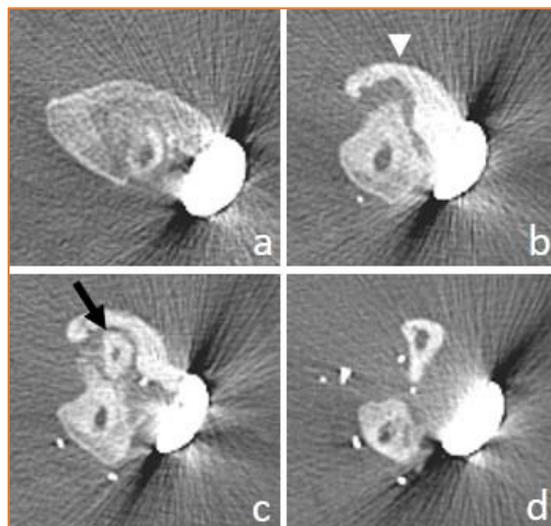


Figure 10: Patiente n°8 : Degrés d'hypertrophie de deux fibulas inlay sur scanner de cuisse, de proximal en distal (a à d). A 2 ans de la 1<sup>ère</sup> fibula (F1, postérieure) et 2 mois de la 2<sup>nde</sup> (F2, antérieure, flèche). a : portion intra-fémorale de F1, non hypertrophiée. b : hypertrophie corticale importante ; allogreffe fémorale associée (tête de flèche). c et d : contraste entre l'hypertrophie de F1 et l'absence d'hypertrophie de F2.

### *Amélioration de la vascularisation locale*

#### ASSOCIATION A UNE GREFFE NON VASCULARISEE

Les greffes vascularisées favorisent la revascularisation et l'ostéogénèse dans leur environnement direct. Dans une étude menée sur modèle canin (79), Gonzalez del Pino et al. ont induit artificiellement une ostéonécrose de la tête fémorale, puis ont réalisé une greffe costale vascularisée 5 semaines plus tard. Huit semaines après celles-ci, ils constataient non seulement une néovascularisation fémorale issue de la greffe vascularisée, mais aussi la présence de nombreux ostéocytes viables. Dans une autre étude animale, Sunagawa et al. ont montré que l'association d'une greffe vascularisée à une greffe non-vascularisée permettait d'augmenter le remodelage osseux et la vascularisation de cette dernière (80). Ce potentiel ostéogénique est retrouvée dans des études cliniques dans lesquelles les transferts osseux microanastomosés semblent faciliter l'intégration des autogreffes (81), des allogreffes (82) et ainsi diminuent le délai de consolidation.

#### LUTTE CONTRE L'INFECTION

La conservation de la vascularisation lors d'une greffe permet d'améliorer la diffusion locale des antibiotiques et facilite l'afflux des cellules immunocompétentes sur le terrain de l'infection (68,83). Par ailleurs, la greffe vascularisée elle-même résiste à l'infection (84) même en milieu irradié (85), tandis que les greffes non vascularisées peuvent devenir un réservoir bactérien (68). Le délai de réalisation du transfert vascularisé dans un contexte infectieux (pseudarthrose septique, ostéomyélite chronique) reste controversé (63). Certains auteurs préconisent la chirurgie en un temps, après antibiothérapie préopératoire (86–88). D'autres préfèrent une chirurgie en deux temps avec une 1<sup>ère</sup> étape de débridement préalable à la reconstruction osseuse. Celle-ci comprend l'exérèse des tissus nécrotiques, la réalisation d'une membrane induite selon Masquelet et la reconstruction des parties molles, associée à une antibiothérapie (84,89–91).

## E. Avantages de la fibula vascularisée

Le lambeau libre de fibula présente donc, comme décrit ci-dessus pour les greffes vascularisées, les avantages suivants :

- Il consolide plus vite que les greffes non vascularisées en raison de l'absence de « creeping substitution » ;
- Il stimule la prise des greffes non vascularisées ;
- Il lutte contre l'infection ;
- Il peut parfois s'hypertrophier, sans toutefois que l'on ait de certitude sur le retentissement mécanique de ce phénomène.

La longueur d'os prélevable est très importante (jusqu'à 25cm d'os (92)) et la masse corticale est grande (58). Sa forme cylindrique est adaptée aux os longs (93), notamment aux os de l'avant-bras dont la forme et le diamètre sont similaires (3,92). Le pédicule est de bon calibre, de longueur correcte et la vascularisation segmentaire autorise les ostéotomies (cf. II. A. – Vascularisation). Par ailleurs, ce lambeau peut être prélevé sous forme composite ostéo-cutanée ou ostéo-musculaire (8). L'intervention est très souvent possible en double équipe avec préparation simultanée des sites donneur et receveur ce qui diminue le temps opératoire (94,95).

### III. MATERIELS ET METHODES

#### A. Critères recueillis

Nous présentons ici les résultats d'une étude rétrospective transversale bicentrique menée dans les Centres Hospitaliers Universitaires de Lille et Bordeaux. Celle-ci incluait les patients ayant bénéficié de lambeaux osseux de fibulas libres dans le cadre d'une reconstruction de membres, entre 2014 et 2020.

#### *Caractéristiques de la population*

Les caractéristiques suivantes ont été recueillies sur la population : âge au moment de la réalisation du lambeau, tabac, comorbidités, étiologie de la perte de substance, présence ou non d'une ostéite, site receveur, site donneur, nombre d'interventions antérieures sur l'os, délai entre le traumatisme initial et la réalisation du lambeau, ainsi que les thérapies néoadjuvantes pour les étiologies tumorales. Le nombre d'interventions antérieures et le délai de réalisation de la fibula ont été évalués en prenant pour référence la date de l'accident pour les étiologies traumatiques, et la date de la 1<sup>ère</sup> chirurgie pour les étiologies tumorales et infectieuse.

#### *Technique chirurgicale*

La technique chirurgicale a été évaluée selon plusieurs critères : réalisation d'une imagerie vasculaire préopératoire, longueur de la fibula prélevée, intégration à une technique de Masquelet, placement de la fibula (« inlay » ou « onlay »), mode de fixation, anastomoses vasculaires et adjonction d'une auto- ou allogreffe.

#### *Analyse principale*

L'analyse principale portait sur le délai de consolidation, évalué sur radiographie ou sur scanner. La consolidation était définie comme l'apparition de ponts osseux sur au moins 50% du diamètre de la fibula ou de l'os receveur (délai le plus court des deux). Nous avons également recueilli le nombre de cures de pseudarthroses ultérieures au lambeau, leur délai

de réalisation par rapport au lambeau et la méthode utilisée. Le taux de consolidation primaire correspond à la consolidation initiale sans réintervention. Le taux de consolidation secondaire correspond à la consolidation après cure de pseudarthrose.

### *Analyse secondaire*

L'analyse secondaire portait sur le site donneur, évalué par la présence ou non d'une boiterie, l'utilisation d'une aide à la marche, le périmètre de marche, la mobilité, la stabilité (subjective) et la laxité (objective) de la cheville, le score de l'American Orthopaedic Foot and Ankle Society « Ankle-Hindfoot Scale » (AOFAS, ANNEXE 3 : Score AOFAS (258)) et la déformation des orteils. Le score AOFAS est compris entre 0 (cheville très dysfonctionnelle) et 100 (cheville normale).

### *Site receveur*

Pour les patients dont le site receveur était situé au membre supérieur, nous avons recueilli le score DASH (96) ainsi que le force globale de la main et au pinch-test mesurées par le dynamomètre de JAMAR. Le DASH score s'exprime en pourcentage et varie entre 0 (aucune incapacité) et 100% (incapacité maximale).

### *Satisfaction globale*

Pour le site donneur comme pour le site receveur, les patients ont noté la douleur et l'aspect esthétique de la cicatrice sur échelle visuelle analogique (sur 10 points). Celui-ci a également été évalué par l'examineur selon le score Vancouver Scar Scale (VSS, ANNEXE 4 : Echelle VSS (259)) noté sur 13, avec un score d'autant plus grand que la cicatrice est de mauvaise qualité.

Nous avons recueilli le score SF-36 (97), calculé grâce à l'outil en ligne <https://orthotoolkit.com/sf-36/>. Ce score évalue 8 domaines de la santé : les capacités physiques (physical function, PF), les limitations d'activité dues à l'état physique (role physical, RP) ou émotionnel (role emotional, RE), l'énergie (vitality, VT), la santé psychique

(mental health, MH), la vie sociale (social function, SF), les douleurs physiques (bodily pain, BP), la santé globale (general health, GH) et l'évolution de la santé comparée à 1 an auparavant (health thinking, HT). Les résultats sont exprimés en pourcentage par domaine. Plus le domaine est affecté, plus le pourcentage est bas, avec un score minimal de 0%. Les patients ont également noté (sur 10) leur satisfaction de la prise en charge globale une fois leur admission dans le Centre Hospitalier Universitaire concerné.

## B. Technique chirurgicale réalisée

Tous les lambeaux de notre série sont des lambeaux osseux prélevés sur l'artère fibulaire, selon un abord latéral décrit par Gilbert (7) (Figure 11).

### *Site donneur : levée du lambeau*

Avant l'intervention, le patient devra bénéficier d'un testing du nerf fibulaire commun, ainsi que d'une évaluation vasculaire (cf. V. Discussion – C.Imagerie ).

Cette intervention est réalisée sous anesthésie générale, sous garrot pneumatique (racine de la cuisse), la plupart du temps en décubitus dorsal pour faciliter l'accès à la zone receveuse, avec un coussin sous la fesse homolatérale.

Dans le cadre d'un lambeau diaphysaire (épiphyse proximale non prélevée), il est nécessaire de préserver une certaine longueur d'os à chaque extrémité :

- En proximal, 7 cm seront préservés afin de ne pas déstabiliser le genou et de protéger le nerf fibulaire commun et ses deux branches. Cela permettra également d'obtenir une longueur de pédicule suffisante, puisque l'AF naît le plus souvent entre 7 et 10 cm sous le sommet de la fibula (33) ;
- En distal, la longueur à préserver pour maintenir la stabilité de la cheville est controversée. La plupart des auteurs placent leur curseur entre 6 et 8 cm (95,98,99). Dans une étude biomécanique réalisée sur pièces anatomiques (100), Pacelli et al. retrouvent d'instabilité que pour une longueur de fibula restante inférieure à 10% de la longueur totale (environ 4cm). Ils assimilent cette limite à l'insertion proximale des ligaments tibio-fibulaires inférieurs. A partir de 10%, il n'existe plus d'instabilité ; néanmoins la mobilité de la fibula est anormale dans le plan axial et pourrait d'après les auteurs expliquer les cas de douleurs de cheville post-opératoires sans instabilité. Ainsi, on préservera une longueur distale de 7cm. En cas de prélèvement plus long, une vis de syndesmose tibio-fibulaire sera mise en place (8).

Il est donc possible de prélever jusqu'à 25cm d'os chez un individu d'1m80 (92).

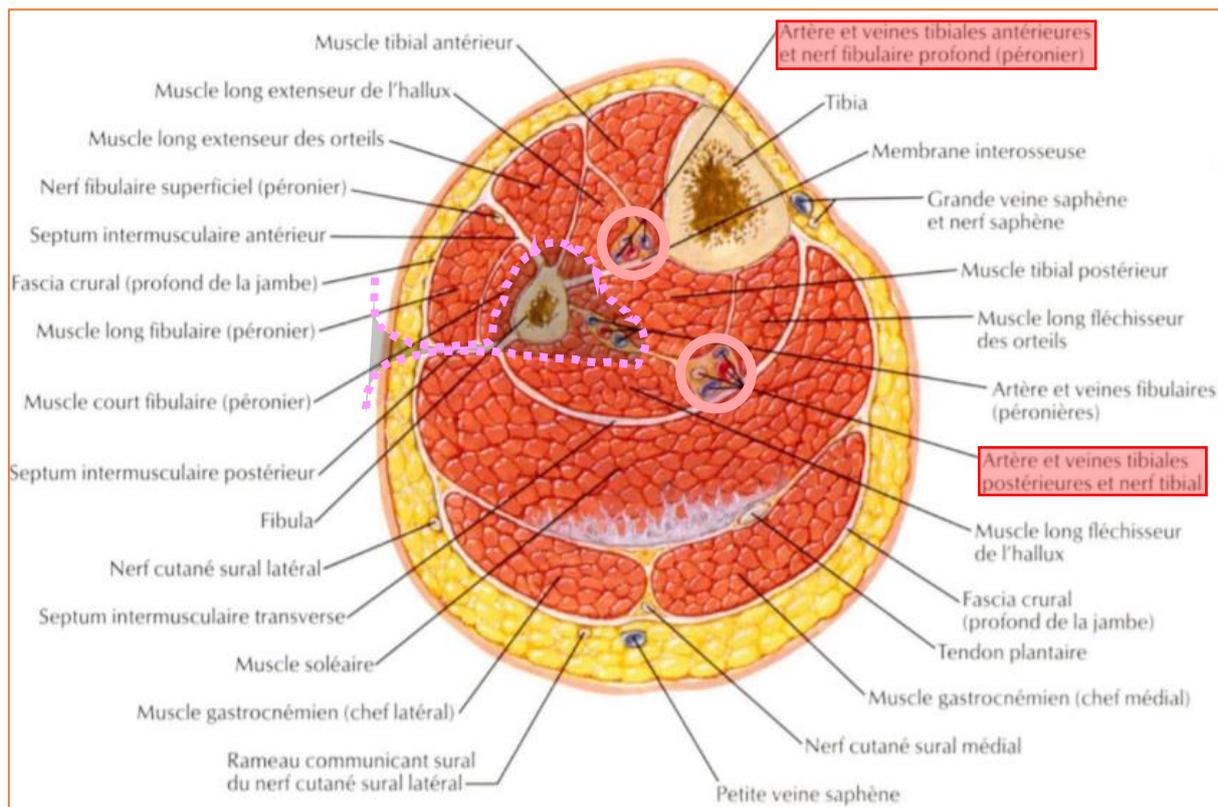


Figure 11: Coupe transversale au tiers moyen de la jambe. Zone de prélèvement grisée. En rouge : dangers anatomiques (11)

En préopératoire, on trace une ligne rejoignant les deux épiphyses de la fibula, qui peut éventuellement s'incurver en arrière à sa partie proximale. En distal, le NFS et ses branches deviennent sous-cutanés selon différentes configurations : ils seront préservés (cf. I. – A. – Un rapport anatomique à connaître : le nerf fibulaire commun).

Après incision cutanée le long de la diaphyse, on repère le fascia crural qui est ouvert pour visualiser le septum intermusculaire postérieur. Ce dernier est aisément identifié à la partie distale de l'incision, jouxtant la face postérieure du tendon du long fibulaire et recouvert d'une fine lame de tissu adipeux (101). Les nombreuses perforantes musculo-cutanées (qui vascularisent la palette cutanée dans les lambeaux composites) situées dans cet espace devront être ligaturées avec soin. La loge latérale est séparée du septum intermusculaire postérieur, laissé adhérent au muscle soléaire en postérieur.

La dissection progresse ensuite en antérieur où les muscles long puis court fibulaires sont décollés de la diaphyse fibulaire, à la lame froide ou aux ciseaux à disséquer. En proximal, la dissection sera prudente pour ne pas léser le nerf fibulaire superficiel à son origine (101). Le septum intermusculaire antérieur est alors incisé. On réalise la coupe osseuse par deux ostéotomies transversales à la scie en protégeant les vaisseaux fibulaires, afin de faciliter la suite de la dissection. Lorsque la longueur du prélèvement le permet, certains auteurs préconisent la réalisation d'une troisième ostéotomie pour libérer un deuxième fragment plus proximal et ainsi améliorer l'exposition du pédicule (98). Ce deuxième fragment peut également être utilisé comme greffe osseuse non vascularisée.

Le prélèvement osseux doit être centré sur le milieu de la fibula afin d'y inclure le foramen nourricier (8). Néanmoins, la longueur du pédicule est inversement proportionnelle à la longueur du segment osseux prélevé (distance entre la coupe proximale et la naissance de l'artère fibulaire). Il est donc possible de décaler le prélèvement vers la partie inférieure de la fibula pour augmenter la longueur vasculaire utile, tout en s'assurant d'emporter les six centimètres paramédians (98). Dans tous les cas, le prélèvement doit être surestimé par rapport à la perte de substance supposée, pour permettre un placement inlay de la fibula ou pour aviver les extrémités de l'os receveur en cas de placement onlay (101). Par ailleurs, il convient de préserver un lambeau périoste à chaque extrémité du segment osseux afin de recouvrir la jonction entre le transplant et la zone receveuse et ainsi favoriser la consolidation (3,92).

Une fois la coupe osseuse effectuée, on récline la fibula en externe afin de lever le long extenseur des orteils puis le long extenseur de l'hallux de la diaphyse jusqu'à la MIO. Durant cette étape, le paquet tibial antérieur ainsi que le NFP doivent être repérés et protégés.

La dissection se poursuit ensuite en postérieur. La MIO est incisée à la partie distale du transplant pour repérer le paquet fibulaire qui se situe juste en arrière de celle-ci. Celui-ci est ligaturé, fixé au périoste par un point puis disséqué de distal en proximal, en emportant

une languette du muscle tibial postérieur pour protéger les vaisseaux fibulaires et améliorer le retour veineux du lambeau (8). Par ailleurs, la vascularisation périostée non pénétrante est plus dense en regard des zones d'insertion musculaire (47) au niveau desquelles le périoste est fusionné avec l'épimysium. Il existe donc un risque de lésion périostée lors du détachement du muscle (102). Il peut être nécessaire d'emporter une partie du long fléchisseur de l'hallux lorsque le pédicule passe en son sein, ou pour augmenter la vascularisation périostée qui est dépendante de celle du muscle (103). Le nerf tibial postérieur qui chemine parallèlement au pédicule doit être préservé.

La dissection du pédicule se poursuit en proximal jusqu'à sa naissance, facilitée par la libération de l'arcade du soléaire à sa partie supérieure et par la mise en flexion de la jambe qui détend les muscles gastrocnémiens (8). Les branches à destinée musculaire sont ligaturées. En cas de nécessité de dissociation spatiale artérioveineuse, il est possible de lier une partie des anastomoses entre les deux veines ainsi que d'éventuels shunts artérioveineux (présents chez les patients ayant une masse musculaire importante)(33).

Le garrot est ensuite lâché pour vérifier les hémostases et s'assurer du saignement satisfaisant de la tranche de section osseuse. Le pédicule est sectionné à son origine puis la zone donneuse est fermée en deux plans sur drains de Redon. Les muscles peuvent être réinsérés sur la MIO par quelques points selon Gilbert (8). Le fascia n'est pas refermé afin d'éviter la survenue d'un syndrome des loges (104).

Les photographies suivantes ont été prises sur pièce anatomique. Elles illustrent les différentes étapes du prélèvement (Figure 12 à Figure 18). Nous remercions l'équipe du Laboratoire d'Anatomie de Bordeaux, Mr DUPUY, Mr le Pr CASOLI ainsi que les Dr ABI-CHAHLA et Dr DELGOVE pour leur aide et leur disponibilité.



Figure 12: Tracé de l'incision cutanée



Figure 13: Après ouverture du fascia crural (pointé par la pince), on visualise le septum intermusculaire postérieur (flèche), ainsi que la lame de tissu adipeux qui le surplombe (tête de flèche)



Figure 14: La loge latérale et le muscle long extenseur des orteils ont été levés de la fibula, laissant apparaître le nerf fibulaire profond (flèche blanche). On retrouve des perforantes musculaires étagées qui seront ligaturées (flèches orange).

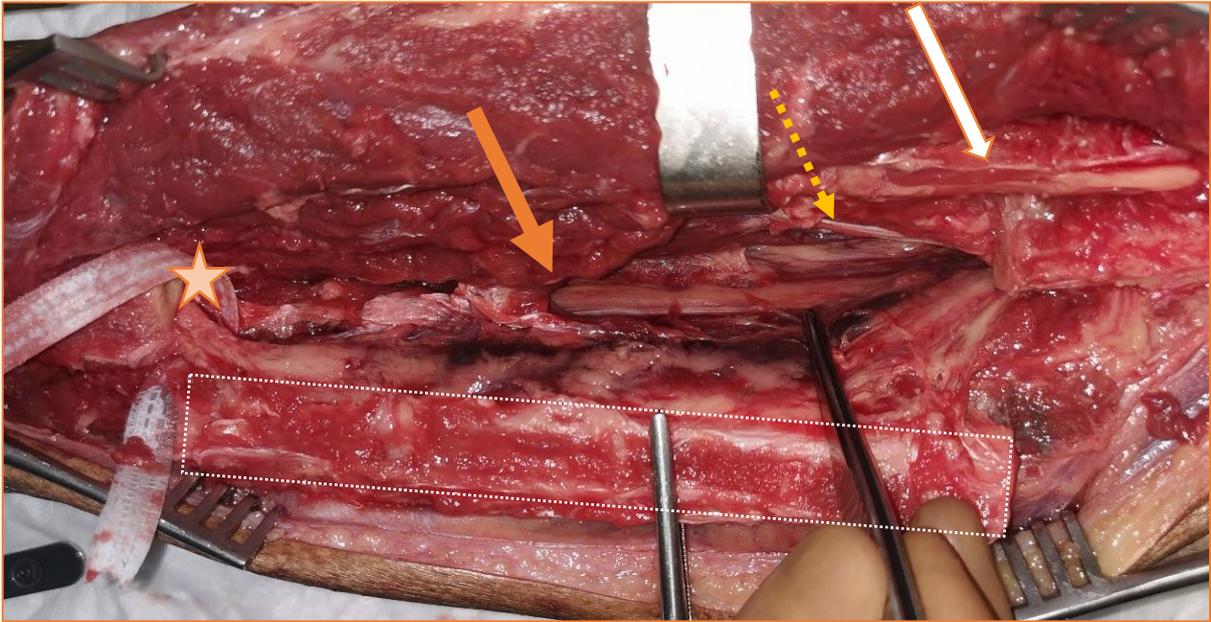


Figure 15: Après coupe osseuse et incision de la MIO (flèche pointillée jaune), la fibula (pointillés blancs) est réclinée permettant l'accès à la loge postérieure. Nous visualisons les deux rapports anatomiques importants: le NFP qui cache le pédicule tibial antérieur (flèche blanche) et le paquet vasculo-nerveux tibial postérieur (flèche orange). Le pédicule fibulaire a été individualisé en regard de la coupe distale et mis sur lac (étoile).



Figure 16: Le pédicule fibulaire est disséqué de distal en proximal.



Figure 17: La réalisation d'une recoupe osseuse proximale permet d'augmenter la longueur du pédicule prélevé en exposant le TTF postérieur (flèche). L'anatomie retrouvée ici correspond à un type IA de la classification de Kim-Lippert.



Figure 18: Le lambeau est individualisé. Après dissection du pédicule, on visualise 2 foramens nourriciers.

Si la perte de substance le nécessite, la fibula peut-être ostéotomisée en deux fragments pendant ou après la levée du lambeau. On parle alors de fibula double-barreau, « double-barrel » ou « two-struts » (105). Comme expliqué précédemment, le site d'ostéotomie devra autant que possible être positionné en dehors des 6 cm médians pour éviter de léser le foramen nourricier. Les fragments mesureront au moins 2 cm pour inclure au moins un vaisseau périosté. Sur le bord controlatéral au pédicule, le périoste est incisé puis décollé afin de pouvoir passer une rugine entre le pédicule et l'os au niveau de l'ostéotomie (33) (Figure 19, Figure 20). Certains auteurs préconisent le sacrifice d'une languette osseuse pour libérer le pédicule et faciliter sa plicature (106). La fibula est sciée puis adaptée à la perte de substance. La coupe osseuse associée à celle du fourreau musculaire augmente le drainage veineux du lambeau et pourrait également être un facteur favorisant les hématomes (55). Pour un fémur par exemple, il est possible de placer l'un des fragments en intra-médullaire (« inlay ») et l'autre en console médiale/latérale (« onlay ») (Figure 20). Ce montage en double-barreau est fréquemment utilisé au membre inférieur (78,106,107), mais peut également être employé pour reconstruire simultanément les deux os de l'avant-bras (108,109).

