



UNIVERSITÉ DE LILLE

FACULTÉ DE MÉDECINE HENRI WAREMBOURG

Année : 2021

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT

DE DOCTEUR EN MÉDECINE

**Comparaison de la reconstruction de membre par lambeau libre de
fibula vascularisée versus membrane induite, à propos de 54 cas
pédiatriques sur 16 ans**

Présentée et soutenue publiquement le 3 décembre 2021 à 18h au
Pôle Recherche

par Louise VANDEWALLE

JURY

Président :

Madame le Professeur Véronique DUQUENNOY-MARTINOT

Assesseurs :

Monsieur le Professeur Federico Canavese

Monsieur le Professeur Antoine Hamel

Madame le Docteur Aurélie Mézel

Directeur de thèse :

Monsieur le Professeur Franck Duteille

AVERTISSEMENT

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

DÉCLARATION DE NON-PLAGIAT

J'atteste sur l'honneur que tout contenu qui n'est pas explicitement présenté comme une citation est un contenu personnel et original.

DÉCLARATION PUBLIQUE D'INTÉRÊT

Je certifie ne pas avoir d'intérêt direct ou indirect avec un organisme privé, industriel ou commercial en relation avec le sujet présenté.

ABRÉVIATIONS

PMMA poly méthyl méthacrylate

NF1 neurofibromatose de type 1

CPT pseudarthrose congénitale du tibia

IRM imagerie par résonance magnétique

NR non réalisable

ILM inégalité de longueur des membres

PDS Perte de substance

MSTS Musculoskeletal Tumor Society

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	13
I. Généralités	13
II. Le lambeau libre de fibula vascularisée	14
1. Histoire	14
2. La microchirurgie chez l'enfant	15
3. Anatomie et vascularisation	17
III. La technique de membrane induite	20
1. Histoire	20
2. Principes chirurgicaux	22
IV. Autres techniques de reconstruction de membre chez l'enfant	24
1. Greffe osseuse	24
2. Technique d'Ilizarov	24
3. Allogreffes	25
4. Protéines ostéoinductrices	27
5. Greffe de périoste	28
6. Électrostimulation	29
V. Amputation et chirurgie prothétique	29
VI. Étiologies des pertes de substance osseuses chez l'enfant	31
1. Les tumeurs osseuses	31
2. La pseudarthrose congénitale	35
3. Autres étiologies	39
VII. Objectifs de l'étude	39
MATÉRIEL ET MÉTHODES	41
I. Recueil de données	41
II. Méthodes d'évaluation et variables analysées	42
III. Techniques opératoires	45
1. La fibula vascularisée	45
2. La membrane induite	49
IV. Analyse statistique	51
RÉSULTATS	53
I. Données démographiques	53
II. Analyse des variables opératoires	57
III. Complications	61
1. Complications péri-opératoires	61
2. Complications tardives	63
IV. Résultats fonctionnels	67
1. Consolidation	67
2. Hypertrophie fibulaire	69
3. Délai d'appui	69

4. Inégalité de longueur	70
5. Autres résultats	71
V. Synthèse des résultats	73
DISCUSSION	75
I. Étiologies	75
II. Gestion du péri opératoire	78
III. Résultats	81
1. Temps et qualité de consolidation	81
2. Reprise de l'appui	87
3. Inégalité de longueur des membres	88
4. Séquelles du site donneur	89
5. Hypertrophie fibulaire et fractures	92
6. Score fonctionnel	93
7. Autres résultats	93
CAS CLINIQUES	96
	99
CONCLUSION	102
BIBLIOGRAPHIE	104
ANNEXES	117

INTRODUCTION

I. Généralités

La reconstruction de membres chez l'enfant et en particulier la reconstruction osseuse, est un défi pour les chirurgiens. En effet, les techniques chirurgicales décrites sont nombreuses et complexes et l'enjeu fonctionnel est de taille. Historiquement, dans la prise en charge des tumeurs de membres, l'amputation dominait l'arsenal thérapeutique, mais peu à peu, le sauvetage de membre a montré sa supériorité en termes de qualité de vie et de récupération fonctionnelle, sans augmenter le taux de récurrence des tumeurs, ou diminuer le pourcentage de survie (1–7).

Parmi les techniques de reconstruction osseuse, on distingue le transfert de fibula vascularisée, la technique de membrane induite, la technique d'Illizarov, l'autogreffe osseuse, l'allogreffe, la chirurgie prothétique ... Ces techniques sont à adapter selon le patient, l'étiologie et la taille de la perte de substance, les traitements associés, pour minimiser les complications et conserver le potentiel de croissance de l'enfant (8–16). Au-delà d'une taille critique, de l'ordre de 5cm, l'autogreffe simple d'os spongieux devient une technique non recommandée, en raison de la résorption importante et du retard de consolidation chez l'adulte (17,18).

Depuis les années 1970, l'utilisation du lambeau libre de fibula vascularisée a permis une avancée dans la reconstruction osseuse, permettant une bonne intégration, une ostéogénèse, une stabilité et la possibilité de résister aux infections, à la radiothérapie et à la chimiothérapie, grâce à l'apport sanguin (19).

La technique de membrane induite, décrite par le Pr Alain Masquelet dans les années 1980 puis développée plus précisément à partir des années 2000, a permis également une avancée dans les méthodes de reconstruction osseuse (20).

Les étiologies de perte de substance osseuse chez l'enfant sont nombreuses et complexes à traiter, afin de restaurer une fonction, la meilleure possible et en évitant les complications potentielles liées aux différentes chirurgies et pathologies (9,21). On distingue les tumeurs osseuses, malignes ou bénignes, les pseudarthroses congénitales, les traumatismes et les causes