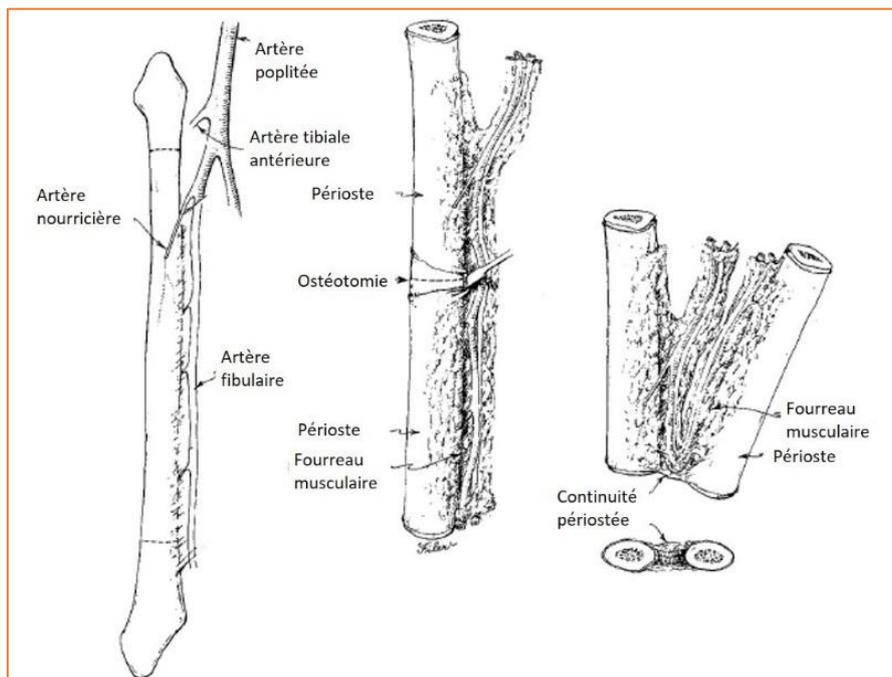


Figure 19: Représentation schématique d'une fibula double-barreau (105)



Figure 20: Patiente n°23 : Reconstruction de métaphyse fémorale distale par fibula double-barreau (contours pointillés)

#### Site receveur

La zone d'os pathologique au niveau du site receveur est réséquée jusqu'à l'obtention d'un « paprika sign ». Celui-ci correspond au saignement des tranches de section osseuse, reflet de la vitalité tissulaire (92). Il est possible de réaliser des perforations intra-médullaires au niveau des premiers centimètres de chaque extrémité pour stimuler la vascularisation (110).

La fibula est alors recoupée si besoin pour s'adapter à la perte de substance. Elle est ensuite positionnée au niveau du site receveur dans le sens ortho- ou rétrograde en fonction de la localisation future de l'anastomose vasculaire. Cela ne semble pas avoir d'influence sur le taux de consolidation (55). Elle peut être fixée en « onlay » c'est-à-dire en apposition aux berges de l'os receveur, ou en « inlay » qui correspond à un placement intra-médullaire (Figure 21). Dans le cas d'une fixation « onlay », la réalisation d'un chevron ou « step-cut osteotomy » permet d'augmenter la surface de contact osseuse entre le lambeau et l'os à reconstruire. Dans le cas d'une fixation « inlay », la longueur prélevée devra être supérieure à la longueur du défaut (4-6cm de plus)(87,111). Le périoste sera réfléchi aux deux

extrémités de la fibula pour exposer la couche cambiale du périoste qui contient des cellules mésenchymateuses (3).

L'ostéosynthèse doit être stable mais pas trop rigide pour permettre des mouvements inter-fragmentaires qui augmentent la vascularisation au sein du cal osseux. Elle peut être interne (plaque, vis) ou externe par fixateur (3,92).

La réalisation d'une contre-incision est parfois nécessaire pour faciliter l'accès aux vaisseaux (101). Ceux-ci sont anastomosés si possible en tissu sain, et en dehors de la zone d'irradiation en cas de lésion tumorale (112).

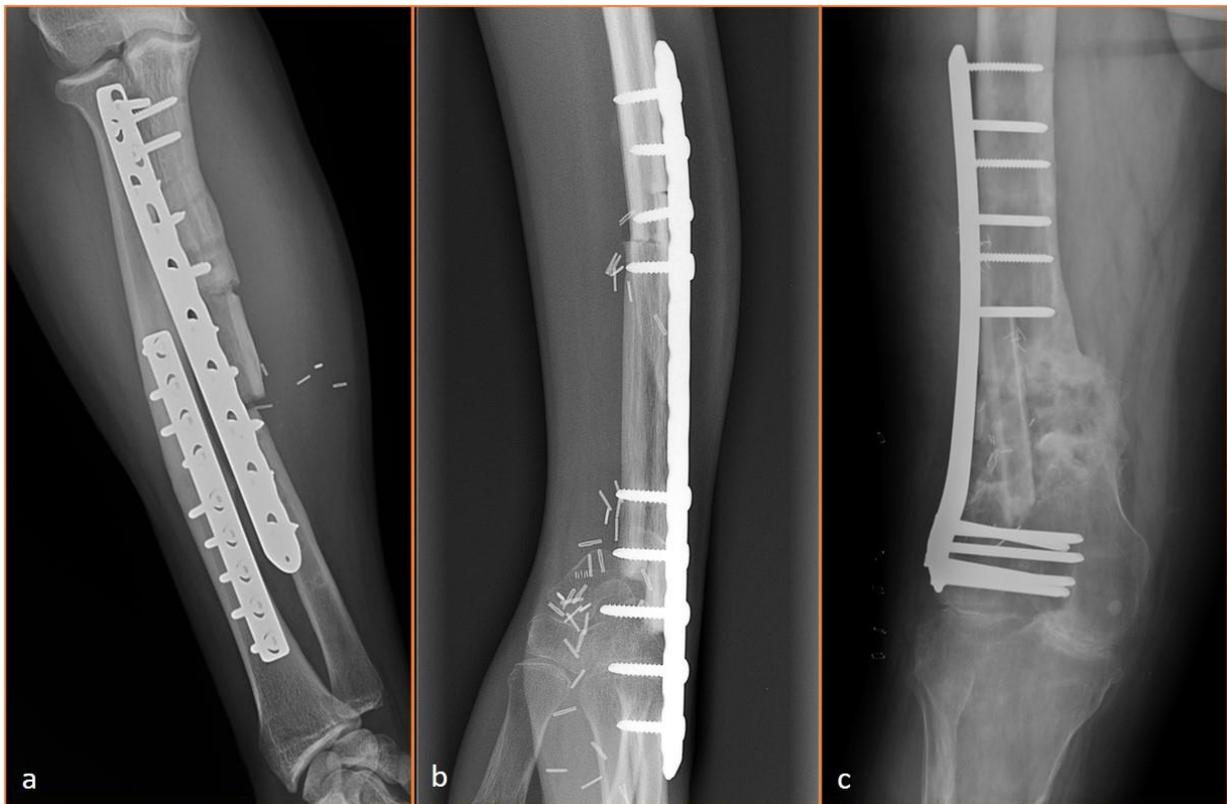


Figure 21: Trois modes de fixation de la fibula. a: onlay sans chevron (patient n°6 à 6 mois); b: onlay avec chevron (patient n°19 à 7 mois); c: inlay (patient n°17 à 9 mois)

Les photographies suivantes concernent la patiente n°7, qui a bénéficié d'une fibula vascularisée placée en « onlay » pour reconstruction d'une tumeur à cellules géantes du radius distal avec extension à la première rangée des os du carpe (Figure 22 à Figure 25).



Figure 22: Aspect de la fibula: a: après prélèvement; b: après confection des chevrons



Figure 23: Pièce de résection, comprenant l'extrémité distale du radius et la 1ère rangée des os du carpe

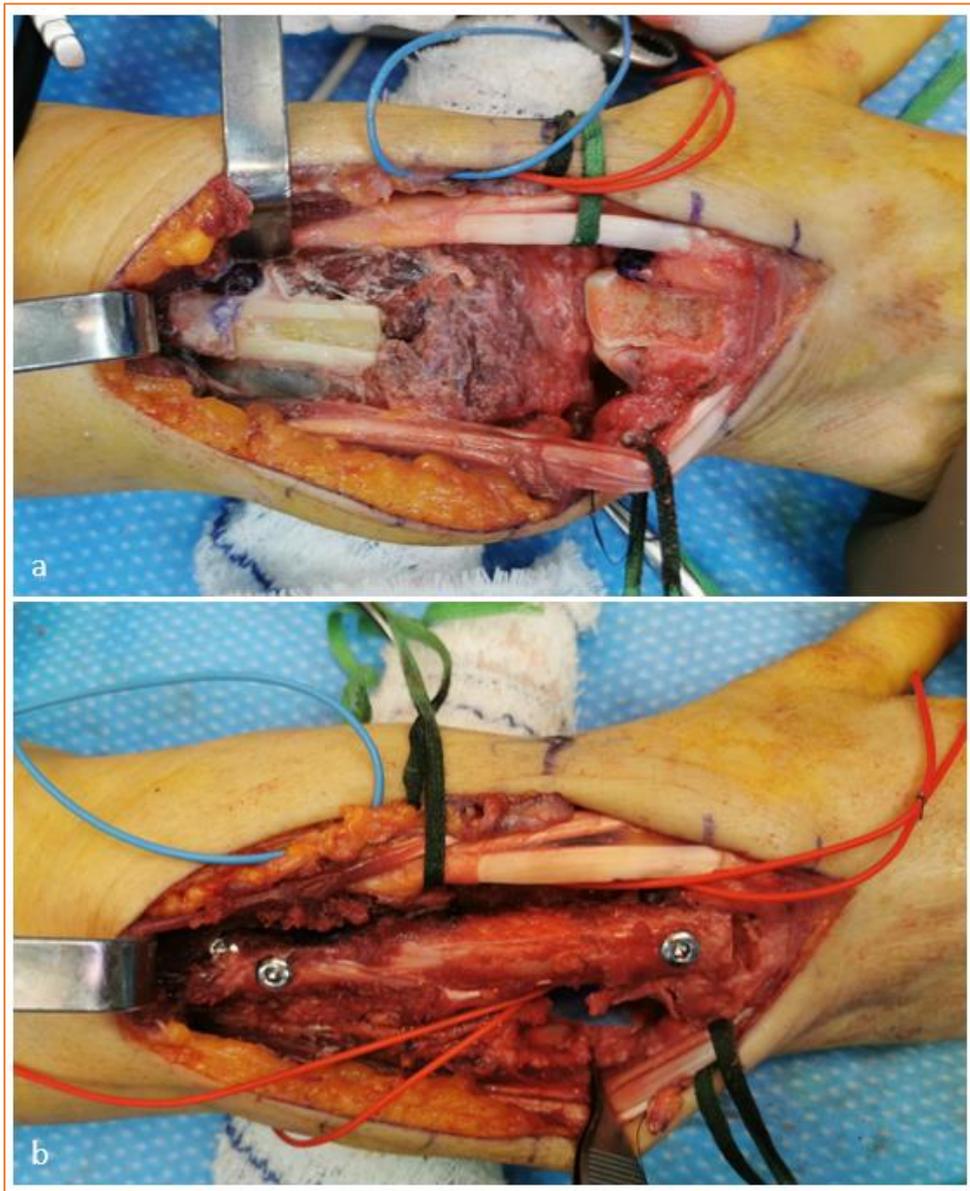


Figure 24: Aspect du site receveur: a: après réalisation des chevrons sur le radius (proximal) et le capitatum (distal); b: après mise en place du lambeau en onlay



Figure 25: Radiographies post-opératoires immédiates. a: de face; b: de profil

### C. Analyses statistiques

Les tests de Wilcoxon et Kruskal-Wallis ont été employés pour les variables continues, et le test de Fisher pour les variables catégorielles. Les résultats étaient considérés comme significatifs lorsque  $p$  était inférieur à 0.05. Nous avons utilisé une régression linéaire pour évaluer l'influence des facteurs analysés sur le délai de consolidation.

## IV. RESULTATS

### A. Population

Nous avons étudié 24 patients avec un recul de 38 mois (14,2-55,2), pour un total de 25 fibulas (deux chez une même patiente). La 2<sup>ème</sup> fibula réalisée chez la patiente n°8 n'a pas été prise en compte dans l'analyse globale. L'analyse incluant 15 hommes et 9 femmes. L'âge médian au moment du lambeau était de 39 ans (31,8-49,2). On retrouvait un tabagisme actif chez 46 % des patients (N=11). Deux patients présentaient une athéromatose et deux patients étaient sous traitement immunosuppresseur (corticoïdes et anti-TNF $\alpha$ ).

La perte de substance était d'origine traumatique dans 54% des cas (N=13), tumorale dans 42% des cas (N=10) et infectieuse (ostéomyélite) dans 4% des cas (N=1). Parmi les traumatismes, 85% des patients présentaient un sepsis local (N=11) authentifié par prélèvements bactériologiques réalisés en per-opératoire. Tous ces patients ont bénéficié d'une antibiothérapie adaptée, validée par les infectiologues référents. Aucun sepsis n'a été retrouvé sur étiologie tumorale.

### B. Technique chirurgicale

Le site receveur était situé autant au membre supérieur qu'au membre inférieur (50%) (Tableau 2).

Tableau 2: Localisation du site receveur

<i>Site receveur</i>		<i>N patients (N=24)</i>	<i>% patients</i>
Membre inférieur	<b>Fémur</b>	10	41.7
	<b>Tibia</b>	2	8.3
Membre supérieur	<b>Humérus</b>	2	8.3
	<b>Radius</b>	7	29.2
	<b>Ulna</b>	3	12.5

Le nombre médian d'interventions antérieures à la fibula au niveau du site receveur était de 2 (1-4,2). Le délai médian de réalisation de la fibula était de 18,5 mois (2,4-52,8). La longueur médiane de la fibula était de 11.3cm (9.7-14.8), avec des extrêmes allant de 3.8 à 23cm (Figure 26, Tableau 5).

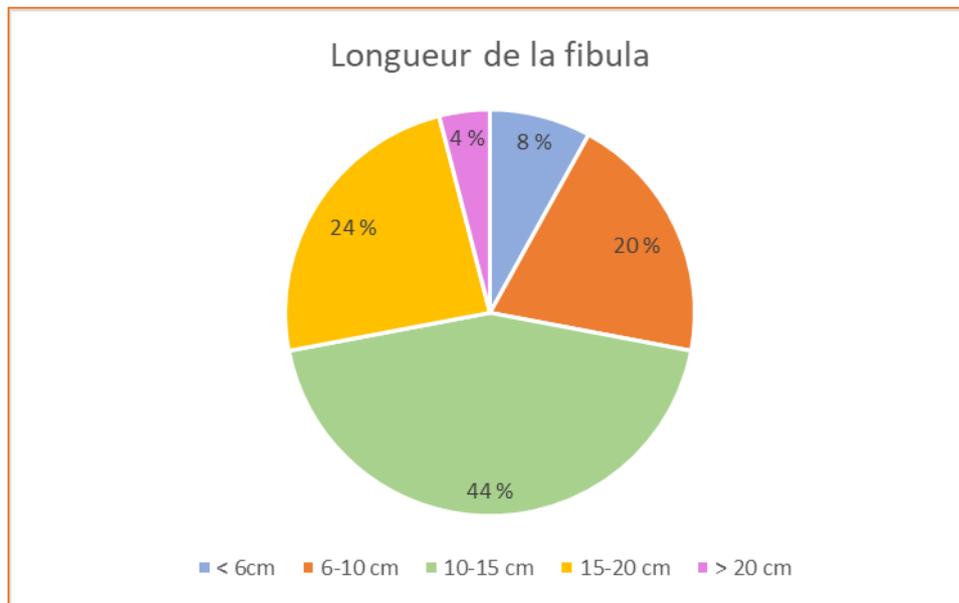


Figure 26: Répartition des longueurs de fibulas prélevées

Une imagerie vasculaire préopératoire avait été réalisée au niveau de 29% des sites donneurs (N=7) et 37.5% des sites receveurs (N=9). Au niveau du site donneur, elle consistait dans un cas en une échographie-doppler et dans les autres cas en un angio-scanner. Au niveau du site receveur, une angiographie conventionnelle a été pratiquée chez une patiente et des angio-scanners dans les autres cas. L'imagerie du site donneur a permis d'orienter le choix du côté de prélèvement chez 2 patients sur 7 analysés (28,5%). En effet, on retrouvait dans un cas une artère fibulaire grêle d'un côté, et dans l'autre cas seulement 2 axes perméables sur 3 d'un côté (pas de précision retrouvée sur l'axe occlus). La latéralité du site donneur par rapport au site receveur est précisé dans le Tableau 3.

Tableau 3: Latéralité du site donneur par rapport au site receveur : N patients (%)

Site receveur/ Prélèvement	Homolatéral	Controlatéral
<b>Fémur</b>	5 (50%)	5 (50%)
<b>Tibia</b>	0	2 (100%)
<b>Membre supérieur</b>	6 (50%)	6 (50%)

Chez 45.8% des patients (N=11), l'utilisation de la fibula s'intégrait dans le cadre d'un 2<sup>ème</sup> temps de Masquelet. Nous avons séparé le mode de fixation en 2 groupes : rigide en cas d'arthrodèse par plaque ou de mise en place de plaque, et semi-rigide en cas d'utilisation d'un fixateur externe ou de vis uniquement. Sur les 24 patients étudiés, nous n'avons retrouvé d'information sur les anastomoses vasculaires que chez 16 patients. Parmi eux, 2 patients ont eu 2 veines microanastomosées ; les autres n'en ont eu qu'une. 50% des patients (N=12) ont eu une greffe additionnelle dans le même temps chirurgical.

Les données concernant la technique chirurgicale sont présentées ci-dessous (Tableau 4 et Tableau 5).

Tableau 4: Technique chirurgicale

Caractéristiques		N patients (%)
<b>Placement de la fibula</b>	<b>Inlay</b>	13 (54.1%)
	<b>Onlay</b>	10 (41.7%)
	<b>Inlay/onlay</b>	1 (4.2%)
<b>Mode de fixation</b>	<b>Fixation rigide</b>	19 (79.2%)
	<b>Fixation semi-rigide</b>	5 (20.8%)

Tableau 5: Technique chirurgicale détaillée par patient.  
Toutes les autogreffes étaient issues de la crête iliaque.

N°	Site receveur	Masquelet	Longueur fibula (cm)	Placement fibula	Mode de fixation	Grefe additionnelle
1	Fémur	Oui	8,6	Inlay	Plaque + cerclage	Autogrefe
2	Tibia	Oui	14,6	Inlay	Vis + cerclage + Fixateur externe	Autogrefe
3	Tibia	Oui	10,5	Inlay	Fixateur externe	Non
4	Ulna	Non	11,2	Onlay/chevron	Plaque	Non
5	Radius	Non	10	Onlay/chevron	Arthrodèse Plaque	Non
6	Ulna	Non	3,8	Onlay	Plaque	Non
7	Radius	Non	9	Onlay/chevron	Arthrodèse Vis	Non
8	Fémur	Non	23	Inlay	Plaque	Autogrefe
9	Fémur	Oui	15,2	Inlay	Plaque	Autogrefe
10	Humérus	Oui	16,8	Onlay/chevron	Plaque + vis	Autogrefe
11	Fémur	Non	12	Inlay	Plaque + vis	Autogrefe
12	Ulna	Oui	12,5	Inlay proximal Onlay/chevron distal	Plaque	Non
13	Radius	Oui	12	Onlay/chevron	Arthrodèse Vis + Fixateur externe	Non
14	Radius	Oui	9,8	Onlay/chevron	Arthrodèse Plaque	Non
15	Fémur	Non	11,5	Inlay	Plaque	Autogrefe
16	Fémur	Oui	9,2	Inlay	Plaque + cerclage	Autogrefe
17	Fémur	Non	10,2	Inlay	Plaque + cerclage	Autogrefe + Allogrefe
18	Humérus	Non	5,3	Inlay	Plaque + cerclage	Non
19	Radius	Non	11	Onlay/chevron	Arthrodèse Plaque	Non
20	Radius	Oui	13,4	Onlay/chevron	Arthrodèse Plaque	Non
21	Fémur	Non	18	Inlay	Plaque	Autogrefe
22	Radius	Non	8,3	Onlay/chevron	Arthrodèse Plaque + vis	Non
23	Fémur	Non	16,3	Inlay Double barreau	Vis	Autogrefe + Allogrefe
24	Fémur	Oui	16,2	Inlay	Plaque + cerclage	Allogrefe

### C. Analyse principale : taux et délai de consolidation

#### Taux de consolidation

Le taux de consolidation primaire était de 66.7% (N=16) dans un délai médian de 9.5 mois (6-10).

Parmi les 8 patients non consolidés, 6 ont bénéficié d'au moins une cure de pseudarthrose à un délai médian de 14.5 mois. Parmi eux, 3 patients ont bénéficié de deux cures de pseudarthrose dont un pour lequel la fibula controlatérale a été utilisée lors de la 2<sup>ème</sup> cure.

Au total, 20.8% des patients (N=5) étaient non consolidés au moment de l'évaluation : 3 étaient en pseudarthrose, et deux étaient revus avec un recul court (7 et 9 mois) mais en cours de consolidation. Le taux de consolidation secondaire était donc de 79.2% (N=19). Le délai médian de consolidation secondaire était de 10 mois (6.5-11.5), avec des extrêmes allant de 4 à 43 mois (Figure 27).

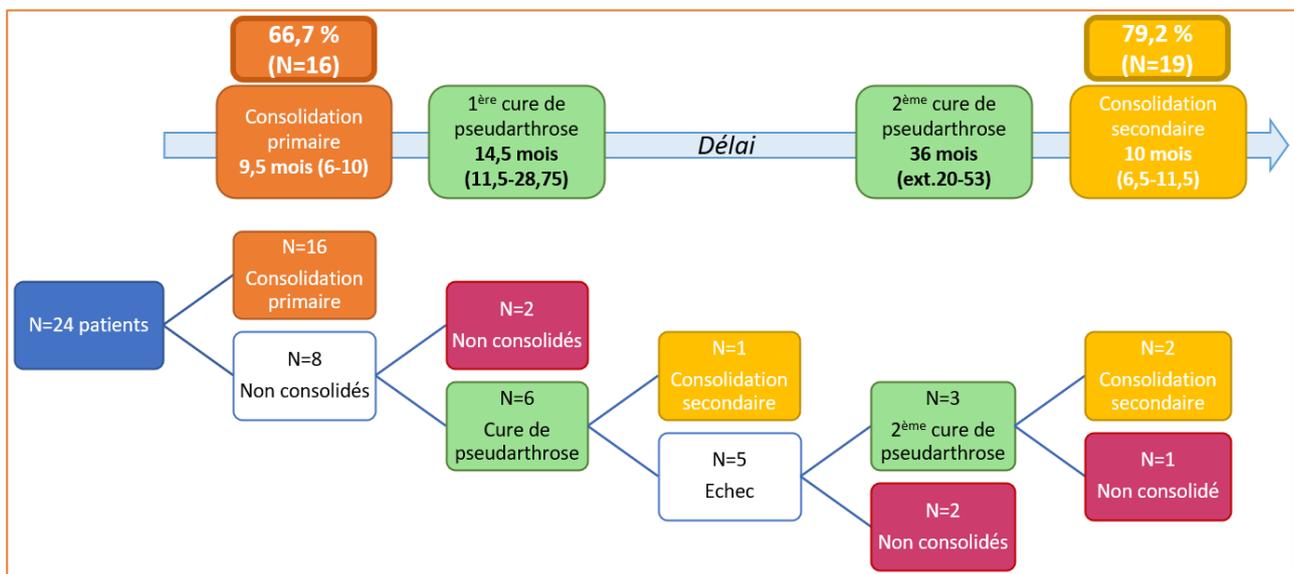


Figure 27: Flow-charts des patients inclus

Parmi les facteurs analysés, on observait une différence significative du taux de consolidation en fonction de l'étiologie de la perte de substance ( $p=0.027$ ). En effet, le taux de consolidation était significativement plus faible pour les lambeaux réalisés dans un contexte traumatique et infectieux que ceux réalisés dans un contexte tumoral. Cependant, parmi les étiologies traumatiques, il n'y avait pas de différence significative de consolidation entre les patients septiques et non septiques. On ne retrouvait pas non plus de différence significative sur tous les autres paramètres évalués (Tableau 6).

Tableau 6: Influence des différents paramètres évalués sur le taux de consolidation

<i>Paramètre évalué</i>	<i>Degré de significativité (p)</i>
Sexe	0,36
Age	0,23
Tabagisme actif	0,19
<b>Etiologie</b>	<b>0,027</b>
Sepsis	0,085
Site receveur	0,73
Nombre d'interventions antérieures	0,94
Délai de réalisation de la fibula	0,7
Masquelet	0.085
Longueur de la fibula	0,7
Placement de la fibula	0,35
Méthode de fixation	0,96
Greffe additionnelle	0,62

### *Délai de consolidation*

Le seul facteur montrant une différence significative en termes de délai de consolidation était l'âge ( $p=0.007$ ). Paradoxalement, plus l'âge augmentait, plus le délai de consolidation diminuait (Figure 28). Les autres paramètres sont rapportés dans le Tableau 7. Ils n'étaient pas significatifs.

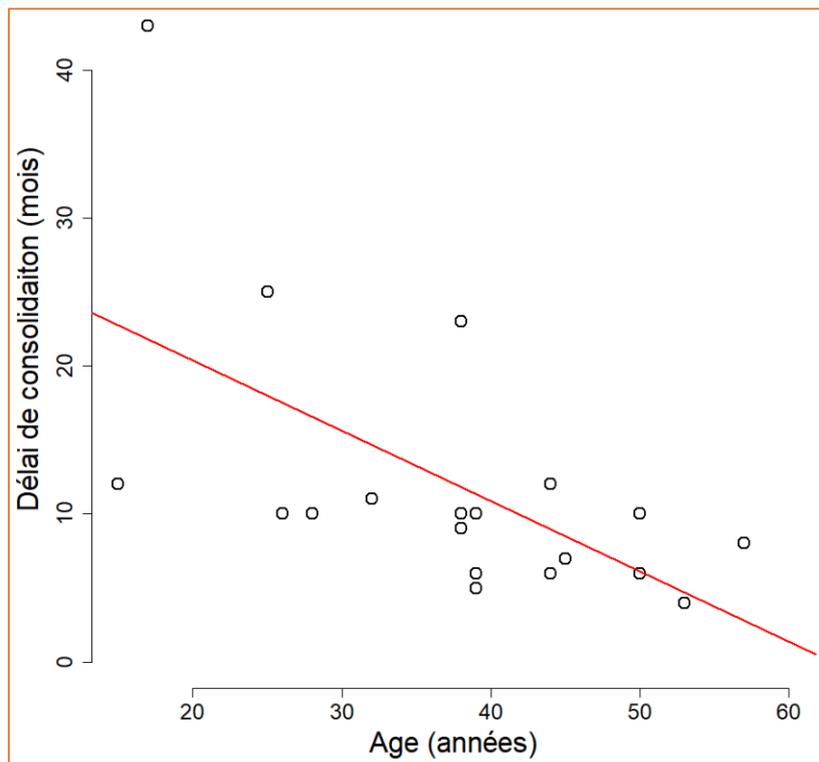


Figure 28: Evolution du délai de consolidation en fonction de l'âge

Tableau 7: Influence des différents paramètres évalués sur le délai de consolidation

Paramètre évalué	Degré de significativité (p)
Sexe	0,25
<b>Age</b>	<b>0,007</b>
Tabagisme actif	0,35
Etiologie	0,33
Sepsis	0,41
Site receveur (membre supérieur vs membre inférieur)	0,98
Nombre d'interventions antérieures	0,28
Délai de réalisation de la fibula	0,23
Masquelet	0,41
Longueur de la fibula	0,09
Placement de la fibula	0,68
Méthode de fixation	0,27
Greffe additionnelle	0,87

## D. Analyse secondaire : séquelles du site donneur

Sur les 24 patients analysés, 5 patients ont été perdus de vue. Dix-neuf patients ont donc été vus en consultation et ont fait l'objet d'une analyse secondaire. Parmi eux, 42% (N=8) présentaient une boiterie. Celle-ci n'était pas imputable au prélèvement seul, puisque parmi les 8 patients, 6 avaient un site receveur au membre inférieur et les 2 autres présentaient des troubles neurologiques (spasticité) et ostéoarticulaires (arthrose de hanche).

Sept de ces huit patients utilisaient une aide technique et tous avaient une limitation du périmètre de marche, compris entre 50 et 1000 mètres.

Au niveau de la cheville, 21% des patients (N=4) présentaient une limitation de mobilité en flexion dorsale avec un déficit d'environ 15° par rapport au côté controlatéral. Deux de ces patients (10.5%) étaient également déficitaires en flexion plantaire avec un déficit d'environ 20°.

On retrouvait une instabilité subjective de la cheville chez 32% des patients (N=6), ressentie uniquement sur terrain accidenté ou en pente, ou au port de talons hauts. Il n'y avait pas d'instabilité objective.

Une déformation de l'hallux en hyperextension (avec un déficit de la flexion) était authentifiée chez 10.5% (N=2) des patients.

Le score AOFAS moyen était de 85.3. Des douleurs étaient présentes chez 36.8% (N=7) des patients au moment de l'évaluation – souvent intermittentes – avec une EVA moyenne de 1.6/10.

## E. Site receveur

Sur les 19 patients revus, le site receveur était situé au membre supérieur dans 9 cas.

La douleur était en moyenne de 1.6/10 au membre supérieur, et de 4.6/10 au membre inférieur.

Au membre supérieur, la perte de substance osseuse affectait le côté dominant dans 44% des cas (4 patients sur 9). Le score DASH moyen était de 37%, correspondant à une limitation modérée des activités. La moyenne des différences entre le JAMAR global du site receveur et celui du côté controlatéral était de 23 kg. Pour le pinch, elle était de 3.25 kg. On retrouvait donc une perte de force importante du côté opéré.

Les scores moyens d'évaluation esthétique par le patient et par l'examineur sont rapportés dans le Tableau 8. Comme attendu, le résultat esthétique était moins bon au niveau du site receveur – souvent multi-opéré – qu'au niveau du site donneur.

Tableau 8: Evaluation esthétique des cicatrices selon le patient (EVA/10) et l'examineur (Score VSS)

	Score patient /10	Score VSS /13
<b>Site donneur</b>	8,2	1,5
<b>Site receveur</b>	6,9	4,4

## F. Satisfaction globale et score SF-36

La satisfaction globale des patients était très bonne, en moyenne de 8.1/10.

Les résultats du score SF-36 sont présentés dans la Figure 29. Les capacités physiques étaient altérées. Le retentissement de l'état physique des patients sur leur activité était élevé, puisque 50% des patients présentaient un score de 0% et 75% d'entre eux présentaient un score inférieur à 37.5%. Les scores obtenus dans le domaine de la santé psychique étaient en revanche plutôt corrects, puisque 75% des patients avaient un score supérieur à 64% dans ce domaine. La vie sociale était relativement conservée, avec 75% des patients dont le score était supérieur à 56.25%. Les patients estimaient globalement que leur état de santé était stable par rapport à l'année précédente (médiane à 50%).

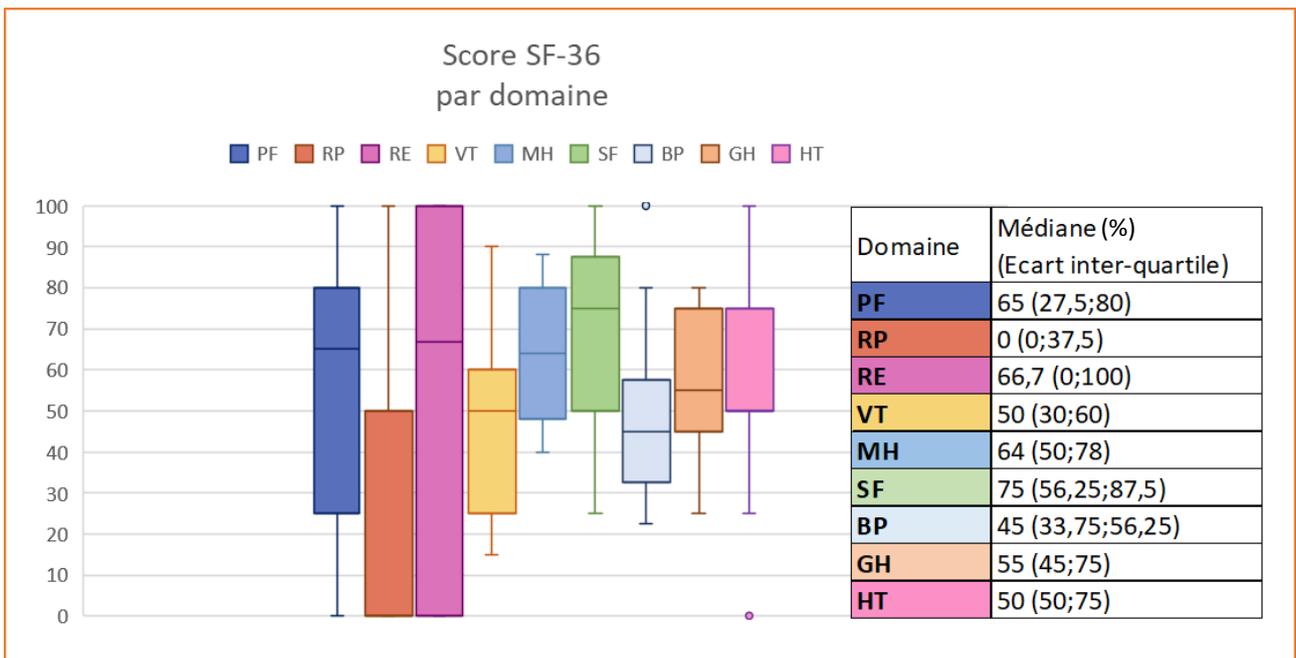


Figure 29: Score SF-36 par domaine. PF : Physical function ; RP : Role physical ; RE : Role emotional ; VT : Vitality ; MH : Mental Health ; SF : Social Function ; BP : Bodily Pain ; GH : General Health ; HT : Health Change. Les valeurs hors-normes sont schématisées par des points (BP, HT).  
La médiane est exprimée en pourcentage.

## V. DISCUSSION

### A. Consolidation

#### *Taux et délai*

Dans notre série, le taux de consolidation primaire était de 66.7%, et secondaire de 79.2%. De plus, deux patients parmi les non-consolidés étaient revus avec un recul court et en bonne voie de consolidation.

Nos résultats sont donc comparables avec ceux retrouvés dans la littérature (Tableau 9), puisque le taux de consolidation moyen toutes étiologies confondues est de 80.1% (113). Parmi les étiologies tumorales, le taux de consolidation médian est de 93.3% au membre supérieur (114).

L'évaluation de la consolidation est par ailleurs difficile. Elle passe systématiquement par des radiographies standards mais celles-ci sont peu sensibles, car il faut 30 à 40% d'altération de la minéralisation pour observer un changement (138) et la visualisation des extrémités peut être gênée par le matériel de fixation. Certaines équipes réalisent des TDM de manière systématique (tous les 3 mois)(83) et d'autres non (93).

Tableau 9: Taux de consolidation retrouvés dans la littérature

Etude	N patients	Age (années)	Longueur fibula (cm)	Taux de consolidation		Délai consolidation (mois)
				Primaire	Secondaire	
1992 Han et al. (115)	160	NC	NC	61%	81%	6 <i>union primaire</i>
2000 Minami et al. (116)	102	35,6	14,3	82%	95%	15,5 <i>union primaire</i> 31,1 <i>union secondaire</i>
2004 Lee et al. (87)	51	41	16,5	92,2%*		3,74
2004 Adani et al. (117)	12	39	8,4	75%	92%	4,8
2005 Safoury et al. (118)	18	34	17	95%	100%	4
2006 Gebert et al. (119)	21	15,4	14	81%*		7,5
2010 Zhen et al. (120)	28	31,5	15	78,6%	100%	8
2010 Hariri et al. (121)	38	11,8	19,2	89%*		20
2011 Soucacos et al. (56)	18	27	10	92%*		3
2013 Noaman et al. (68)	16	35,2	8	94%*		3,5
2015 Hilven et al. (122)	74	23	18,5	77%	93%	10,5
2017 Houdek et al. (123)	109	33	16	70%	91%	14
2018 Cano-Luis et al. (110)	14	24,4	6-11	86%	93%	4,2
2020 Claxton et al. (124)	28	29	14	71%	96%	13
2020 Tibbo et al. (83)	23	60	17	52%	78%	13
2020 Xu et al. (125)	18	25,9	11,9	94,4%*		4,9

\* : pas de précision sur l'union primaire ou secondaire

## *Facteurs influençant la consolidation*

### AGE

Contrairement aux résultats retrouvés dans notre étude, la littérature n'a pas montré de différence significative du taux de consolidation en fonction de l'âge (93,122,125). Houdek et al. retrouvaient tout au plus une tendance à la diminution de ce taux chez les patients de plus de 40 ans ( $p=0.007$ )(123). En revanche, on retrouvait de manière surprenante une différence significative sur le délai de consolidation en fonction de l'âge ( $p=0.007$ ), avec une consolidation plus rapide chez les patients plus âgés. Ce résultat pourrait être expliqué par un meilleur respect des consignes d'immobilisation post-opératoires chez les sujets âgés. Cette donnée n'étant pas analysée dans notre série, tout comme d'autres facteurs pouvant influencer la consolidation, il nous est impossible de conclure.

### ETIOLOGIE DE LA PERTE DE SUBSTANCE

Dans notre étude, nous retrouvions un taux de consolidation significativement différent en fonction de l'étiologie de la perte de substance ( $p=0.027$ ). En effet, les fibulas réalisés dans un contexte urgent (traumatique et infectieux) consolidaient moins bien que celles réalisées dans un contexte tumoral.

La littérature est divergente à ce sujet. L'étude de Han et al. est concordante, puisque le taux de consolidation était plus élevé pour les tumeurs et les anomalies congénitales (115). Il y avait également une différence entre les pseudarthroses septiques et non septiques, tout comme dans la série de De Boer et al. (126). Nous retrouvions cette tendance dans notre étude mais de manière non significative ( $p=0.085$ ). A l'inverse, plusieurs articles ne retrouvaient pas de différence entre les différentes étiologies (116,123).

## SITE RECEVEUR

Comme dans notre série, les articles étudiés ne retrouvaient pas de différence significative du taux de consolidation en fonction du site receveur (93,121–123), ni entre membre supérieur et membre inférieur (125). Au niveau du fémur, la portion distale du lambeau semble consolider plus vite que la partie proximale, ce qui peut être expliqué par une meilleure vascularisation et une plus grande proximité avec l'axe anatomique du membre (121).

## LONGUEUR DU LAMBEAU

Nous n'avons pas mis en évidence de différence significative du taux ( $p=0.7$ ) ni du délai ( $p=0.09$ ) de consolidation en fonction de la longueur de la fibula. C'est également le cas dans les différentes séries publiées, tant au niveau du taux (122,123,126) que du délai de consolidation (122).

## METHODE DE FIXATION

L'analyse réalisée sur nos 24 patients ne retrouvait pas de différence significative de taux ni de délai de consolidation en fonction de la méthode de fixation choisie, rigide ou semi-rigide ( $p=0.96$  et  $0.27$  respectivement). Ce résultat est concordant avec la littérature (93,122,123).

## ANASTOMOSES VEINEUSES

Dans notre échantillon, nous n'avons pas trouvé de différence significative sur la consolidation entre les patients ayant bénéficié d'une ou de deux anastomoses veineuses.

La littérature à ce sujet n'est pas consensuelle. Certains auteurs rapportent des cas de succès de lambeaux ostéo-cutanés malgré l'absence d'anastomose veineuse perméable (127–129). D'autres études prônent la réalisation d'une seule anastomose veineuse

(130,131). Enfin, certains auteurs encouragent l'anastomose de deux veines (132,133) (ANNEXE 5 : Anastomoses veineuses).

Il nous semble ainsi indiqué d'anastomoser au moins une veine.

#### GREFFE ADDITIONNELLE

Nous n'avons pas mis en évidence de différence significative de consolidation en fonction de l'adjonction d'une auto- ou allogreffe. Ce résultat concorde avec la littérature (116,123). A noter cependant que Houdek et al. retrouvaient une diminution significative du taux de reprise chirurgicale à distance chez les patients ayant bénéficié d'une autogreffe additionnelle au moment du lambeau (93).

### *Viabilité du lambeau*

La surveillance des lambeaux osseux enfouis est difficile et ne peut pas faire appel à la clinique.

L'évaluation de la viabilité osseuse en post-opératoire précoce peut faire appel à plusieurs techniques comme le doppler externe ou implantable (134), la scintigraphie par émission de positons (135) ou encore la microdialyse (136). La scintigraphie au technétium 99m est une technique souvent plébiscitée. En cas de viabilité du lambeau, elle est « chaude » et retrouve une prise de contraste diffuse du lambeau, renforcée au niveau des sites d'ostéotomie. En cas d'échec de vascularisation, elle est « froide » et ne montre pas de prise de contraste (137). Néanmoins, elle doit être réalisée dans la 1<sup>ère</sup> semaine post-opératoire car peut devenir faussement positive ensuite en raison d'appositions périostées (138). Par ailleurs, sa valeur prédictive positive (83) et sa spécificité (138) sont modestes.

D'autres auteurs proposent la réalisation d'une palette cutanée associée pour permettre la surveillance clinique (139–142). Les inconvénients sont la difficulté de positionnement de la palette notamment lorsque l'os receveur est profond avec un risque d'étirement des perforantes cutanées (139). Par ailleurs, la nécrose de la palette n'est pas toujours associée à une atteinte de la portion osseuse (141,142). Enfin, les thromboses tardives peuvent être sous-estimées lorsque la peau adjacente a pris le relais de la vascularisation cutanée (139).

### *Délai de la cure de pseudarthrose*

Dans notre série, la cure de pseudarthrose était réalisée à un délai médian de 14.5 mois. De nombreuses séries ne précisent pas ce délai (83,87,93,116,117,122,125,143,144). Claxton et al. réalisaient la cure de pseudarthrose à 8 +/- 3 mois dans le cadre de résections oncologiques du membre supérieur (124), et à 9 mois en moyenne dans un contexte de pseudarthrose radique (112). Houdek et al., sur une population mixte aussi bien en termes d'étiologie que de site receveur, envisageaient cette cure à partir du 6<sup>ème</sup> mois post-opératoire lorsqu'il n'y avait aucun signe de consolidation radiologique. Néanmoins, elle était réalisée à 14 mois en moyenne (123). On comprend donc que l'absence totale d'évolution pendant les premiers mois est rare. C'est ainsi la cinétique de l'évolution radiologique sur la première année post-opératoire qui permettra de poser l'indication d'une reprise chirurgicale pour autogreffe supplémentaire.

En résumé, l'évaluation de la viabilité et de la consolidation du greffon sont difficiles et non consensuelles, tout comme le délai de cure de pseudarthrose.

## B. Une des complications principales de la fibula vascularisée : la fracture du greffon

Les fractures du greffon sont fréquemment observées dans la littérature. Elles concernent jusqu'à 40% des patients (116,119,121,123,123,126,157–160) et surviennent quasiment toujours dans la 1<sup>ère</sup> année post-opératoire (126,142,157), dans la 1<sup>ère</sup> année post-consolidation (161,162) ou peu de temps après l'ablation du matériel de fixation (158,161). Ces fractures touchent les membres inférieurs mais également les membres supérieurs (114,119,159,160). Au niveau du greffon, elles se situent préférentiellement à ses extrémités (161) ou en regard des trous de vis qui constituent des zones de faiblesse (119)(Figure 30).

Les facteurs de risque retrouvés sont la remise en charge trop précoce (157) et le mauvais alignement du greffon par rapport au site receveur (161). Au niveau du fémur, le risque de fracture de stress semble diminué par la réalisation d'une fibula double-barreau, qui augmente la surface osseuse du transfert donc la solidité initiale (161–164). L'influence de la longueur du prélèvement est discutée, majorant le risque de fracture dans certaines études (116,161) mais pas dans d'autres (87,122,141).

Le traitement de ces fractures est la plupart du temps orthopédique par immobilisation et mise en décharge, puisque la fibula est capable d'une hypertrophie compensatoire (contrairement aux allogreffes)(93,119,157,161). La consolidation se fait alors en 2 à 5 mois (161). En cas de nécessité de traitement chirurgical (grand déplacement, bris de matériel), la consolidation est plus longue avec des délais moyens de 22 mois (161). La prévention est cruciale par le respect de l'axe du membre en per-opératoire et par la protection du membre receveur pendant la 1<sup>ère</sup> année post-opératoire (remise en charge progressive et limitation des mouvements en force).



Figure 30: Patient n°3 : Radiographies montrant une fracture de stress du 1/3 proximal du greffon. Celle-ci est survenue 1 mois après ablation du fixateur externe, soit 4 mois après consolidation et 12 mois après réalisation du lambeau. a: de face; b: de profil.

## C. Imagerie préopératoire

La plupart des publications s'accordent sur la nécessité d'une évaluation vasculaire de la jambe donneuse en préopératoire. Elle doit être au moins clinique avec la palpation des pouls tibial postérieur et pédieux. Cette dernière n'est cependant pas toujours aisée en raison des facteurs suivants :

- Elle dépend de la pression artérielle systolique et de l'expérience de l'examineur (145)
- Le pouls pédieux est physiologiquement absent chez 5 à 10% de la population (146)
- Les pouls distaux peuvent être présents même en cas de PAM malgré l'hypoplasie des 2 artères tibiales (147).

La conduite à tenir concernant la réalisation d'une imagerie vasculaire préopératoire n'est pas consensuelle. Certains auteurs ne la recommandent qu'en cas d'anomalie des pouls, d'artériopathie connue ou d'antécédent de traumatisme sur le membre inférieur (148–151). Cependant, Alolabi et al. retrouvaient un changement d'indication dans le choix du lambeau après imagerie préopératoire chez 20% des patients (CI 95% : 9.6%-33.2%), dans une méta-analyse portant sur 664 patients (147).

Dans notre série, 11 patients étaient fumeurs. Seulement 27% de ces patients ont bénéficié d'un angio-scanner du site donneur en préopératoire, alors que le tabac est reconnu comme étant le principal facteur de risque modifiable d'artériopathie oblitérante des membres inférieurs (AOMI)(152) avec un risque relatif compris entre 2 et 7 selon les études (153). Par ailleurs, 2 patients sur les 7 (28.5%) dont le site donneur a été analysé présentaient une contre-indication à la levée d'un lambeau de fibula sur l'une des deux jambes. L'imagerie a donc permis d'orienter le côté de prélèvement.

Tenant compte de tous ces arguments, il nous paraît justifié – tout comme certains auteurs (40,41,154–156), de réaliser une imagerie vasculaire préopératoire de manière systématique au niveau du site donneur. Il semble en effet peu logique de prendre un risque vasculaire pour la jambe donneuse ou pour le lambeau dans le cadre d'une chirurgie complexe de sauvetage de membre. L'imagerie apporte des informations non seulement sur l'anatomie de l'AF et sur la présence de sténoses acquises (AOMI), mais également sur la présence de malformations vasculaires ou d'une bifurcation basse du tronc tibio-fibulaire qui nécessiterait de décaler l'ostéotomie proximale (41,154,156).

Dans la littérature, différents types d'imagerie sont proposés. Des précisions sur celles-ci sont apportées dans l'ANNEXE 6 : Imagerie préopératoire.

## D. Complications et séquelles du site donneur

Le Tableau 10 ci-dessous rapporte les données de 5 publications concernant le taux de séquelles et de complications péri-opératoires mises en évidence au niveau du site donneur. A noter que ces dernières n'ont pas été évaluées dans notre étude en raison de données manquantes dans les dossiers.

Tableau 10: Complications et séquelles observées dans la littérature

Etude	N patients	Age (années)	Durée de suivi (mois)	Complications péri-opératoires	Séquelles	Réinterventions
1995 Anthony et al. (165)	29	58,8	7,3	17%	NC	0%
1997 Shpitzer et al. (95)	41	55,6	17	2%	27%	2%
2000 Minami et al.(116)	102	35,6	7,5	11,50%	4%	1%
2001 Zimmermann et al. (94)	42	48	34	38%	25%	17%
2011 Momoh et al.(166)	157	53	24,9	31%	17%	3%

### Conséquences sur la marche

Dans notre série, nous retrouvons une boiterie avec limitation du périmètre de marche chez 42% des patients. L'altération de la marche était considérable avec utilisation d'une aide technique 88% de ces patients.

La part de handicap fonctionnel liée au prélèvement lui-même était difficile à déterminer. En effet, le site receveur était situé au membre inférieur chez 75% de ces patients, dont 67% du côté du prélèvement. Les deux patients qui présentaient une boiterie malgré un site receveur situé au membre supérieur avaient également une atteinte des membres inférieurs, d'origine dégénérative pour l'un (arthrose de hanche) et neurologique pour l'autre (spasticité).

Dans la littérature, la prévalence de la limitation du périmètre de marche semble néanmoins légèrement inférieure à celle retrouvée dans notre série. Dans l'étude de Zimmerman et al. portant sur 42 fibulas réalisés dans un contexte de cancer de la sphère ORL, elle était de 23.7% (94). Dans l'étude de Babovic et al., 29 patients sur 100 avaient un site receveur situé au membre inférieur partageant ainsi le biais de confusion de notre série. Néanmoins, le périmètre de marche n'était recueilli que chez 55 patients, sans précision sur la localisation du site receveur chez ceux-ci. Il était inférieur à 1000m chez 27.3% des patients (99).

Plusieurs phases de la marche semblent altérées dans les suites du prélèvement d'une fibula vascularisée. Di Giuli et al. ont réalisé une étude portant sur 14 patients opérés de la sphère ORL, en comparant leur marche préopératoire à celle à 6 mois post-opératoire. Ils retrouvaient (167):

- Une diminution significative de la durée de la phase de double contact, liée au raccourcissement de la phase pré-oscillante. Celle-ci serait liée à une faiblesse du long fléchisseur de l'hallux, d'une part à cause de la suppression de ses insertions fibulaires et d'autre part à cause de l'atteinte de sa vascularisation (branches de l'artère fibulaire)(168) ;
- Une phase d'appui significativement plus longue du côté opéré que du côté sain ;
- Une phase d'oscillation significativement plus courte du côté opéré que du côté sain.

Cependant, il n'y avait pas de différence sur la vitesse de marche ni sur la cadence. D'autres articles analysant de manière objective la marche retrouvaient une altération considérable de celle-ci avec utilisation d'une aide technique chez 0% à 13.1% des patients (94,168–170).

Ainsi, les conséquences sur la marche sont objectives mais souvent modérées. La marche est possible sans douleur en moyenne 5 semaines après l'intervention (95), et normale en

moyenne 82 jours après l'intervention (94). La montée des escaliers devient possible à partir de J47 en moyenne (94).

Les protocoles de reprise de l'appui sur le membre donneur varient en fonction des centres. Certains l'autorisent à partir du 2<sup>ème</sup> jour post-opératoire (171), d'autres à partir du 1<sup>er</sup> jour sous couvert d'une botte amovible pendant 6 semaines (123). Néanmoins, aucune association n'a été retrouvée entre le délai de reprise de la marche et la survenue de complications du site donneur (94,166). Il nous paraît donc adapté d'encourager la mobilisation précoce afin de limiter les complications de décubitus, et d'encourager la kinésithérapie pré- et post-opératoire (165).

#### *Mobilité, stabilité et déformation de la cheville*

Dans notre série, 21% des patients présentaient un déficit de flexion dorsale, associé dans la moitié des cas à une limitation de la flexion plantaire.

Les chiffres retrouvés dans la littérature sont compris entre 2% et 29% de limitation de mobilité (94,95,165,166), avec un déficit moyen de 11.5% par rapport au côté controlatéral toutes mobilités confondues (9). Il concerne principalement la flexion dorsale comme dans notre série (94,172), ce qui est une des causes potentielles de gêne à la marche sur terrain irrégulier (173).

Il existe néanmoins fréquemment une différence entre l'évaluation objective et subjective, comme dans l'étude de Zimmermann et al. qui retrouve 31.6% de limitation de mobilité subjective contre 39.5% de limitation objective (94). Ce delta est explicable par les capacités d'adaptation du membre donneur : lors de la perte de 50% de mobilité de la cheville (en flexion et extension), le déficit fonctionnel ressenti n'est que de 4% pour la flexion dorsale et de 7% pour la flexion plantaire (165).

Une sensation d'instabilité de cheville était retrouvée chez 32% des patients de notre étude, sans anomalie objective. Celle-ci se manifestait essentiellement sur terrain irrégulier ou en

penne, comme dans d'autres séries (174). Plusieurs articles recensent les instabilités subjectives, touchant entre 0 et 20% des patients (94,95,165,166,175,176). Cependant, on retrouve là aussi une dissociation entre l'instabilité ressentie par le patient et l'instabilité objective, comme dans l'étude de Tang et al. où 42% des patients se plaignaient d'instabilité sans aucun signe clinique (171). A l'inverse, Fahradi et al. trouvaient 40% d'instabilité objective contre 20% ressentie (177).

L'instabilité subjective semble correspondre à une fatigabilité ou à une sensation de faiblesse de la cheville plutôt qu'à une réelle instabilité (171). L'instabilité objective peut être évitée par la préservation des ligaments tibio-fibulaires inférieurs insérés sur la fibula distale (cf. technique chirurgicale)(100). Néanmoins, Ganel et al. ont rapporté un cas d'instabilité survenu malgré la conservation de 8cm de fibula en distal (178). Ils attribuaient celle-ci à une hyperlaxité de cheville, probablement décompensée par la prélevement du lambeau. Ainsi, l'évaluation préopératoire doit rechercher une hyperlaxité éventuelle. Si elle est présente, une stabilisation tibio-fibulaire distale sera envisagée, soit par orthèse, soit par vis de syndesmose (178).

La déformation en valgus est exceptionnelle chez l'adulte mais touche jusqu'à 40% des enfants (179,180). Elle correspondrait à une ascension et une rotation antéromédiale de la fibula distale, avec une nécrose de la partie latérale de la physe tibiale distale (181). Deux théories tentent d'expliquer ce phénomène : l'une mécanique – perte de support latéral du talus par raccourcissement de la fibula distale, et l'autre vasculaire – arrêt de la croissance de la fibula distale suite à l'interruption de l'artère fibulaire (182). De même que pour les instabilités observées chez l'adulte, le risque de survenue d'un valgus de cheville chez l'enfant ne dépend pas de la longueur de la fibula prélevée, mais de celle de la fibula distale restante (179). L'index « age-residual fibula index » ou « distal fibular donor index » correspond à la somme de l'âge du patient et de la longueur de la fibula restante. Lorsque

celui-ci est inférieur à 16, le risque de développement d'un valgus est augmenté (9,179,181,182).

Le score AOFAS moyen était de 85.3/100 dans notre étude, concordant avec les chiffres de la littérature compris entre 77 et 96.89 (172–174,177). Ces résultats semblent corrects, même s'il n'existe pas de valeur de référence pour ce score (173).

### *Déformations de l'hallux*

Les déformations de l'hallux après prélèvement d'un lambeau de fibula sont fréquentes. Elles concernent jusqu'à 39% des patients (166,167,172) et sont souvent associées à une limitation de mobilité (94,95,171). La déformation la plus fréquemment décrite est l'orteil en griffe ou en marteau, qui concerne en moyenne 6.1% des patients (9) et apparaît en quelques mois (183). Elle est liée à une contracture du long fléchisseur de l'hallux – d'origine mécanique (fibrose) et vasculaire (prélèvement de l'artère fibulaire)(95) – et pourrait être prévenue par l'ancrage du long fléchisseur de l'hallux au muscle tibial postérieur et à la MIO (172) lors du prélèvement. Cette déformation peut également être secondaire à un syndrome des loges subclinique (184). En cas de gêne persistante malgré kinésithérapie, l'allongement du tendon du long fléchisseur de l'hallux par plastie en Z réalisée en regard de la malléole médiale donne de bons résultats cliniques (183). Ces troubles peuvent également concerner les autres orteils (185,186).

Il ne semble pas exister de corrélation entre les déformations des orteils et les troubles de la marche (176).

Dans notre série, 2 patients présentaient une déformation de l'hallux, assez étonnamment en hyperextension. Celle-ci pourrait être liée à une contracture du long extenseur de l'hallux couplée à une faiblesse du long fléchisseur de l'hallux.

### *Douleurs*

Les douleurs au niveau du site donneur étaient rares et intermittentes dans notre étude. La littérature fait état de douleurs chroniques fréquentes mais souvent modérées (9,94,100,171).

D'autres complications observées dans la littérature sont détaillées dans l'ANNEXE 7 :  
Autres complications du site donneur.

### *Facteurs de risque de complications*

Les études ne retrouvaient pas de différence du taux de complications en fonction de l'âge du patient, du tabagisme actif ou encore de la longueur du prélèvement (99,165).

## E. Indications

Dans la littérature, deux grandes catégories d'indications sont retrouvées pour les lambeaux de fibula vascularisée dans le cadre de la reconstruction des os longs. La première correspond aux défauts osseux de plus de 6 cm (3) selon la règle de Weiland (187). Cependant, une méta-analyse récente ne retrouvait pas d'étude attestant de la pertinence de ce cut-off de 6cm (188). La deuxième indication correspond aux échecs de greffes conventionnelles (4,189).

Dans notre série, seulement 2 fibulas sur les 24 étudiées mesuraient moins de 6 cm. Elles s'intégraient dans le cadre d'une 3<sup>ème</sup> cure de pseudarthrose dans un cas (après 2 échecs de greffes conventionnelles), et dans le cadre d'une 2<sup>ème</sup> cure de pseudarthrose avec ostéite sous-jacente dans l'autre.

Les applications cliniques de la fibula vascularisées sont nombreuses. Elles concernent principalement les étiologies traumatiques et tumorales.

Dans un contexte traumatique, la fibula peut être indiquée au stade initial en cas de fracture ouverte Gustillo IIIB ou IIIC (88,120), ou secondairement dans le cas d'une pseudarthrose septique ou aseptique (63,90,157,189). En cas de traumatisme complexe, elle permet également le prélèvement d'un lambeau composite (63).

En contexte tumoral, de nombreuses études ont montré qu'il n'y avait pas de différence du taux de survie entre les patients traités par amputation et ceux chez qui le membre était conservé (190–193), justifiant ainsi la préservation du membre autant que possible. Celle-ci est aujourd'hui possible dans 85 à 90% des patients atteints d'ostéosarcomes des os longs (194). Le traitement conservateur peut faire appel à un lambeau libre de fibula au moment de la résection tumorale (93,114,119,121,125). Les fibulas vascularisées semblent obtenir un meilleur taux de consolidation que les fibulas non vascularisées (195) même en

terrain irradié ou après chimiothérapie (157). Elles sont également utiles dans le cadre de pseudarthroses radiales (83,112).

Les autres indications du lambeau de fibula vascularisée sont représentées par les ostéomyélites (196), les pseudarthroses congénitales du tibia (197,198) ou de l'avant-bras (199,200) et les ostéonécroses de la tête fémorale (186,201,202).

## F. Alternatives

### *Greffes non vascularisées*

Les autogreffes seules sont le traitement de 1<sup>ère</sup> intention des pertes de substance osseuse de taille modérée en raison de leurs propriétés ostéoinductrices, ostéoconductrices et ostéogéniques (3,203). La technique de la membrane induite en deux temps selon Masquelet (204) permet d'améliorer le taux de consolidation de ces greffes. En effet, la membrane possède des propriétés ostéo-inductrices, ostéogéniques, favorise la revascularisation du greffon et le protège de la résorption (205). Lors du 2<sup>ème</sup> temps, l'autogreffe peut être mélangée à de l'allogreffe (sans dépasser 1/3 du volume total greffé) en cas de perte de substance étendue (206). La littérature retrouve des taux de consolidation allant jusqu'à 92.3% en moyenne pour des pertes de substance mesurant jusqu'à 26cm de long (207,208), avec un délai de consolidation indépendant de la longueur initiale du défaut (209). Cette technique offre des résultats comparables à la fibula vascularisée ou à la technique d'Illizarov (cf. ci-après)(210). Néanmoins, la quantité d'os prélevable est limitée et la consolidation osseuse dans le cadre de défauts de plus de 6cm est plus lente qu'avec une greffe vascularisée (123).

L'utilisation d'allogreffes corticales ou cortico-spongieuses intercalaires offre une grande quantité de matériel greffable, sans morbidité supplémentaire liée au site donneur et permet d'assurer un support mécanique en un temps chirurgical limité (211). Néanmoins, elles sont dépourvues de potentiel ostéogénique et ostéoinducteur (212). Par ailleurs, le risque d'échec est élevé en milieu septique (213). Enfin, le taux de fracture du greffon est important atteignant jusqu'à 42% des patients (214,215), augmenté par des facteurs comme la chimiothérapie post-opératoire ou une longueur de greffe supérieure à 17cm (216).

### *Technique d'Ilizarov*

La technique de l'ascenseur, ou ostéogénèse par distraction, a été décrite dans la 2<sup>ème</sup> moitié du 20<sup>ème</sup> siècle par Ilizarov (217,218). Le principe est de transloquer progressivement un fragment d'os sain vers une perte de substance osseuse, et repose sur la capacité d'un foyer d'ostéotomie à produire de l'os lorsqu'on le distrait à l'aide d'un fixateur externe circulaire (219)(Figure 31). L'os se forme alors parallèlement au vecteur de traction. Lorsqu'une seule ostéotomie est réalisée, on parle d'ostéosynthèse bifocale : au niveau de la perte de substance initiale et au niveau de l'ostéotomie. Il est possible de réaliser une double ostéotomie – en aval et en amont de la perte de substance – lorsque la perte de substance dépasse 5-6cm (220). On parle alors d'ostéosynthèse trifocale (219). Dans tous les cas, le prérequis à l'allongement est l'excision des tissus dévitalisés (221) et l'ostéotomie de la fibula pour éviter la survenue d'une angulation du membre (219). Le protocole est ensuite divisé en trois périodes (203) :

- La phase de latence, d'environ 5 à 7 jours, entre la réalisation de l'ostéotomie et la mise en route de la distraction.
- La phase de distraction elle-même, à une vitesse d'un millimètre par jour selon l'article princeps (218). Elle aboutit au comblement de la perte de substance par l'os néo-formé.
- La phase de consolidation durant laquelle l'os se corticalise, qui dure 2 à 3 fois le temps de la distraction.

En pratique, une méta-analyse réalisée par Aktuglu et al. en 2019 retrouvait un délai médian d'1.74 mois pour 1 cm d'allongement, avec une durée totale du protocole de 10.7 mois (221).

Le taux de consolidation moyen après allongement est de 90.2% (77-100%)(222).

Les avantages de l'ostéogénèse par rapport à la fibula vascularisée sont les suivants :

- La reprise de l'appui est possible précocement grâce au fixateur externe circulaire (223) ;
- Cette technique reste possible en cas de lésion des axes vasculaires de la jambe ;
- Les troubles rotatoires et l'inégalité de longueur du membre peuvent être corrigés dans le même temps (162,219,223).

Cette technique présente néanmoins des inconvénients :

- La mise en place du fixateur externe nécessite de l'expérience et entraîne des douleurs physique et psychique chez le patient (223,224). Sur les 2.6% d'amputation secondaire retrouvés en moyenne dans les études, la moitié est réalisée à la demande du patient (222) ;
- Il existe un risque de mauvais alignement des extrémités osseuses, qui peut être prévenu par l'utilisation d'une broche guide ou d'un clou centromédullaire (219) ;
- L'infection de fiches est la complication la plus fréquente et sa prévalence atteint 100% dans certaines études (221,225,226) ;
- La deuxième complication la plus fréquente au membre inférieur est le développement secondaire d'une arthrose de cheville qui touche en moyenne 25% des patients (222). Ses facteurs de risque principaux sont la double ostéotomie, l'âge supérieur à 45 ans, l'ostéoporose, le surpoids et une vitesse d'allongement inférieure à 50 jours/cm (227) ;
- En contexte tumoral, l'infection de fiches est à haut risque chez les patients immunodéprimés par la chimiothérapie et la qualité de l'os néo-formé peut être diminuée par les thérapies adjuvantes. Par ailleurs, la néoangiogénèse pourrait favoriser les récurrences locales (228).

Les résultats de l'ascenseur semblent être équivalents à ceux de la fibula vascularisée en termes de durée de traitement et de complications. Le délai de consolidation radiologique semble être allongé par rapport à la fibula, mais le délai de reprise de l'appui complet est similaire (210). Platz et al. recommandent la technique d'Illizarov aux pertes de substance de 5 à 12cm de long. Pour les pertes de substance de plus de 12cm, la réalisation d'une fibula vascularisée est conseillée (229). Il en est de même pour El-Gammal et al. qui ont mis en évidence de meilleurs résultats avec la technique d'Illizarov qu'avec les fibulas vascularisées pour les pertes de substance de moins de 12cm, et inversement pour celles de plus de 12cm (230).

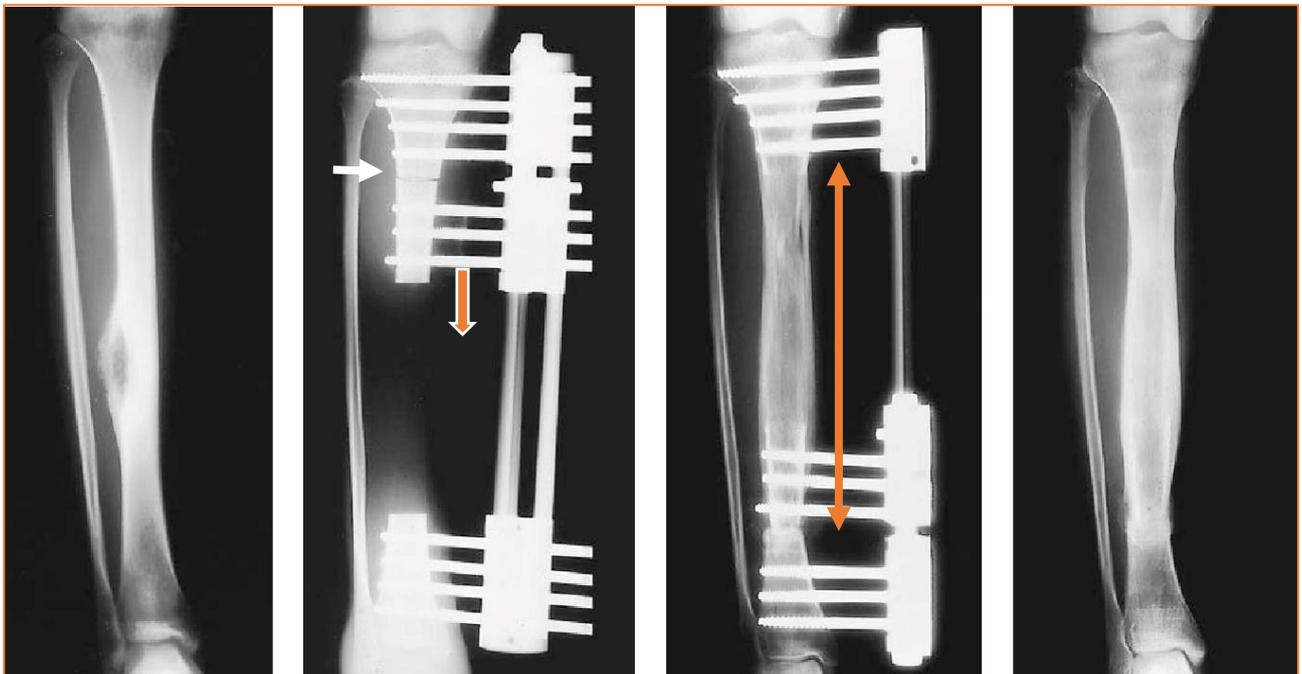


Figure 31: Exemple d'ostéosynthèse bifocale du tibia après résection de tumeur maligne. Ostéotomie métaphysaire puis déplacement distal du fragment. Minéralisation progressive de l'os néo-formé. Flèche blanche : site d'ostéotomie ; flèche orange : sens de déplacement du fragment ; flèche double : longueur osseuse reconstruite (231)

### Technique de Capanna

La technique de Capanna correspond à l'association d'une fibula vascularisée avec une allogreffe (Figure 32). La fibula peut être encastrée dans l'allogreffe (fenêtrée pour le passage du pédicule) ou être positionnée à côté de celle-ci, par exemple en console médiale dans le cadre d'une perte de substance fémorale (232,233). Le taux de consolidation primaire retrouvé dans la littérature est très bon, de 86.5% en moyenne (CI 95% : 79.6-92.2%)(234).



Figure 32: Technique de Capanna. a: photo per-opératoire de la fibula encastrée dans l'allogreffe; b: radiographie post-opératoire immédiate; c: radiographie à 5 ans (235)

Les avantages de cette technique sont multiples (228) :

- Elle associe la solidité initiale de l'allogreffe aux propriétés ostéogéniques de la fibula vascularisée. L'hypertrophie secondaire du lambeau compense ensuite la creeping substitution de l'allogreffe ;
- La fibula favorise la revascularisation et la consolidation de l'allogreffe (69) ;
- En cas d'échec du lambeau de fibula, l'allogreffe sert de support mécanique ;
- En cas de fracture de l'allogreffe, la fibula vascularisée favorise la consolidation de celle-ci, notamment par hypertrophie compensatrice ;
- Le support assuré par l'allogreffe autorise un montage plus léger que pour une allogreffe ou une fibula seules. Ainsi, cette technique est utilisable même dans les cas de stock osseux résiduel faible tels que les tumeurs métaphysaires qui nécessitent une résection intra-épiphysaire.

Les inconvénients sont essentiellement liés à la durée opératoire prolongée (232) ainsi qu'au risque de lésion du pédicule lors de l'insertion de la fibula dans l'allogreffe (82).

L'équipe de Nantes a récemment décrit la technique de « Capasquelet », chirurgie en deux temps associant les techniques de membrane induite selon Masquelet et de Capanna (236).

### *Autres greffes vascularisées*

#### LAMBEAUX ISSUS DE LA CRETE ILIAQUE

La crête iliaque est une source potentielle de prélèvement de lambeaux osseux vascularisés. Ils peuvent être levés sur l'artère iliaque circonflexe profonde (DCIA flaps) comme décrit par Taylor en 1979 (237). Ce pédicule présente des variations à son origine et la veine n'accompagne pas toujours l'artère (238). Les lambeaux sont également prélevables sur l'artère iliaque circonflexe superficielle (SCIA flaps) – branche de l'artère fémorale commune – comme décrit par Taylor en 1978 (239). La longueur osseuse fournie par ces lambeaux est limitée, de 4.8cm en moyenne pour les SCIA flaps (240) et de 7.79cm en moyenne pour les DCIA flaps (241). La morbidité du site donneur des DCIA flaps est importante, évaluée à 40.16% dans une récente méta-analyse (241) mais comparable à celle des fibulas vascularisées dans plusieurs études (172,173). La littérature est pauvre concernant les SCIA flaps mais leur morbidité semble elle aussi comparable à celle des fibulas vascularisées (240).

#### LAMBEAU DE SERRATUS ANTERIEUR ASSOCIE A UNE COTE

Le prélèvement d'un lambeau osseux costal implique la levée simultanée de digitations du muscle serratus anterior, puisque la côte est vascularisée par des perforantes musculo-périostées provenant de la branche thoracique de l'artère thoraco-dorsale (242). Ce lambeau offre un pédicule long et de bon calibre, son prélèvement laisse peu de séquelles et se fait rapidement (243). Il autorise un prélèvement osseux allant jusqu'à 15 cm et son taux de consolidation atteint 95% en 10.9 mois (244–246). Ses inconvénients résident dans sa qualité osseuse moindre (ossification membraneuse), dans le prélèvement obligatoire du muscle et dans la localisation du pédicule à la surface du lambeau (244).

## CONDYLE FEMORAL MEDIAL

Le lambeau de condyle fémoral médial vascularisé a été décrit en 1991 par Sakai et al. (247). Il est basé sur la branche périostée de l'artère géniculée descendante, branche de l'artère fémorale superficielle (Figure 33). Le pédicule mesure alors en moyenne 8cm de long, avec des vaisseaux mesurant entre 1.5 et 3.5mm à leur origine (51). En l'absence de cette branche (11 à 30% des cas), il peut être levé sur l'artère géniculée supéro-médiale, branche de l'artère poplitée (248). Initialement prélevé sous forme corticopériostée, il peut emporter un fragment d'os spongieux voire de cartilage (249). La taille du transplant est limitée mais atteint jusqu'à 8 x 6cm dans sa forme corticospongieuse, et jusqu'à 13x8cm dans sa forme corticopériostée (250). Une méta-analyse réalisée sur 117 cas de pseudarthrose des os longs en 2020 mettait en évidence un taux de consolidation de 99% dans un délai allant de 5 semaines à 14 mois, avec un très faible taux de complications (251).

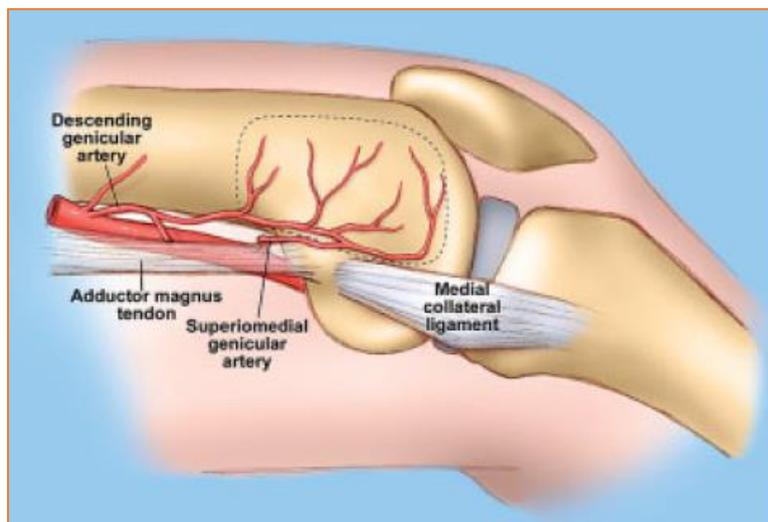


Figure 33: Vascularisation du condyle fémoral médial selon (250)

Les limites communes de ces lambeaux sont la longueur du prélèvement osseux, et la forme de l'os qui n'est pas rectiligne contrairement aux fibulas (252).

## G. Limites de notre étude

Notre étude est rétrospective et porte sur un faible nombre de patients, même si celui-ci est comparable avec de nombreuses séries dans la littérature. En effet, comme expliqué dans ce travail, le lambeau de fibula vascularisée reste une procédure peu courante et réservée à des situations d'échec de procédures conventionnelles ou de pertes de substance étendues.

En raison du caractère rétrospectif, certains facteurs de confusion potentiels comme le délai d'immobilisation ou de remise en charge du membre n'ont pas pu être recueillis par manque d'informations dans les dossiers. Parmi les patients opérés pour une étiologie tumorale, nous n'avons pas pu obtenir l'intégralité des données concernant l'utilisation de thérapies néo-/adjuvantes, qui ont une influence connue sur le taux et le délai de consolidation. Nous n'avons pas réalisé d'analyse multivariée, il n'est donc pas possible de conclure sur l'influence des facteurs étudiés.

Par ailleurs, il existait un risque de biais de mémorisation de la part des patients. En effet, certains sujets ont été initialement pris en charge dans d'autres centres et ne possédaient pas leur dossier exhaustif. Ainsi, la date précise du traumatisme initial tout comme le nombre d'interventions antérieures communiqués par le patient pouvaient être inexacts dans certains cas.

Si le caractère bicentrique de cette étude permettait d'augmenter sa validité externe, elle entraînait un biais de performance. En effet, nous retrouvions un total de 8 opérateurs ayant des niveaux de compétence chirurgicale différents. Ainsi, l'expérience et les habitudes de l'opérateur pouvaient influencer le taux de succès de la procédure chirurgicale.

Le biais de classement était limité grâce à l'évaluation de la consolidation par un observateur indépendant de l'opérateur référent.

Enfin, les patients ont été vus avec un recul variable, allant de 7 à 64 mois. Deux patients revus avec un recul court étaient donc non consolidés sans que l'on puisse conclure à un échec de la procédure. Par ailleurs, les séquelles au niveau du site donneur étaient également influencées par le délai d'évaluation, notamment en termes de douleur ou d'aspect esthétique de la cicatrice.

## VI. CONCLUSION

Le lambeau osseux de fibula vascularisée est un lambeau fiable ayant des propriétés mécaniques et biologiques particulièrement intéressantes dans la prise en charge des pertes de substance et des pseudarthroses des os longs. Il offre une longueur d'os autologue cortico-spongieux inégalé par les autres techniques de reconstruction. La possibilité de réaliser des ostéotomies segmentaires et sa capacité à l'hypertrophie autorisent son utilisation même dans des localisations soumises à des contraintes mécaniques importantes (membres inférieurs). Le taux de consolidation est satisfaisant et les séquelles du site donneur sont modérées.

Néanmoins, son utilisation doit respecter certaines règles. L'évaluation vasculaire préopératoire par angioscanner nous paraît essentielle pour limiter les risques de complications vasculaires au niveau de la jambe donneuse et le risque d'échec. Par ailleurs, la technique de prélèvement doit être maîtrisée et le positionnement du lambeau au niveau du site receveur doit être précis pour limiter le risque de pseudarthrose ou de fracture de stress.

Elle tient une place centrale dans l'arsenal thérapeutique de reconstruction osseuse notamment pour les grandes pertes de substance. Il convient cependant de discuter des alternatives au cas par cas. La réalisation d'études multicentriques comparant les différentes options conservatrices pourraient aider à clarifier ce point. Des progrès restent également possibles dans la surveillance post-opératoire du lambeau et plusieurs techniques actuellement à l'étude pourraient permettre de limiter la survenue d'échecs.

Le sauvetage de membre nécessite dans tous les cas une prise en charge longue et multidisciplinaire, associant notamment une équipe d'ortho-plastique à des kinésithérapeutes. L'information, le suivi régulier et le soutien psychologique du patient tout au long du processus sont des prérequis à son bon déroulement.

## ANNEXE 1 : Rôle de la fibula dans l'articulation du genou

Les structures musculo-ligamentaires postéro-externes du genou sont constituées des éléments suivants (15,16) (Figure 34, Figure 35) :

- Le ligament collatéral latéral (ex latéral externe), qui unit le condyle externe à la tête fibulaire. C'est un des principaux stabilisateurs du genou qui s'oppose au varus et à la rotation externe en extension (253) ;
- Le ligament poplité oblique, expansion du tendon du semi-membraneux ;
- Le ligament poplité arqué, expansion du tendon du biceps fémoral qui présente deux faisceaux : l'un qui s'insère sur le ligament poplité oblique et l'autre sur l'épicondyle latéral du fémur ;
- Le ligament fabello-fibulaire, qui s'étend de la tête fibulaire à la fabella, os sésamoïde localisé au bord externe du tendon du gastrocnémien latéral (254) ;
- Le muscle poplité, qui s'insère à la face postérieure du tibia et se termine sur le condyle fémoral latéral. Il est relié à la tête fibulaire et au ménisque externe par les ligaments fibulopoplité et méniscopoplité respectivement.

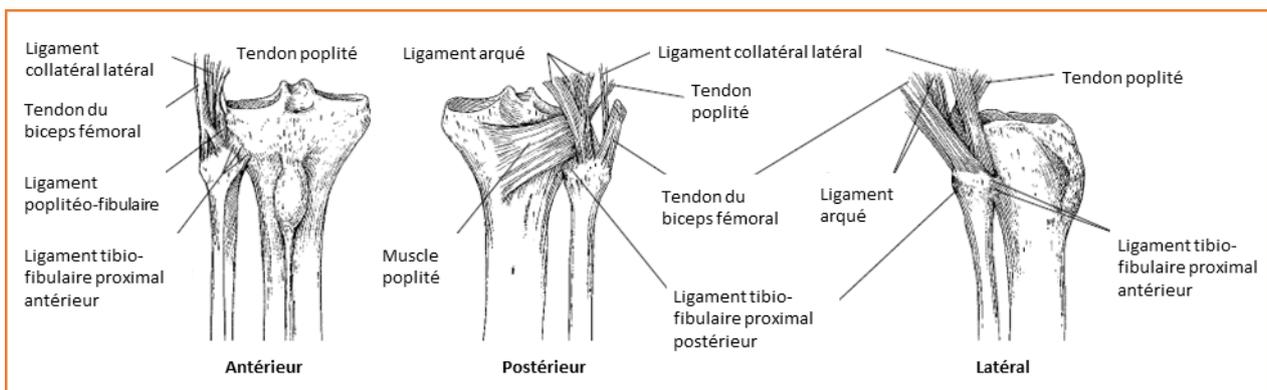


Figure 34: Anatomie de l'articulation tibio-fibulaire proximale (15)

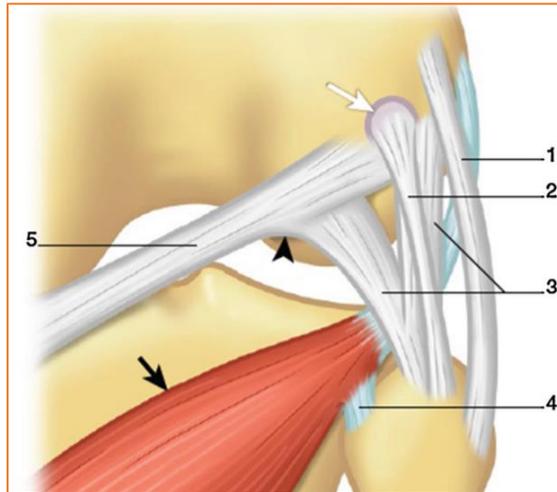


Figure 35: Vue postérieure des structures ligamentaires postéro-externes du genou. 1 : ligament collatéral latéral ; 2 : ligament fabello-fibulaire ; 3 : ligament poplité arqué ; 4 : ligament poplitéo-fibulaire ; 5 : ligament poplité oblique ; flèche noire : muscle poplité ; flèche blanche : fabella ; tête de flèche : jonction entre les ligaments poplités oblique et arqué (254)

Du fait de leur rôle dans la stabilisation du genou, ces structures devront être réparées lors du prélèvement de l'épiphyse proximale de la fibula. Le ligament latéral externe sera renforcé par la portion antérieure du tendon du biceps fémoral, puis réinséré sur la face latérale de la métaphyse tibiale (255).

## ANNEXE 2 : Chronologie de la « creeping substitution »

La « creeping substitution » correspond au remplacement de la greffe non vascularisée, nécrotique, par de l'os néo-formé. Elle associe une formation osseuse via la prolifération puis différenciation des ostéoblastes, et une résorption osseuse via les ostéoclastes.

La chronologie de la creeping substitution est connue. Durant la 1<sup>ère</sup> semaine, on observe un afflux de cellules inflammatoires au niveau du greffon. Elles sont progressivement remplacées par des ostéoclastes au cours de la 2<sup>ème</sup> semaine et l'anoxie liée à l'absence de vascularisation aboutit à une nécrose osseuse. Seuls quelques ostéocytes de surface survivent grâce à la diffusion d'oxygène et de nutriments au niveau du site receveur (256).

L'évolution diffère ensuite entre les greffes spongieuses et corticales. La revascularisation des greffes spongieuses est précoce et débute dans les heures suivant la greffe. Les cellules ostéoprogénitrices issues du site receveur se différencient en ostéoblastes qui produisent de la substance ostéoïde autour des zones de nécrose. Ces dernières sont digérées par les ostéoclastes parallèlement à l'envahissement progressif du greffon par les cellules hématopoïétiques de la moelle du tissu receveur. La résistance de l'os n'étant pas affectée par sa nécrose, les greffes spongieuses passent donc par une phase initiale d'augmentation de résistance. Celle-ci se normalise lorsque l'os nécrotique est complètement résorbé.

Dans le cas d'une greffe corticale, la revascularisation complète est plus lente puisqu'elle survient au bout d'un ou deux mois contre deux semaines pour les greffes spongieuses. Cet écart est lié d'une part aux différences structurelles entre l'os cortical (canaux de Havers et Volkmann) et l'os spongieux, et d'autre part au nombre plus faible de cellules endostées. Par ailleurs, le procédé de « creeping substitution » est inversé puisque la résorption osseuse intervient avant la phase d'ostéoformation. Ainsi, la résistance de l'os est initialement diminuée (257).

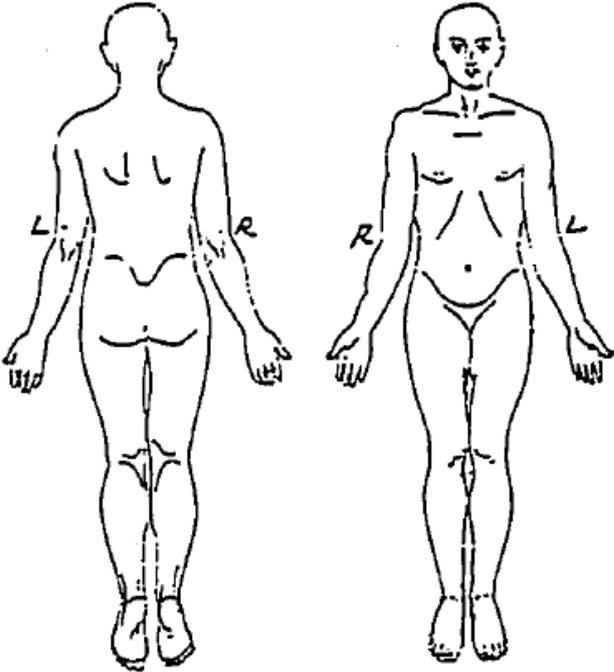
## ANNEXE 3 : Score AOFAS (258)

<b>Ankle-Hindfoot Scale (100 Points Total)</b>	
<b>Pain (40 points)</b>	
None	40
Mild, occasional	30
Moderate, daily	20
Severe, almost always present	0
<b>Function (50 points)</b>	
<b>Activity limitations, support requirement</b>	
No limitations, no support	10
No limitation of daily activities, limitation of recreational activities, no support	7
Limited daily and recreational activities, cane	4
Severe limitation of daily and recreational activities, walker, crutches, wheelchair, brace	0
<b>Maximum walking distance, blocks</b>	
>6	5
4-6	4
1-3	2
<1	0
<b>Walking surfaces</b>	
No difficulty on any surface	5
Some difficulty on uneven terrain, stairs, inclines, ladders	3
Severe difficulty on uneven terrain, stairs, inclines, ladders	0
<b>Gait abnormality</b>	
None, slight	8
Obvious	4
Marked	0
<b>Sagittal motion (flexion plus extension)</b>	
Normal or mild restriction ( $\geq 30^\circ$ )	8
Moderate restriction ( $15^\circ-29^\circ$ )	4
Severe restriction ( $< 15^\circ$ )	0
<b>Hindfoot motion (inversion plus eversion)</b>	
Normal or mild restriction (75%–100% normal)	6
Moderate restriction (25%–74% normal)	3
Marked restriction ( $< 25\%$ normal)	0
<b>Ankle-hindfoot stability (anteroposterior, varus-valgus)</b>	
Stable	8
Definitely unstable	0
<b>Alignment (10 points)</b>	
Good, plantigrade foot, ankle-hindfoot well aligned	10
Fair, plantigrade foot, some degree of ankle-hindfoot malalignment observed, no symptoms	5
Poor, nonplantigrade foot, severe malalignment, symptoms	0

## ANNEXE 4 : Echelle VSS (259)

**VANCOUVER GENERAL HOSPITAL  
OCCUPATIONAL THERAPY DEPARTMENT**

**BURN SCAR ASSESSMENT**  
PATIENT NAME: \_\_\_\_\_



**PIGMENTATION (M)**  
0 normal - colour that closely resembles the colour over the rest of one's body.  
1 hypopigmentation  
2 hyperpigmentation

**VASCULARITY (V)**  
0 normal - colour that closely resembles the colour over the rest of one's body.  
1 pink  
2 red  
3 purple

**PLIABILITY (P)**  
0 normal  
1 supple - flexible with minimal resistance  
2 yielding - giving way to pressure  
3 firm - inflexible, not easily moved, resistant to manual pressure  
4 banding - rope-like tissue that blanches with extension of scar  
5 contracture - permanent shortening of scar producing deformity or distortion

**HEIGHT (H)**  
0 normal - flat  
1 < 2 mm  
2 < 5 mm  
3 > 5 mm

Scale in mm  
=====

## ANNEXE 5 : Anastomoses veineuses

La littérature au sujet du nombre d'anastomoses veineuses à réaliser n'est pas consensuelle.

Certains auteurs rapportent des cas de succès de lambeaux ostéo-cutanés malgré l'absence d'anastomose veineuse perméable, soit en raison d'une thrombose veineuse récidivante malgré reprise chirurgicale, soit en raison de l'absence de veine de bonne qualité au niveau du site receveur (127–129). Le drainage veineux semble alors se faire via les sinusoides médullaires qui se jettent dans le canal veineux central (127).

D'autres études prônent la réalisation d'une seule anastomose veineuse. En 2010, Hanasono et al. ont étudié la vitesse du flux sanguin veineux sur 81 lambeaux libres. Ils ont mis en évidence une diminution de celle-ci en cas de double anastomose veineuse. Celle-ci pourrait d'après eux favoriser la survenue de thromboses vasculaires par stagnation sanguine, surtout aux membres inférieurs où les résistances veineuses sont élevées. D'autres inconvénients potentiels sont mentionnés dans cette étude. Le premier est l'augmentation de la durée opératoire. Le deuxième est la difficulté de dissocier les deux veines du pédicule en raison des anastomoses entre elles. Le troisième correspond au risque de torsion du pédicule et donc de thrombose mécanique en cas d'anastomose de deux veines spatialement distinctes (130). En 2013, l'étude rétrospective de Han et al. menée sur 201 lambeaux libres ostéo-cutanés de fibulas ne retrouve pas de différence significative entre les patients ayant bénéficié de l'anastomose d'une seule veine et ceux ayant eu deux veines microanastomosées, que ce soit sur le taux de thrombose vasculaire ou sur le taux de succès du lambeau (131).

Enfin, certains auteurs encouragent l'anastomose de deux veines. Dans une étude rétrospective menée sur 564 lambeaux libres de type DIEP (Deep Inferior Epigastric artery Perforator), Enajat et al. ont mis en évidence que l'anastomose d'une deuxième veine

diminuait significativement le risque de congestion veineuse. Néanmoins, il n'y avait pas de différence significative sur le taux de nécrose partielle ou totale du lambeau (132). Sur 492 lambeaux libres dont 71 fibulas, Ross et al. obtenaient un taux de succès du lambeau significativement plus élevé avec une double anastomose qu'avec une seule veine (133).

## ANNEXE 6 : Imagerie préopératoire

### Evaluation clinique

La plupart des publications s'accordent sur la nécessité d'une évaluation vasculaire de la jambe donneuse en préopératoire. Elle doit être au moins clinique avec la palpation des pouls tibial postérieur et pédieux. Cette dernière n'est cependant pas toujours aisée. Brearley et al. ont montré que la précision de la palpation des pouls dépendait non seulement du niveau de pression artérielle systolique dans les vaisseaux étudiés, mais aussi de l'expérience de l'examineur (145). De plus, le pouls pédieux est physiologiquement absent chez 5 à 10% de la population ; son absence n'a donc pas de valeur diagnostique à elle seule (146). Enfin, les pouls distaux peuvent être présents même en cas de PAM malgré l'hypoplasie des 2 artères tibiales (147). Il est possible de sensibiliser la recherche des pouls par l'utilisation d'un stylo-Doppler, voire de mesurer l'index de pression systolique (IPS). Lorsque celui-ci est inférieur à 1, la réalisation d'une imagerie est conseillée à la recherche d'une athérosclérose (260). Cependant, la mesure de l'IPS évalue l'état vasculaire global de la jambe et ne permet pas une analyse sélective de chacun des 3 axes jambiers. De plus, le seuil de 1 n'est pas valable pour les patients atteints de médiacalcosse, dont l'IPS est souvent supérieur à 1,3 (146,261).

### Chez quels patients réaliser une imagerie ?

La conduite à tenir concernant la réalisation d'une imagerie vasculaire préopératoire n'est pas consensuelle.

Certains auteurs ne la recommandent qu'en cas d'anomalie des pouls, d'artériopathie connue ou d'antécédent de traumatisme sur le membre inférieur (148–151). L'un des arguments avancé est celui de la possibilité d'un ultime contrôle visuel en per-opératoire : si l'AF semble anormale, notamment si son diamètre est augmenté (type III de Kim-Lippert)(32), elle sera clampée avant section pour s'assurer de la perfusion correcte du pied

(262). Cette approche ne nous paraît pas adaptée. D'une part, elle nécessite un dégonflage du garrot en per-opératoire avec un risque de saignement gênant la suite de l'intervention. D'autre part, elle suppose une dissection déjà avancée pour accéder au pédicule fibulaire. Enfin, l'AF peut être macroscopiquement normale à la partie distale et présenter des variations à sa partie proximale. L'identification de celles-ci ne pourra se faire qu'après une levée quasi complète du lambeau. Ainsi, il faudra non seulement repositionner et ostéosynthéser la fibula, mais aussi rétablir la continuité distale du pédicule par micro-anastomoses. Rappelons également que les types III et IV, qui sont à risque de compromettre la vascularisation du pied ou du lambeau respectivement, ne peuvent pas être diagnostiqués à l'examen clinique et concerneraient jusqu'à 12% de la population (cf. Rappels – Anatomie de la fibula – Vascularisation)(37,39,40).

Une méta-analyse a été conduite par Alolabi et al., incluant 16 études pour un total de 664 patients. Il retrouvait un changement d'indication dans le choix du lambeau après imagerie préopératoire chez 20% des patients (CI 95% : 9.6%-33.2%). Parmi eux, 47% présentaient une vascularisation de type III selon Kim-Lippert, 34% étaient atteints d'artériosclérose et 5% avaient une vascularisation de type IV. Par ailleurs, seulement 28,5% des patients présentant des anomalies vasculaires à l'imagerie avaient un examen clinique anormal (147).

Tenant compte de tous ces arguments, il nous paraît justifié – tout comme certains auteurs (40,41,154–156), de réaliser une imagerie vasculaire préopératoire de manière systématique au niveau du site donneur. Il semble en effet peu logique de prendre un risque vasculaire pour la jambe donneuse ou pour le lambeau dans le cadre d'une chirurgie complexe de sauvetage de membre. L'imagerie apporte des informations non seulement sur l'anatomie de l'AF et sur la présence de sténoses acquises (AOMI), mais également sur la présence de malformations vasculaires ou d'une bifurcation basse du tronc tibio-fibulaire qui nécessiterait de décaler l'ostéotomie proximale (41,154,156).

## Quel type d'imagerie proposer ?

Dans la littérature, différents types d'imagerie sont proposés : l'angiographie conventionnelle, l'échographie-doppler, l'angioscanner et l'angio-RM.

L'angiographie conventionnelle est le gold standard pour l'imagerie vasculaire. Elle fournit des informations morphologiques mais également dynamiques (en cas de retard d'opacification par exemple). Néanmoins, les indications d'angiographie diagnostique seule sont aujourd'hui très limitées (263) en raison de son caractère invasif et de ses complications potentielles. Elle nécessite en effet un abord artériel dans des conditions d'asepsie stricte, au sein d'un plateau technique spécifique (264). On retrouve entre 3 et 9% de complications dans la littérature (37,40), pouvant être locales au point de ponction ou systémiques (cardiaques, neurologiques, rénales)(265). Le risque de décès est évalué à 0.03% (266). Enfin, c'est une technique coûteuse et irradiante.

L'échographie doppler a une sensibilité et une spécificité élevées dans la détection des sténoses et occlusions vasculaires (entre 87.5 et 96.9%)(264,267). Cet examen dynamique permet d'évaluer des vaisseaux allant jusqu'à 1 mm de diamètre (268), et précise le retentissement hémodynamique des lésions (263). Cependant, il ne permet pas de visualiser le pédicule fibulaire ni le réseau vasculaire de la jambe en entier, puisque l'acquisition des images est segmentaire (37). Son faible coût est à mettre en balance avec son caractère opérateur-dépendant (269). De plus, l'examen peut être difficile chez les patients obèses (268).

L'angioscanner en coupes fines (1 mm) présente une très bonne résolution spatiale (270) et visualise les vaisseaux jusqu'à 0.3mm de diamètre (266). Il donne des informations supplémentaires par rapport à l'angiographie. Il permet la visualisation de la paroi des artères (270) mais également des tissus environnants notamment de l'os et des parties molles (37) ce qui est très utile dans un contexte traumatique et septique. Le post-traitement

des images permet des reconstructions en 2D (MPR : Multiplanar reformat) dans tous les plans et en 3D (263). C'est un examen accessible, qui présente néanmoins des contre-indications liées à l'irradiation (grossesse), ou à l'injection de produits iodés (allergie, insuffisance rénale sévère) (270).

Enfin, l'angiographie par résonance magnétique (angio-RM) présente pour avantage de ne pas être irradiante (270). Elle offre une très bonne spécificité (98%) mais sa sensibilité est moyenne (79%)(266). Elle est peu fiable dans l'évaluation vasculaire sous-poplitée (270), plus coûteuse, moins accessible et d'acquisition plus lente que l'angioscanner (270). Ses contre-indications sont principalement liées à la présence de dispositifs implantables (pacemaker).

En résumé, nous préconisons la réalisation systématique d'un angioscanner bilatéral avant prélèvement d'une fibula vascularisée. L'angio-RM pourra être proposé en 2<sup>nde</sup> intention (263) ou lorsqu'une évaluation précise des perforantes septo- et musculo-cutanées est nécessaire (154).

## ANNEXE 7 : Autres complications du site donneur

### Troubles neurologiques

Les troubles neurologiques par atteinte du nerf fibulaire superficiel sont fréquents. Ils atteignent jusqu'à 32% des patients (94,165) et sont le plus souvent transitoires, liés à une neurapraxie (123,141,165).

### Fractures de stress du tibia distal

13 cas de fractures de stress du tibia distal homolatéral au prélèvement avaient été publiés en 2014. La fréquence de celles-ci est probablement sous-estimée en raison de la pauvreté des signes cliniques – principalement des douleurs mises sur le compte du prélèvement, ainsi que de leur guérison spontanée (271). Le délai de survenue par rapport au prélèvement de la fibula est variable, allant de 6 semaines (272) à 16 mois (273). Ces fractures seraient liées à un transfert de la charge mécanique de la fibula vers le tibia (273,274), combiné à une altération de la vascularisation métaphysaire tibiale distale secondaire à la ligature de l'artère fibulaire (271). D'après Durst et al., leur prise en charge doit inclure la correction d'une éventuelle déformation en valgus de la cheville (274).

## BIBLIOGRAPHIE

1. Gouin F, Crenn V, Touchais S. Résection-reconstruction pour tumeurs osseuses malignes du membre supérieur. EMC - Techniques chirurgicales - Orthopédie-Traumatologie. 2020;0(0):1-18 [Article 44-097].
2. Masquelet AC, Kishi T, Benko PE. Résultats à très long terme des reconstructions osseuses segmentaires post traumatiques par la technique de la membrane induite. Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique. 28 janv 2019;105(1):83-91.
3. Petrella G, Tosi D, Pantaleoni F, Adani R. Vascularized bone grafts for post-traumatic defects in the upper extremity. Arch Plast Surg. janv 2021;48(1):84-90.
4. Wood MB, Cooney WP, Irons GB. Skeletal reconstruction by vascularized bone transfer: indications and results. Mayo Clin Proc. nov 1985;60(11):729-34.
5. Ueba Y, Fujikawa S. Nine years follow-up of a vascularized fibular graft in neurofibromatosis - a case report and literature review. Orthop Surg Traumatol (Jpn). 1983;26:595-600.
6. Taylor GI, Miller GD, Ham FJ. The free vascularized bone graft. A clinical extension of microvascular techniques. Plast Reconstr Surg. mai 1975;55(5):533-44.
7. Gilbert A. Vascularized transfer of the fibular shaft. Int J Microsurg. 1979;1:100-2.
8. Le Nen D, Dubrana F, Hu W, Prud'homme M, Lefèvre C. Fibula vascularisée. Techniques, indications en orthopédie et traumatologie. EMC - Techniques chirurgicales - Orthopédie - Traumatologie. 2002;44-040, 10 p.
9. Ling XF, Peng X. What is the price to pay for a free fibula flap? A systematic review of donor-site morbidity following free fibula flap surgery. Plast Reconstr Surg. mars 2012;129(3):657-74.
10. Thévenin F, Morvan G, Guérini H, Campagna R, Vuillemin V, Feydy A, et al. Imagerie de la jambe. Technique d'exploration et anatomie en coupe. EMC - Radiologie et imagerie médicale - musculosquelettique - neurologique - maxillofaciale. 2012;7(3):1-12.
11. Netter F. Chapitre 8 - Membre inférieur. In: Atlas d'anatomie humaine. 7ème. Elsevier Masson; 2019.
12. Ashraf MO, Jones HM, Kanvinde R. Acute traumatic fracture dislocation of proximal tibiofibular joint: case report and literature review. Injury. juill 2015;46(7):1400-2.
13. Eichenblat M, Nathan H. The proximal tibio fibular joint. An anatomical study with clinical and pathological considerations. Int Orthop. 1983;7(1):31-9.
14. Sarma A, Borgohain B, Saikia B. Proximal tibiofibular joint: Rendezvous with a forgotten articulation. Indian J Orthop. 2015;49(5):489-95.
15. Sekiya JK, Kuhn JE. Instability of the proximal tibiofibular joint. J Am Acad Orthop Surg. avr 2003;11(2):120-8.
16. Servien E, Bussièrre C, Aït si selmi T, Neyret P. Reconstructions du plan externe: Lateral collateral ligament reconstructions. 18 Mises au Point en Chirurgie du Genou. Paris: Elsevier Masson; 2013. p. 93-9.
17. Lengelé B, Leemrijse Th. Chapitre 1 - Anatomie chirurgicale du pied et de la cheville. In: Leemrijse T, éditeur. Pathologie du pied et de la cheville . Paris: Elsevier Masson; 2015. p. 2-32.
18. Hsieh C-H, Cheung S-M, Sun C-K, Huang Y-C, Lan G-S, Chang H-W, et al. Evaluation of the ankle function following reconstruction of the donor defect with a split fibular bone after a vascularized fibular flap transfer. Arch Orthop Trauma Surg. juin 2010;130(6):781-6.
19. Bonnel F, Mabit C, Tourné Y. Anatomie et biomécanique de l'articulation talo-crurale. EMC - Podologie. 12(1):1-15.
20. Goh JC, Mech AM, Lee EH, Ang EJ, Bayon P, Pho RW. Biomechanical study on the load-bearing characteristics of the fibula and the effects of fibular resection. Clin Orthop Relat Res. juin 1992;(279):223-8.
21. Bressy G, Lustig S, Neyret P, Servien E. Instabilités du genou. EMC - Appareil Locomoteur. 2015;10(4):1-16.
22. Boisselle M-C. Anatomie et biomécanique du genou [Internet]. Disponible sur: <https://www.orthodiv.org/wp-content/uploads/2018/05/QI3-Anatomie-et-biome%CC%81canique-genou-Marie-Claude-Boisselle-septembre-2016.pdf>
23. Chardin L, Lacroix A, Cliquet F, Laurens AS. Pathologies de l'articulation tibiofibulaire proximale chez le coureur à pied. Journal de Traumatologie du Sport. 1 déc 2020;37(4):225-34.
24. Lezak B, Massel DH, Varacallo M. Peroneal Nerve Injury. StatPearls Publishing; 2021

25. Becciolini M, Pivec C, Riegler G. Ultrasound Imaging of the Deep Peroneal Nerve. *J Ultrasound Med.* avr 2021;40(4):821-38.
26. Allam AE, Mansour ER. Superficial Peroneal Nerve Block. *StatPearls*; 2021
27. Van den Bergh FRA, Vanhoenacker FM, De Smet E, Huysse W, Verstraete KL. Peroneal nerve: Normal anatomy and pathologic findings on routine MRI of the knee. *Insights Imaging.* juin 2013;4(3):287-99.
28. Deutsch A, Wyzykowski RJ, Victoroff BN. Evaluation of the anatomy of the common peroneal nerve. Defining nerve-at-risk in arthroscopically assisted lateral meniscus repair. *Am J Sports Med.* févr 1999;27(1):10-5.
29. Rausch V, Hackl M, Oppermann J, Leschinger T, Scaal M, Müller LP, et al. Peroneal nerve location at the fibular head: an anatomic study using 3D imaging. *Arch Orthop Trauma Surg.* juill 2019;139(7):921-6.
30. Blair JM, Botte MJ. Surgical anatomy of the superficial peroneal nerve in the ankle and foot. *Clin Orthop Relat Res.* août 1994;(305):229-38.
31. Relvas-Silva M, Pinho AR, Lopes JG, Lixa J, Leite MJ, Sousa AN, et al. Anatomy of the superficial peroneal nerve: Can we predict nerve location and minimize iatrogenic lesion? *Morphologie.* 25 févr 2021;S1286-0115(20)30086-2.
32. Kim D, Orron DE, Skillman JJ. Surgical significance of popliteal arterial variants. A unified angiographic classification. *Ann Surg.* déc 1989;210(6):776-81.
33. Cariou J-L. Transferts ou lambeaux libres de et avec péroné ou fibula. *Anatomie chirurgicale, techniques de prélèvement, indications en chirurgie reconstructrice. EMC - Techniques chirurgicales - Chirurgie plastique reconstructrice et esthétique.* 2003;45-099, 38 p.
34. Bardsley JL, Staple TW. Variations in branching of the popliteal artery. *Radiology.* mars 1970;94(3):581-7.
35. Abou-Foul AK, Borumandi F. Anatomical variants of lower limb vasculature and implications for free fibula flap: Systematic review and critical analysis. *Microsurgery.* févr 2016;36(2):165-72.
36. Lappas D, Stavropoulos NA, Noussios G, Sakellariou V, Skandalakis P. Anatomic study of infrapopliteal vessels. *Folia Morphol (Warsz).* août 2012;71(3):164-7.
37. Karanas YL, Antony A, Rubin G, Chang J. Preoperative CT angiography for free fibula transfer. *Microsurgery.* 2004;24(2):125-7.
38. Longo B, Sorotos M, Nicolotti M, Santanelli di Pompeo F. Retrospective analysis of incidence of peroneal artery hypoplasia in 101 free fibula transfers and new classification of popliteal branch anomalies. *Injury.* févr 2014;45(2):394-8.
39. Lippert H, Pabst R. *Arterial Variations in Man: Classification and Frequency.* Softcover reprint of the original 1st ed. 1985 édition. JF Bergmann Verlag; 2011. 122 p.
40. Young DM, Trabulsy PP, Anthony JP. The need for preoperative leg angiography in fibula free flaps. *J Reconstr Microsurg.* sept 1994;10(5):283-7; discussion 287-289.
41. Abou-Foul AK, Fasanmade A, Prabhu S, Borumandi F. Anatomy of the vasculature of the lower leg and harvest of a fibular flap: a systematic review. *Br J Oral Maxillofac Surg.* nov 2017;55(9):904-10.
42. Keen JA. A study of the arterial variations in the limbs, with special reference to symmetry of vascular patterns. *Am J Anat.* mai 1961;108:245-61.
43. Astarci P, Siciliano S, Verhelst R, Lacroix V, Noirhomme P, Rubay J, et al. Intra-operative acute leg ischaemia after free fibula flap harvest for mandible reconstruction. *Acta Chir Belg.* août 2006;106(4):423-6.
44. Rosson GD, Singh NK. Devascularizing complications of free fibula harvest: peronea arteria magna. *J Reconstr Microsurg.* nov 2005;21(8):533-8.
45. Mouton WG, Zehnder T. Images in cardiovascular medicine. Claudication of the foot in a rugby player. *Circulation.* 6 janv 2009;119(1):153.
46. Bähr W. Blood supply of small fibula segments: an experimental study on human cadavers. *J Craniomaxillofac Surg.* juin 1998;26(3):148-52.
47. Sparks DS, Saleh DB, Rozen WM, Hutmacher DW, Schuetz MA, Wagels M. Vascularised bone transfer: History, blood supply and contemporary problems. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* janv 2017;70(1):1-11.
48. McCarthy I. The physiology of bone blood flow: a review. *J Bone Joint Surg Am.* nov 2006;88 Suppl 3:4-9.
49. McKee NH, Haw P, Vettese T. Anatomic study of the nutrient foramen in the shaft of the fibula. *Clin Orthop Relat Res.* avr 1984;(184):141-4.

50. Cariou JL, Couturaud B, Tripon P, Lambert F, Bellavoire A. [The folded fibula flap: anatomical study and clinical application to septic post-traumatic femoral reconstruction. A propos of 6 cases]. *Ann Chir Plast Esthet.* avr 1996;41(2):169-84.
51. Rahmel BB, Snow TM, Batstone MD. Fibular free flap with arteria peronea magna: the role of preoperative balloon occlusion. *J Reconstr Microsurg.* mars 2011;27(3):169-72.
52. Fry AM, Laugharne D, Jones K. Osteotomising the fibular free flap: an anatomical perspective. *Br J Oral Maxillofac Surg.* juill 2016;54(6):692-3.
53. Morsy M, Sur YJ, Akdag O, Sabbagh MD, Suchyta MA, El-Gammal TA, et al. Vascularity of the Proximal Fibula and Its Implications in Vascularized Epiphyseal Transfer: An Anatomical and High-Resolution Computed Tomographic Angiography Study. *Plast Reconstr Surg.* janv 2019;143(1):172e-83e.
54. Mozaffarian K, Lascombes P, Dautel G. Vascular basis of free transfer of proximal epiphysis and diaphysis of fibula: an anatomical study. *Arch Orthop Trauma Surg.* févr 2009;129(2):183-7.
55. The morbidity of the free vascularised fibula flap. *British Journal of Plastic Surgery.* 1 janv 1993;46(6):466-9.
56. Soucacos PN, Korompilias AV, Vekris MD, Zoubos A, Beris AE. The free vascularized fibular graft for bridging large skeletal defects of the upper extremity. *Microsurgery.* mars 2011;31(3):190-7.
57. Blake F, Heiland M, Schmelzle R, Harms J, Werle H, Pohlenz P, et al. The medial approach to the fibula: a feasible alternative. *J Oral Maxillofac Surg.* févr 2008;66(2):319-23.
58. Catalá-Lehnen P, Rendenbach C, Heiland M, Khakpour P, Rueger JM, Schmelzle R, et al. Long-term donor-site morbidity after microsurgical fibular graft: is there a difference between the medial approach and the lateral approach? *J Oral Maxillofac Surg.* sept 2012;70(9):2198-204.
59. Rolland E, Saillant G. La consolidation osseuse normale et pathologique. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique.* 1 janv 1995;38(5):245-51.
60. Fayaz HC, Giannoudis PV, Vrahas MS, Smith RM, Moran C, Pape HC, et al. The role of stem cells in fracture healing and nonunion. *Int Orthop.* nov 2011;35(11):1587-97.
61. Bastard C, Dubory A, Boutroux P, Flouzat-Lachaniette C. Traitement chirurgical des pseudarthroses diaphysaires aseptiques. *EMC - Techniques chirurgicales - Orthopédie - Traumatologie.* 0(0):1-17 [Article 44-050].
62. Shi LL, Garg R, Jawa A, Wang Q, Chai Y, Zeng B, et al. Bony Hypertrophy in Vascularized Fibular Grafts. *Hand (N Y).* 27 janv 2020;1558944719895784.
63. Toros T, Ozaksar K. Reconstruction of traumatic tubular bone defects using vascularized fibular graft. *Injury.* 14 août 2019;
64. Muramatsu K, Bishop AT. Cell repopulation in vascularized bone grafts. *J Orthop Res.* juill 2002;20(4):772-8.
65. Arata MA, Wood MB, Cooney WP. Revascularized segmental diaphyseal bone transfers in the canine. An analysis of viability. *J Reconstr Microsurg.* juill 1984;1(1):11-9.
66. Klein L, Stevenson S, Shaffer JW, Davy D, Goldberg VM. Bone mass and comparative rates of bone resorption and formation of fibular autografts: comparison of vascular and nonvascular grafts in dogs. *Bone.* 1991;12(5):323-9.
67. Teissier J, Bonnel F, Allieu Y. Vascularization, cellular behavior, and union of vascularized bone grafts: experimental study in the rabbit. *Ann Plast Surg.* juin 1985;14(6):494-505.
68. Noaman HH. Management of upper limb bone defects using free vascularized osteoseptocutaneous fibular bone graft. *Ann Plast Surg.* nov 2013;71(5):503-9.
69. Muramatsu K, Hashimoto T, Tominaga Y, Taguchi T. Vascularized bone graft for oncological reconstruction of the extremities: review of the biological advantages. *Anticancer Res.* juin 2014;34(6):2701-7.
70. Fujimaki A, Suda H. Experimental study and clinical observations on hypertrophy of vascularized bone grafts. *Microsurgery.* 1994;15(10):726-32.
71. de Boer HH, Wood MB. Bone changes in the vascularised fibular graft. *J Bone Joint Surg Br.* mai 1989;71(3):374-8.
72. Wolff J. *The law of bone remodelling.* Springer-Verlag; 1986. 126 p.
73. Meyrueis P, Cazenave A, Zimmermann R. *Biomécanique de l'os. Application au traitement des fractures.* EMC - Appareil Locomoteur. 2004
74. El-Gammal TA, El-Sayed A, Kotb MM. Hypertrophy after free vascularized fibular transfer to the lower limb. *Microsurgery.* 2002;22(8):367-70.

75. Wada T, Usui M, Nagoya S, Isu K, Yamawaki S, Ishii S. Resection arthrodesis of the knee with a vascularised fibular graft. Medium- to long-term results. *J Bone Joint Surg Br.* mai 2000;82(4):489-93.
76. Lazar E, Rosenthal DI, Jupiter J. Free vascularized fibular grafts: radiographic evidence of remodeling and hypertrophy. *AJR Am J Roentgenol.* sept 1993;161(3):613-5.
77. Ikeda K, Tomita K, Hashimoto F, Morikawa S. Long-term follow-up of vascularized bone grafts for the reconstruction of tibial nonunion: evaluation with computed tomographic scanning. *J Trauma.* juin 1992;32(6):693-7.
78. Muramatsu K, Ihara K, Shigetomi M, Kawai S. Femoral reconstruction by single, folded or double free vascularised fibular grafts. *Br J Plast Surg.* sept 2004;57(6):550-5.
79. González del Pino J, Gómez Castresana F, Benito M, Weiland AJ. Role of free vascularized bone grafts in the experimentally-induced ischemic necrosis of the femoral head. *J Reconstr Microsurg.* avr 1990;6(2):151-9.
80. Sunagawa T, Bishop AT, Muramatsu K. Role of conventional and vascularized bone grafts in scaphoid nonunion with avascular necrosis: A canine experimental study. *J Hand Surg Am.* sept 2000;25(5):849-59.
81. Muramatsu K, Ihara K, Hashimoto T, Seto S, Taguchi T. Combined use of free vascularised bone graft and extracorporeally-irradiated autograft for the reconstruction of massive bone defects after resection of malignant tumour. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2007;60(9):1013-8.
82. Chang DW, Weber KL. Use of a vascularized fibula bone flap and intercalary allograft for diaphyseal reconstruction after resection of primary extremity bone sarcomas. *Plast Reconstr Surg.* déc 2005;116(7):1918-25.
83. Tibbo ME, Houdek MT, Bakri K, Rose PS, Sems SA, Moran SL. Outcomes of free vascularized fibular flaps for the treatment of radiation-associated femoral nonunions. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* nov 2020;73(11):1989-94.
84. González del Pino J, Bartolomé del Valle E, Graña GL, Villanova JF. Free vascularized fibular grafts have a high union rate in atrophic nonunions. *Clin Orthop Relat Res.* févr 2004;(419):38-45.
85. Chen CM, Disa JJ, Lee H-Y, Mehrara BJ, Hu Q-Y, Nathan S, et al. Reconstruction of extremity long bone defects after sarcoma resection with vascularized fibula flaps: a 10-year review. *Plast Reconstr Surg.* mars 2007;119(3):915-24; discussion 925-926.
86. Xenakis TH, Malizos KN, Beris AE, Vekris M, Georgoulis AD, Soucacos PN. Vascularised bone grafts in the treatment of long bone defects. *Microsurgery.* 1994;15(7):479-84.
87. Lee KS, Han SB, Baek JR. Free vascularized osteocutaneous fibular graft to the tibia in 51 consecutive cases. *J Reconstr Microsurg.* mai 2004;20(4):277-84.
88. Yazar S, Lin C-H, Wei F-C. One-stage reconstruction of composite bone and soft-tissue defects in traumatic lower extremities. *Plast Reconstr Surg.* nov 2004;114(6):1457-66.
89. Hierner R, Wood MB. Comparison of vascularised iliac crest and vascularised fibula transfer for reconstruction of segmental and partial bone defects in long bones of the lower extremity. *Microsurgery.* 1995;16(12):818-26.
90. Soucacos PN, Kokkalis ZT, Piagkou M, Johnson EO. Vascularized bone grafts for the management of skeletal defects in orthopaedic trauma and reconstructive surgery. *Injury.* janv 2013;44 Suppl 1:S70-75.
91. Korompilias AV, Paschos NK, Lykissas MG, Kostas-Agnantis I, Vekris MD, Beris AE. Recent updates of surgical techniques and applications of free vascularized fibular graft in extremity and trunk reconstruction. *Microsurgery.* mars 2011;31(3):171-5.
92. Malizos KN, Fyllos A, Varytimidis S, Dailiana Z. Tips to secure healing at the free vascularised fibular graft-to-host bone junction. *Injury.* déc 2019;50 Suppl 5:S46-9.
93. Houdek MT, Wagner ER, Bishop AT, Shin AY, Rose PS, Sim FH, et al. Complications and Long-Term Outcomes of Free Fibula Reconstruction following Resection of a Malignant Tumor in the Extremities. *Plast Reconstr Surg.* févr 2017;139(2):510e-9e.
94. Zimmermann CE, Börner BI, Hasse A, Sieg P. Donor site morbidity after microvascular fibula transfer. *Clin Oral Investig.* déc 2001;5(4):214-9.
95. Shpitzer T, Neligan P, Boyd B, Gullane P, Gur E, Freeman J. Leg morbidity and function following fibular free flap harvest. *Ann Plast Surg.* mai 1997;38(5):460-4.
96. DASH score [Internet]. Disponible sur: [http://www.dash.iwh.on.ca/assets/images/pdfs/DASH\\_French.pdf](http://www.dash.iwh.on.ca/assets/images/pdfs/DASH_French.pdf)
97. Ware JE, Sherbourne CD. The MOS 36-item short-form health survey (SF-36). I. Conceptual framework and item selection. *Med Care.* juin 1992;30(6):473-83.

98. Gay A, Louis M-L, Chabaud M, Legré R. Transfert libre microvascularisé de fibula dans la reconstruction de l'extrémité inférieure du radius. *Chirurgie de la Main*. déc 2010;29:S42-8.
99. Babovic S, Johnson CH, Finical SJ. Free fibula donor-site morbidity: the Mayo experience with 100 consecutive harvests. *J Reconstr Microsurg*. févr 2000;16(2):107-10.
100. Pacelli LL, Gillard J, McLoughlin SW, Buehler MJ. A biomechanical analysis of donor-site ankle instability following free fibular graft harvest. *J Bone Joint Surg Am*. avr 2003;85(4):597-603.
101. Wood MB. Free vascularized fibular grafting-25 years' experience: tips, techniques, and pearls. *Orthop Clin North Am*. janv 2007;38(1):1-12, v.
102. Simpson AH. The blood supply of the periosteum. *J Anat*. juin 1985;140 ( Pt 4):697-704.
103. Bibbo C. The Free Fibula Flap for Lower Extremity Reconstruction. *Clin Podiatr Med Surg*. janv 2021;38(1):117-30.
104. Ou Q, Wu P, Zhou Z, Pan D, Tang J-Y. Complication of osteo reconstruction by utilizing free vascularized fibular bone graft. *BMC Surg*. 2 oct 2020;20(1):216.
105. Jones NF, Swartz WM, Mears DC, Jupiter JB, Grossman A. The « double barrel » free vascularized fibular bone graft. *Plast Reconstr Surg*. mars 1988;81(3):378-85.
106. Hou SM, Liu TK. Reconstruction of skeletal defects in the femur with « two-strut » free vascularized fibular grafts. *J Trauma*. déc 1992;33(6):840-5.
107. Chen M-T, Chang M-C, Chen C-M, Chen T-H. Double-strut free vascular fibular grafting for reconstruction of the lower extremities. *Injury*. oct 2003;34(10):763-9.
108. Saint-Cyr M, Farkas J, Gupta A. Double-barrel free fibula flap for treatment of infected nonunion of both forearm bones. *J Reconstr Microsurg*. nov 2008;24(8):583-7.
109. Frary EC, Sandager Petersen S, Skov O, Sørensen JA. Reconstruction of a complicated adjacent non-union of the radius and ulna using a free vascularised double-barrel fibula graft. *BMJ Case Rep*. 11 mai 2016;2016.
110. Cano-Luís P, Andrés-Cano P, Ricón-Recarey FJ, Giráldez-Sánchez MA. Treatment of posttraumatic bone defects of the forearm with vascularized fibular grafts. Follow up after fourteen years. *Injury*. sept 2018;49 Suppl 2:S27-35.
111. Malizos KN, Nunley JA, Goldner RD, Urbaniak JR, Harrelson JM. Free vascularized fibula in traumatic long bone defects and in limb salvaging following tumor resection: comparative study. *Microsurgery*. 1993;14(6):368-74.
112. Claxton MR, Houdek MT, Tibbo ME, Wagner ER, Bakri K, Moran SL. Utility of free vascularized fibular flaps to treat radiation-associated nonunions in the upper extremity. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. avr 2020;73(4):633-7.
113. Feltri P, Solaro L, Errani C, Schiavon G, Candrian C, Filardo G. Vascularized fibular grafts for the treatment of long bone defects: pros and cons. A systematic review and meta-analysis. *Arch Orthop Trauma Surg*. 10 juin 2021;
114. Landau MJ, Badash I, Yin C, Alluri RK, Patel KM. Free vascularized fibula grafting in the operative treatment of malignant bone tumors of the upper extremity: A systematic review of outcomes and complications. *Journal of Surgical Oncology*. 2018;117(7):1432-9.
115. Han CS, Wood MB, Bishop AT, Cooney WP. Vascularized bone transfer. *J Bone Joint Surg Am*. déc 1992;74(10):1441-9.
116. Minami A, Kasashima T, Iwasaki N, Kato H, Kaneda K. Vascularised fibular grafts. An experience of 102 patients. *J Bone Joint Surg Br*. sept 2000;82(7):1022-5.
117. Adani R, Delcroix L, Innocenti M, Marcoccio I, Tarallo L, Celli A, et al. Reconstruction of large posttraumatic skeletal defects of the forearm by vascularized free fibular graft. *Microsurgery*. 2004;24(6):423-9.
118. Safoury Y. Free vascularized fibula for the treatment of traumatic bone defects and nonunion of the forearm bones. *J Hand Surg Br*. févr 2005;30(1):67-72.
119. Gebert C, Hillmann A, Schwappach A, Hoffmann C, Harges J, Kleinheinz J, et al. Free vascularized fibular grafting for reconstruction after tumor resection in the upper extremity. *J Surg Oncol*. 1 août 2006;94(2):114-27.
120. Zhen P, Hu Y-Y, Luo Z-J, Liu X-Y, Lu H, Li X-S. One-stage treatment and reconstruction of Gustilo Type III open tibial shaft fractures with a vascularized fibular osteoseptocutaneous flap graft. *J Orthop Trauma*. déc 2010;24(12):745-51.

121. Hariri A, Mascard E, Atlan F, Germain MA, Heming N, Dubousset JF, et al. Free vascularised fibular graft for reconstruction of defects of the lower limb after resection of tumour. *J Bone Joint Surg Br.* nov 2010;92(11):1574-9.
122. Hilven PH, Bayliss L, Cosker T, Dijkstra PDS, Jutte PC, Lahoda LU, et al. The vascularised fibular graft for limb salvage after bone tumour surgery: a multicentre study. *Bone Joint J.* juin 2015;97-B(6):853-61.
123. Houdek MT, Bayne CO, Bishop AT, Shin AY. The outcome and complications of vascularised fibular grafts. *Bone Joint J.* janv 2017;99-B(1):134-8.
124. Claxton MR, Shirley MB, Bakri K, Rose PS, Moran SL, Houdek MT. Utility of the Free Vascularized Fibula Flap to Reconstruct Oncologic Defects in the Upper Extremity. *Anticancer Res.* mai 2020;40(5):2751-5.
125. Xu L, Wen L, Qiao J, Zhu Z, Qiu Y, Xiong J, et al. Clinical Outcome of Free Vascularized Fibula Graft in the Surgical Treatment of Extremity Osteosarcoma. *Orthop Surg.* juin 2020;12(3):727-33.
126. de Boer HH, Wood MB, Hermans J. Reconstruction of large skeletal defects by vascularized fibula transfer. Factors that influenced the outcome of union in 62 cases. *Int Orthop.* 1990;14(2):121-8.
127. Kamei Y, Aoyama H, Yokoo K, Hayashi Y, Fujii K, Kondo C, et al. Possibility of venous return through bone marrow in the free fibular osteocutaneous flap. *Ann Plast Surg.* oct 2001;47(4):450-2.
128. Chen HC, Tang YB, Noordhoff MS. Bone marrow as a means of venous drainage for a microvascular osteocutaneous flap. *Surgery.* nov 1991;110(5):854-9.
129. el Danaf A, Abou Elseoud A, Alhussein T, Fansa M. Venous drainage through marrow coaptation in free bone transfer: two case reports. *J Reconstr Microsurg.* avr 1986;2(3):165-7, 169.
130. Hanasono MM, Kocak E, Ogunleye O, Hartley CJ, Miller MJ. One versus two venous anastomoses in microvascular free flap surgery. *Plast Reconstr Surg.* nov 2010;126(5):1548-57.
131. Han Z, Li J, Li H, Su M, Qin L. Single versus dual venous anastomoses of the free fibula osteocutaneous flap in mandibular reconstruction: a retrospective study. *Microsurgery.* nov 2013;33(8):652-5.
132. Enajat M, Rozen WM, Whitaker IS, Smit JM, Acosta R. A single center comparison of one versus two venous anastomoses in 564 consecutive DIEP flaps: investigating the effect on venous congestion and flap survival. *Microsurgery.* 2010;30(3):185-91.
133. Ross GL, Ang ESW, Lannon D, Addison P, Golger A, Novak CB, et al. Ten-year experience of free flaps in head and neck surgery. How necessary is a second venous anastomosis? *Head Neck.* août 2008;30(8):1086-9.
134. Whitaker IS, Rozen WM, Chubb D, Acosta R, Kiil BJ, Birke-Sorensen H, et al. Postoperative monitoring of free flaps in autologous breast reconstruction: a multicenter comparison of 398 flaps using clinical monitoring, microdialysis, and the implantable Doppler probe. *J Reconstr Microsurg.* août 2010;26(6):409-16.
135. Tabrizi R, Okhovatpour MA, Hassani M, Rashad A. Comparison of Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT) and implantable Doppler in the monitoring of a vascularised fibular free flap for reconstruction of the mandible. *Br J Oral Maxillofac Surg.* juill 2021;59(6):661-4.
136. Dakpé S, Colin E, Bettoni J, Davrou J, Diouf M, Devauchelle B, et al. Intraosseous microdialysis for bone free flap monitoring in head and neck reconstructive surgery: A prospective pilot study. *Microsurgery.* mars 2020;40(3):315-23.
137. Palestro CJ. Radionuclide imaging after skeletal interventional procedures. *Semin Nucl Med.* janv 1995;25(1):3-14.
138. Hervás I, Floria LM, Bello P, Baquero MC, Pérez R, Barea J, et al. Microvascularized fibular graft for mandibular reconstruction: detection of viability by bone scintigraphy and SPECT. *Clin Nucl Med.* mars 2001;26(3):225-9.
139. Guo Q-F, Xu Z-H, Wen S-F, Liu Q-H, Liu S-H, Wang J-W, et al. Value of a skin island flap as a postoperative predictor of vascularized fibula graft viability in extensive diaphyseal bone defect reconstruction. *Orthop Traumatol Surg Res.* sept 2012;98(5):576-82.
140. Cho BC, Shin DP, Byun JS, Park JW, Baik BS. Monitoring flap for buried free tissue transfer: its importance and reliability. *Plast Reconstr Surg.* oct 2002;110(5):1249-58.
141. Lee KS, Park JW. Free vascularized osteocutaneous fibular graft to the tibia. *Microsurgery.* 1999;19(3):141-7.
142. Arai K, Toh S, Tsubo K, Nishikawa S, Narita S, Miura H. Complications of vascularized fibula graft for reconstruction of long bones. *Plast Reconstr Surg.* juin 2002;109(7):2301-6.
143. Falder S, Sinclair JS, Rogers CA, Townsend PLG. Long-term behaviour of the free vascularised fibula following reconstruction of large bony defects. *Br J Plast Surg.* sept 2003;56(6):571-84.

144. Pollock R, Stalley P, Lee K, Pennington D. Free vascularized fibula grafts in limb-salvage surgery. *J Reconstr Microsurg.* févr 2005;21(2):79-84.
145. Brearley S, Shearman CP, Simms MH. Peripheral pulse palpation: an unreliable physical sign. *Ann R Coll Surg Engl.* mai 1992;74(3):169-71.
146. Collège National des Enseignants de Cardiologie. Chapitre 6: Item 223 – UE 8 – Artériopathie oblitérante de l'aorte, des artères viscérales et des membres inférieurs. In: *Médecine cardio-vasculaire.* Elsevier Masson; 2019.
147. Alolabi N, Dickson L, Coroneos CJ, Farrokhyar F, Levis C. Preoperative Angiography for Free Fibula Flap Harvest: A Meta-Analysis. *J Reconstr Microsurg.* juin 2019;35(5):362-71.
148. Dublin BA, Karp NS, Kasabian AK, Kolker AR, Shah MH. Selective use of preoperative lower extremity arteriography in free flap reconstruction. *Ann Plast Surg.* avr 1997;38(4):404-7.
149. Disa JJ, Cordeiro PG. The current role of preoperative arteriography in free fibula flaps. *Plast Reconstr Surg.* sept 1998;102(4):1083-8.
150. Lutz BS, Wei FC, Ng SH, Chen IH, Chen SH. Routine donor leg angiography before vascularized free fibula transplantation is not necessary: a prospective study in 120 clinical cases. *Plast Reconstr Surg.* janv 1999;103(1):121-7.
151. Garvey PB, Chang EI, Selber JC, Skoracki RJ, Madewell JE, Liu J, et al. A prospective study of preoperative computed tomographic angiographic mapping of free fibula osteocutaneous flaps for head and neck reconstruction. *Plast Reconstr Surg.* oct 2012;130(4):541e-9e.
152. Fowkes FGR, Aboyans V, Fowkes FJI, McDermott MM, Sampson UKA, Criqui MH. Peripheral artery disease: epidemiology and global perspectives. *Nat Rev Cardiol.* mars 2017;14(3):156-70.
153. Collège des Enseignants d'Endocrinologie, Diabète et Maladies Métaboliques. Item 219: Facteurs de risque cardiovasculaire et prévention. In: *Endocrinologie, diabétologie et maladies métaboliques.* 4ème. Elsevier Masson; 2019.
154. Akashi M, Nomura T, Sakakibara S, Sakakibara A, Hashikawa K. Preoperative MR angiography for free fibula osteocutaneous flap transfer. *Microsurgery.* sept 2013;33(6):454-9.
155. Chow LC, Napoli A, Klein MB, Chang J, Rubin GD. Vascular mapping of the leg with multi-detector row CT angiography prior to free-flap transplantation. *Radiology.* oct 2005;237(1):353-60.
156. Lorenz RR, Esclamado R. Preoperative magnetic resonance angiography in fibular-free flap reconstruction of head and neck defects. *Head Neck.* oct 2001;23(10):844-50.
157. Beris AE, Lykissas MG, Korompilias AV, Vekris MD, Mitsionis GI, Malizos KN, et al. Vascularized fibula transfer for lower limb reconstruction. *Microsurgery.* mars 2011;31(3):205-11.
158. Amr SM, El-Mofty AO, Amin SN, Morsy AM, El-Malt OM, Abdel-Aal HA. Reconstruction after resection of tumors around the knee: role of the free vascularized fibular graft. *Microsurgery.* 2000;20(5):233-51.
159. Rose PS, Shin AY, Bishop AT, Moran SL, Sim FH. Vascularized free fibula transfer for oncologic reconstruction of the humerus. *Clin Orthop Relat Res.* sept 2005;438:80-4.
160. Eward WC, Kontogeorgakos V, Levin LS, Brigman BE. Free vascularized fibular graft reconstruction of large skeletal defects after tumor resection. *Clin Orthop Relat Res.* févr 2010;468(2):590-8.
161. Kasashima T, Minami A, Kutsumi K. Late fracture of vascularized fibular grafts. *Microsurgery.* 1998;18(5):337-43.
162. Song H-R, Kale A, Park H-B, Koo K-H, Chae D-J, Oh C-W, et al. Comparison of internal bone transport and vascularized fibular grafting for femoral bone defects. *J Orthop Trauma.* mars 2003;17(3):203-11.
163. Hou SM, Liu TK. Reconstruction of skeletal defects in the femur with « two-strut » free vascularized fibular grafts. *J Trauma.* déc 1992;33(6):840-5.
164. Wei FC, El-Gammal TA, Lin CH, Ueng WN. Free fibula osteoseptocutaneous graft for reconstruction of segmental femoral shaft defects. *J Trauma.* nov 1997;43(5):784-92.
165. Anthony JP, Rawnsley JD, Benhaim P, Ritter EF, Sadowsky SH, Singer MI. Donor leg morbidity and function after fibula free flap mandible reconstruction. *Plast Reconstr Surg.* juill 1995;96(1):146-52.
166. Momoh AO, Yu P, Skoracki RJ, Liu S, Feng L, Hanasono MM. A prospective cohort study of fibula free flap donor-site morbidity in 157 consecutive patients. *Plast Reconstr Surg.* sept 2011;128(3):714-20.
167. Di Giuli R, Zago M, Beltramini GA, Pallotta ML, Bolzoni A, Baj A, et al. Donor-Site Morbidity After Osteocutaneous Free Fibula Transfer: Longitudinal Analysis of Gait Performance. *J Oral Maxillofac Surg.* mars 2019;77(3):648-57.
168. Chou S-W, Liao H-T, Yazar S, Lin C-H, Lin Y-C, Wei F-C. Assessment of fibula osteoseptocutaneous flap donor-site morbidity using balance and gait test. *J Orthop Res.* avr 2009;27(4):555-60.

169. Bodde EWH, de Visser E, Duysens JEJ, Hartman EHM. Donor-site morbidity after free vascularized autogenous fibular transfer: subjective and quantitative analyses. *Plast Reconstr Surg.* juin 2003;111(7):2237-42.
170. Lin J-Y, Djohan R, Dobryansky M, Chou S-W, Hou W-H, Chen M-H, et al. Assessment of donor-site morbidity using balance and gait tests after bilateral fibula osteoseptocutaneous free flap transfer. *Ann Plast Surg.* mars 2009;62(3):246-51.
171. Tang CL, Mahoney JL, McKee MD, Richards RR, Waddell JP, Louie B. Donor site morbidity following vascularized fibular grafting. *Microsurgery.* 1998;18(6):383-6.
172. Ling XF, Peng X, Samman N. Donor-site morbidity of free fibula and DCIA flaps. *J Oral Maxillofac Surg.* sept 2013;71(9):1604-12.
173. Rogers SN, Lakshmiah SR, Narayan B, Lowe D, Brownson P, Brown JS, et al. A comparison of the long-term morbidity following deep circumflex iliac and fibula free flaps for reconstruction following head and neck cancer. *Plast Reconstr Surg.* nov 2003;112(6):1517-25; discussion 1526-1527.
174. Garrett A, Ducic Y, Athre RS, Motley T, Carpenter B. Evaluation of fibula free flap donor site morbidity. *Am J Otolaryngol.* févr 2006;27(1):29-32.
175. Wolff KD, Hölzle F, Kolk A, Hohlweg-Majert B, Steiner T, Kesting MR. Raising the osteocutaneous fibular flap for oral reconstruction with reduced tissue alteration. *J Oral Maxillofac Surg.* juin 2011;69(6):e260-267.
176. Sieg P, Taner C, Hakim SG, Jacobsen H-C. Long-term evaluation of donor site morbidity after free fibula transfer. *Br J Oral Maxillofac Surg.* juin 2010;48(4):267-70.
177. Farhadi J, Valderrabano V, Kunz C, Kern R, Hinterman B, Pierer G. Free fibula donor-site morbidity: clinical and biomechanical analysis. *Ann Plast Surg.* avr 2007;58(4):405-10.
178. Ganel A, Yaffe B. Ankle instability of the donor site following removal of vascularized fibula bone graft. *Ann Plast Surg.* janv 1990;24(1):7-9.
179. Nathan SS, Athanasian E, Boland PJ, Healey JH. Valgus ankle deformity after vascularized fibular reconstruction for oncologic disease. *Ann Surg Oncol.* juill 2009;16(7):1938-45.
180. Lee EH, Goh JC, Helm R, Pho RW. Donor site morbidity following resection of the fibula. *J Bone Joint Surg Br.* janv 1990;72(1):129-31.
181. Nathan SS, Hung-Yi L, Disa JJ, Athanasian E, Boland P, Cordeiro PG, et al. Ankle instability after vascularized fibular harvest for tumor reconstruction. *Ann Surg Oncol.* janv 2005;12(1):57-64.
182. Barla M, Polirsztok E, Peltié E, Jouve J-L, Legré R, Dautel G, et al. Free vascularised fibular flap harvesting in children: An analysis of donor-site morbidity. *Orthop Traumatol Surg Res.* nov 2017;103(7):1109-13.
183. Muramatsu K, Ihara K, Kuwabara Y, Fujii K, Taguchi T. Surgical correction of claw toe deformity following harvesting of fibula flaps. *Ann Plast Surg.* août 2010;65(2):161-3.
184. Takakura Y, Yajima H, Tanaka Y, Komeda T, Tamai S. Treatment of extrinsic flexion deformity of the toes associated with previous removal of a vascularized fibular graft. *J Bone Joint Surg Am.* janv 2000;82(1):58-61.
185. Feuvrier D, Sagawa Y, Béliard S, Pauchot J, Decavel P. Long-term donor-site morbidity after vascularized free fibula flap harvesting: Clinical and gait analysis. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* févr 2016;69(2):262-9.
186. Gaskill TR, Urbaniak JR, Aldridge JM. Free vascularized fibular transfer for femoral head osteonecrosis: donor and graft site morbidity. *J Bone Joint Surg Am.* août 2009;91(8):1861-7.
187. Weiland AJ, Moore JR, Daniel RK. Vascularized bone autografts. Experience with 41 cases. *Clin Orthop Relat Res.* avr 1983;(174):87-95.
188. Allsopp BJ, Hunter-Smith DJ, Rozen WM. Vascularized versus Nonvascularized Bone Grafts: What Is the Evidence? *Clin Orthop Relat Res.* mai 2016;474(5):1319-27.
189. Pederson WC, Person DW. Long bone reconstruction with vascularized bone grafts. *Orthop Clin North Am.* janv 2007;38(1):23-35, v.
190. Li X, Zhang Y, Wan S, Li H, Li D, Xia J, et al. A comparative study between limb-salvage and amputation for treating osteosarcoma. *J Bone Oncol.* mars 2016;5(1):15-21.
191. Traven SA, Brinton DL, Walton ZJ, Leddy LR. A propensity-score matched analysis of limb salvage vs amputation for osteosarcoma. *J Surg Oncol.* déc 2019;120(7):1252-8.
192. Han G, Bi W-Z, Xu M, Jia J-P, Wang Y. Amputation Versus Limb-Salvage Surgery in Patients with Osteosarcoma: A Meta-analysis. *World J Surg.* août 2016;40(8):2016-27.

193. Gaston CL, Nakamura T, Reddy K, Abudu A, Carter S, Jeys L, et al. Is limb salvage surgery safe for bone sarcomas identified after a previous surgical procedure? *Bone Joint J.* mai 2014;96-B(5):665-72.
194. Weber KL. What's new in musculoskeletal oncology. *J Bone Joint Surg Am.* juin 2005;87(6):1400-10.
195. Estrella EP, Wang EHM. A Comparison of Vascularized Free Fibular Flaps and Nonvascularized Fibular Grafts for Reconstruction of Long Bone Defects after Tumor Resection. *J Reconstr Microsurg.* mars 2017;33(3):194-205.
196. Yajima H, Tamai S, Mizumoto S, Inada Y. Vascularized fibular grafts in the treatment of osteomyelitis and infected nonunion. *Clin Orthop Relat Res.* août 1993;(293):256-64.
197. Gilbert A, Brockman R. Congenital pseudarthrosis of the tibia. Long-term followup of 29 cases treated by microvascular bone transfer. *Clin Orthop Relat Res.* mai 1995;(314):37-44.
198. El-Gammal TA, El-Sayed A, Kotb MM, Saleh WR, Ragheb YF, Refai OA, et al. Crawford Type IV Congenital Pseudarthrosis of the Tibia: Treatment With Vascularized Fibular Grafting and Outcome at Skeletal Maturity. *J Pediatr Orthop.* 1 mars 2021;41(3):164-70.
199. El Hage S, Ghanem I, Dagher F, Kharrat K. Free vascularized fibular flap for congenital ulnar pseudarthrosis: a report of two cases and review of the literature. *Ann Plast Surg.* mars 2009;62(3):329-34.
200. Bauer AS, Singh AK, Amanatullah D, Lerman J, James MA. Free vascularized fibular transfer with langenskiöld procedure for the treatment of congenital pseudarthrosis of the forearm. *Tech Hand Up Extrem Surg.* sept 2013;17(3):144-50.
201. Aldridge JM, Berend KR, Gunneson EE, Urbaniak JR. Free vascularized fibular grafting for the treatment of postcollapse osteonecrosis of the femoral head. Surgical technique. *J Bone Joint Surg Am.* mars 2004;86-A Suppl 1:87-101.
202. Korompilias AV, Lykissas MG, Beris AE, Urbaniak JR, Soucacos PN. Vascularised fibular graft in the management of femoral head osteonecrosis: twenty years later. *J Bone Joint Surg Br.* mars 2009;91(3):287-93.
203. Roddy E, DeBaun MR, Daoud-Gray A, Yang YP, Gardner MJ. Treatment of critical-sized bone defects: clinical and tissue engineering perspectives. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* avr 2018;28(3):351-62.
204. Masquelet AC, Fitoussi F, Begue T, Muller GP. [Reconstruction of the long bones by the induced membrane and spongy autograft]. *Ann Chir Plast Esthet.* juin 2000;45(3):346-53.
205. Masquelet AC. La technique de la membrane induite. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique.* 1 sept 2020;106(5):441-3.
206. Mauffrey C, Hake ME, Chadayammuri V, Masquelet A-C. Reconstruction of Long Bone Infections Using the Induced Membrane Technique: Tips and Tricks. *J Orthop Trauma.* juin 2016;30(6):e188-193.
207. Morelli I, Drago L, George DA, Gallazzi E, Scarponi S, Romanò CL. Masquelet technique: myth or reality? A systematic review and meta-analysis. *Injury.* déc 2016;47 Suppl 6:S68-76.
208. Mi M, Papakostidis C, Wu X, Giannoudis PV. Mixed results with the Masquelet technique: A fact or a myth? *Injury.* févr 2020;51(2):132-5.
209. Masquelet AC. Induced Membrane Technique: Pearls and Pitfalls. *J Orthop Trauma.* oct 2017;31 Suppl 5:S36-8.
210. Wen G, Zhou R, Wang Y, Lu S, Chai Y, Yang H. Management of post-traumatic long bone defects: A comparative study based on long-term results. *Injury.* nov 2019;50(11):2070-4.
211. Muscolo DL, Ayerza MA, Aponte-Tinao LA. Massive allograft use in orthopedic oncology. *Orthop Clin North Am.* janv 2006;37(1):65-74.
212. Giannoudis PV, Dinopoulos H, Tsiridis E. Bone substitutes: an update. *Injury.* nov 2005;36 Suppl 3:S20-27.
213. Bus MPA, Dijkstra PDS, van de Sande M a. J, Taminiau AHM, Schreuder HWB, Jutte PC, et al. Intercalary allograft reconstructions following resection of primary bone tumors: a nationwide multicenter study. *J Bone Joint Surg Am.* 19 févr 2014;96(4):e26.
214. Giannini C, Sambri A, Dalla Rosa M, Zucchini R, Bochicchio V, Fiore M, et al. Intercalary bone graft of the tibia: case series and review of the literature. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* déc 2020;30(8):1421-7.
215. Thompson RC, Garg A, Clohisy DR, Cheng EY. Fractures in large-segment allografts. *Clin Orthop Relat Res.* janv 2000;(370):227-35.
216. Frisoni T, Cevolani L, Giorgini A, Dozza B, Donati DM. Factors affecting outcome of massive intercalary bone allografts in the treatment of tumours of the femur. *J Bone Joint Surg Br.* juin 2012;94(6):836-41.
217. Ilizarov GA. The tension-stress effect on the genesis and growth of tissues. Part I. The influence of stability of fixation and soft-tissue preservation. *Clin Orthop Relat Res.* janv 1989;(238):249-81.

218. Ilizarov GA. The tension-stress effect on the genesis and growth of tissues: Part II. The influence of the rate and frequency of distraction. *Clin Orthop Relat Res.* févr 1989;(239):263-85.
219. Bauer B, Bouchard A, Tripon P, Rigal S. Transfert osseux segmentaire ou technique de l'ascenseur-descenseur. In: Le Nen D, Fabre A, Dubrana F, éditeurs. *Réparations tissulaires à la jambe: De l'os... à la peau.* Paris: Springer; 2012. p. 85-94. (Collection Approche pratique en orthopédie — traumatologie).
220. Lin C-C, Chen C-M, Chiu F-Y, Su Y-P, Liu C-L, Chen T-H. Staged protocol for the treatment of chronic tibial shaft osteomyelitis with Ilizarov's technique followed by the application of intramedullary locked nail. *Orthopedics.* déc 2012;35(12):e1769-1774.
221. Aktuglu K, Erol K, Vahabi A. Ilizarov bone transport and treatment of critical-sized tibial bone defects: a narrative review. *J Orthop Traumatol.* 16 avr 2019;20(1):22.
222. Papakostidis C, Bhandari M, Giannoudis PV. Distraction osteogenesis in the treatment of long bone defects of the lower limbs: effectiveness, complications and clinical results; a systematic review and meta-analysis. *Bone Joint J.* déc 2013;95-B(12):1673-80.
223. Borzunov DY, Kolchin SN, Malkova TA. Role of the Ilizarov non-free bone plasty in the management of long bone defects and nonunion: Problems solved and unsolved. *World J Orthop.* 18 juin 2020;11(6):304-18.
224. McKee MD, Yoo D, Schemitsch EH. Health status after Ilizarov reconstruction of post-traumatic lower-limb deformity. *J Bone Joint Surg Br.* mars 1998;80(2):360-4.
225. Yin P, Zhang Q, Mao Z, Li T, Zhang L, Tang P. The treatment of infected tibial nonunion by bone transport using the Ilizarov external fixator and a systematic review of infected tibial nonunion treated by Ilizarov methods. *Acta Orthop Belg.* sept 2014;80(3):426-35.
226. Yin P, Ji Q, Li T, Li J, Li Z, Liu J, et al. A Systematic Review and Meta-Analysis of Ilizarov Methods in the Treatment of Infected Nonunion of Tibia and Femur. *PLoS One.* 2015;10(11):e0141973.
227. Liu K, Cai F, Liu Y, Abulaiti A, Ren P, Yusufu A. Risk factors of ankle osteoarthritis in the treatment of critical bone defects using ilizarov technique. *BMC Musculoskelet Disord.* 9 avr 2021;22(1):339.
228. Capanna R, Campanacci DA, Belot N, Beltrami G, Manfrini M, Innocenti M, et al. A new reconstructive technique for intercalary defects of long bones: the association of massive allograft with vascularized fibular autograft. Long-term results and comparison with alternative techniques. *Orthop Clin North Am.* janv 2007;38(1):51-60, vi.
229. Platz A, Werner CML, Künzi W, Trentz O, Meyer VE. [Reconstruction of posttraumatic bony defects of the lower extremity: callotaxis or free vascularized fibula graft?]. *Handchir Mikrochir Plast Chir.* déc 2004;36(6):397-404.
230. El-Gammal TA, Shiha AE, El-Deen MA, El-Sayed A, Kotb MM, Addosooki AI, et al. Management of traumatic tibial defects using free vascularized fibula or Ilizarov bone transport: a comparative study. *Microsurgery.* 2008;28(5):339-46.
231. Tsuchiya H, Tomita K, Minematsu K, Mori Y, Asada N, Kitano S. Limb salvage using distraction osteogenesis. A classification of the technique. *J Bone Joint Surg Br.* mai 1997;79(3):403-11.
232. Capanna R, Bufalini C, Campanacci M. A new technique for reconstructions of large metadiaphyseal bone defects. *Orthop Traumatol.* 1 sept 1993;2(3):159-77.
233. Bakri K, Stans AA, Mardini S, Moran SL. Combined Massive Allograft and Intramedullary Vascularized Fibula Transfer: The Capanna Technique for Lower-Limb Reconstruction. *Semin Plast Surg.* août 2008;22(3):234-41.
234. Houben RH, Rots M, van den Heuvel SCM, Winters HAH. Combined Massive Allograft and Intramedullary Vascularized Fibula as the Primary Reconstruction Method for Segmental Bone Loss in the Lower Extremity: A Systematic Review and Meta-Analysis. *JBSJ Rev.* août 2019;7(8):e2.
235. Errani C, Ceruso M, Donati DM, Manfrini M. Microsurgical reconstruction with vascularized fibula and massive bone allograft for bone tumors. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology.* 1 févr 2019;29(2):307-11.
236. Combal A, Thuau F, Fouasson-Chailloux A, Arrigoni P-P, Baud'huin M, Duteille F, et al. Preliminary Results of the « Capasquelet » Technique for Managing Femoral Bone Defects-Combining a Masquelet Induced Membrane and Capanna Vascularized Fibula with an Allograft. *J Pers Med.* 9 août 2021;11(8):774.
237. Taylor GI, Townsend P, Corlett R. Superiority of the deep circumflex iliac vessels as the supply for free groin flaps. *Clinical work. Plast Reconstr Surg.* déc 1979;64(6):745-59.
238. Kim H-S, Kim BC, Kim H-J, Kim HJ. Anatomical basis of the deep circumflex iliac artery flap. *J Craniofac Surg.* mars 2013;24(2):605-9.

239. Taylor GI. Reconstruction of the mandible with free composite iliac bone grafts. *Ann Plast Surg.* nov 1982;9(5):361-76.
240. Yoshimatsu H, Iida T, Yamamoto T, Hayashi A. Superficial Circumflex Iliac Artery-Based Iliac Bone Flap Transfer for Reconstruction of Bony Defects. *J Reconstr Microsurg.* nov 2018;34(9):719-28.
241. Escandón JM, Bustos VP, Escandón L, Santamaría E, Gaxiola-García MA, Kushida-Contreras BH, et al. The Versatility of the DCIA Free Flap: A Forgotten Flap? Systematic Review and Meta-Analysis. *J Reconstr Microsurg.* 28 août 2021;
242. Hui KC, Zhang F, Lineaweaver WC, Moon W, Buncke GM, Buncke HJ. Serratus anterior-rib composite flap: anatomic studies and clinical application to hand reconstruction. *Ann Plast Surg.* févr 1999;42(2):132-6.
243. Kitsiou C, Perrot P, Duteille F. La reconstruction des pertes de substance complexes du pied par lambeau libre ostéomusculaire de serratus anterior-côte : à propos de quatre cas. *Annales de Chirurgie Plastique Esthétique.* 1 août 2013;58(4):321-6.
244. Perrot P, Kitsiou C, Yeo S, Lescour V, Duteille F. Le lambeau libre composite costomusculaire de serratus anterior dans le traitement des pertes de substance complexes du membre inférieur : à propos de 20 cas avec 5 ans de recul. *Annales de Chirurgie Plastique Esthétique.* 1 août 2016;61(4):263-9.
245. Lin C-H, Yazar S. Revisiting the serratus anterior rib flap for composite tibial defects. *Plast Reconstr Surg.* déc 2004;114(7):1871-7.
246. Georgescu AV, Ignatiadis I, Ileana M, Irina C, Filip A, Olariu R. Long-term results after muscle-rib flap transfer for reconstruction of composite limb defects. *Microsurgery.* mars 2011;31(3):218-22.
247. Sakai K, Doi K, Kawai S. Free vascularized thin corticoperiosteal graft. *Plast Reconstr Surg.* févr 1991;87(2):290-8.
248. Kakar S, Duymaz A, Steinmann S, Shin AY, Moran SL. Vascularized medial femoral condyle corticoperiosteal flaps for the treatment of recalcitrant humeral nonunions. *Microsurgery.* févr 2011;31(2):85-92.
249. Deng AD, Innocenti M, Arora R, Gabl M, Tang JB. Vascularized Small-Bone Transfers for Fracture Nonunion and Bony Defects. *Clin Plast Surg.* oct 2020;47(4):501-20.
250. Bakri K, Shin AY, Moran SL. The Vascularized Medial Femoral Corticoperiosteal Flap for Reconstruction of Bony Defects within the Upper and Lower Extremities. *Semin Plast Surg.* août 2008;22(3):228-33.
251. Weir JC, Osinga R, Reid A, Roditi G, MacLean AD, Lo SJ. Free vascularised medial femoral condyle periosteal flaps in recalcitrant long bone non-union: a systematic review. *Arch Orthop Trauma Surg.* nov 2020;140(11):1619-31.
252. Malizos KN, Zalavras CG, Soucacos PN, Beris AE, Urbaniak JR. Free vascularized fibular grafts for reconstruction of skeletal defects. *J Am Acad Orthop Surg.* oct 2004;12(5):360-9.
253. Grawe B, Schroeder AJ, Kakazu R, Messer MS. Lateral Collateral Ligament Injury About the Knee: Anatomy, Evaluation, and Management. *J Am Acad Orthop Surg.* 15 mars 2018;26(6):e120-7.
254. Kadi R, De Maeseneer M, Shahabpour M. Variantes de la normale, images-pièges et découvertes fortuites en imagerie par résonance magnétique du genou. *Feuillets de Radiologie.* 1 déc 2016;56(6):387-403.
255. Innocenti M, Delcroix L, Manfrini M, Ceruso M, Capanna R. Vascularized proximal fibular epiphyseal transfer for distal radial reconstruction. *J Bone Joint Surg Am.* sept 2005;87 Suppl 1(Pt 2):237-46.
256. Cutting CB, McCarthy JG. Comparison of residual osseous mass between vascularized and nonvascularized onlay bone transfers. *Plast Reconstr Surg.* nov 1983;72(5):672-5.
257. Burchardt H. The biology of bone graft repair. *Clin Orthop Relat Res.* avr 1983;(174):28-42.
258. Kitaoka HB, Alexander IJ, Adelaar RS, A Nunley J, Myerson MS, Sanders M, et al. Clinical Rating Systems for the Ankle-Hindfoot, Midfoot, Hallux, and Lesser Toes. *Foot Ankle Int.* mars 1997;18(3):187-8.
259. Sullivan T, Smith J, Kermod J, McIver E, Courtemanche DJ. Rating the burn scar. *J Burn Care Rehabil.* juin 1990;11(3):256-60.
260. Klein S, Hage JJ, van der Horst CMAM, Lagerweij M. Ankle-arm index versus angiography for the preassessment of the fibula free flap. *Plast Reconstr Surg.* févr 2003;111(2):735-43.
261. Futran ND, Stack BC, Zachariah AP. Ankle-arm index as a screening examination for fibula free tissue transfer. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* août 1999;108(8):777-80.
262. Golas AR, Levine JP, Ream J, Rodriguez ED. Aberrant Lower Extremity Arterial Anatomy in Microvascular Free Fibula Flap Candidates: Management Algorithm and Case Presentations. *J Craniofac Surg.* nov 2016;27(8):2134-7.

263. Longère B, Fontarensky M, Alfidja A, Vaz M, Dumousset E, Chabrot P. Techniques de radiologie vasculaire diagnostique utilisant les rayons X. EMC - Radiologie et imagerie médicale - principes et techniques - radioprotection. 2016;11(1):1-19 [Article 35-140-A-10].
264. Smith RB, Thomas RD, Funk GF. Fibula free flaps: the role of angiography in patients with abnormal results on preoperative color flow Doppler studies. Arch Otolaryngol Head Neck Surg. juill 2003;129(7):712-5.
265. Hessel SJ, Adams DF, Abrams HL. Complications of angiography. Radiology. févr 1981;138(2):273-81.
266. Klein S, Van Lienden KP, Van't Veer M, Smit JM, Werker PMN. Evaluation of the lower limb vasculature before free fibula flap transfer. A prospective blinded comparison between magnetic resonance angiography and digital subtraction angiography. Microsurgery. oct 2013;33(7):539-44.
267. Alexander JQ, Leos SM, Katz SG. Is duplex ultrasonography an effective single modality for the preoperative evaluation of peripheral vascular disease? Am Surg. déc 2002;68(12):1107-10.
268. Futran ND, Stack BC, Payne LP. Use of color Doppler flow imaging for preoperative assessment in fibular osteoseptocutaneous free tissue transfer. Otolaryngol Head Neck Surg. déc 1997;117(6):660-3.
269. Gomes MER, de Graaff JC, van Gorp JA, Zwiers I, Legemate DA. Interobserver variation in duplex scanning of infrainguinal arterial bypass grafts. Eur J Vasc Endovasc Surg. mars 2003;25(3):224-8.
270. Izaaryene J, Soussan J, Gaubert J, Cassagneau P, Jolibert M, Louis G. Imagerie en coupe dans le diagnostic de la pathologie athéromateuse des vaisseaux des membres inférieurs. EMC - Radiologie et imagerie médicale - cardiovasculaire - thoracique - cervicale. 2013;8(1):1-12 [Article 32-215-A-15].
271. Pacifico MD, Floyd D, Wood SH. Tibial stress fracture as a complication of free-fibula vascularised graft for mandibular reconstruction. Br J Plast Surg. déc 2003;56(8):832-4.
272. Kabadaya MS, Beausang E, Stassen LFA. Stress fracture of the tibia following a vascularised free fibular flap. J Plast Reconstr Aesthet Surg. oct 2008;61(10):e21-23.
273. Emery SE, Heller JG, Petersilge CA, Bolesta MJ, Whitesides TE. Tibial stress fracture after a graft has been obtained from the fibula. A report of five cases. J Bone Joint Surg Am. août 1996;78(8):1248-51.
274. Durst A, Clibbon J, Davis B. Distal tibial fractures are a poorly recognised complication with fibula free flaps. Ann R Coll Surg Engl. sept 2015;97(6):409-13.

**AUTEUR : Nom : BARRY**

**Prénom : Lisa**

**Date de soutenance : 17 septembre 2021**

**Titre de la thèse : Reconstruction osseuse des membres par lambeau libre de fibula :  
Analyse rétrospective de 24 patients.**

**Thèse - Médecine - Lille 2021**

**Cadre de classement : Chirurgie Plastique, Reconstructrice et Esthétique**

**DES : Chirurgie Plastique, Reconstructrice et Esthétique**

**Mots-clés : Fibula vascularisée – Reconstruction osseuse**

**Résumé :**

Introduction : La prise en charge des pertes de substance osseuse étendues des membres est complexe et fait appel à différentes techniques, notamment aux greffes osseuses. Parmi elles, la greffe de fibula vascularisée ou lambeau libre de fibula représente parfois la seule option conservatrice. De nombreuses séries ont été publiées sur le sujet et rapportent des résultats variables. Le but de cette étude était d'analyser la consolidation ainsi que les séquelles du site donneur des lambeaux libres de fibula réalisés par les équipes des CHU de Lille et de Bordeaux.

Matériels et méthodes : Nous avons réalisé une étude prospective bicentrique incluant les patients ayant bénéficié d'un lambeau libre de fibula pour reconstruction osseuse de membre. L'analyse principale portait sur le taux et le délai de consolidation, ainsi que sur les facteurs influençant ces critères. L'analyse secondaire concernait les séquelles du site donneur.

Résultats : Vingt-quatre patients ont été inclus dans l'étude. Le taux de consolidation primaire était de 66.7% dans un délai médian de 9.5 mois. Le taux de consolidation secondaire était de 79.2%. Nous avons mis en évidence une différence significative du taux de consolidation en fonction de l'étiologie de la perte de substance ( $p=0.027$ ), ainsi que du délai de consolidation en fonction de l'âge ( $p=0.007$ ). Dix-neuf patients ont été revus pour examen clinique du site donneur. On objectivait une boiterie dans 42% des cas, une limitation de mobilité de la cheville dans 21% des cas, et une instabilité subjective de cheville dans 32% des cas. La satisfaction globale des patients était de 8.1/10.

Conclusion : Le lambeau libre de fibula est une solution de reconstruction fiable avec des taux de consolidation élevés, et des séquelles fréquentes mais souvent bien tolérées au niveau du site donneur. La réalisation d'une imagerie vasculaire préopératoire par angioscanner est primordiale et la technique de prélèvement et de mise en place du greffon doit être maîtrisée. Des études complémentaires sont nécessaires pour améliorer la surveillance post-opératoire et clarifier la place de la fibula dans l'arsenal thérapeutique de reconstruction osseuse.

La décision de reconstruction est dans tous les cas adaptée à chaque cas et doit s'intégrer dans une prise en charge globale du patient au sein d'une équipe d'ortho-plastique.

**Composition du Jury :**

**Présidente : Madame le Pr. Véronique DUQUENNOY-MARTINOT**

**Assesseurs : Pr. Christophe CHANTELOT, Dr. Alexandra ERBLAND**

**Directrices de thèse : Dr. Elvire GUERRE, Dr. Louise PASQUESOONE**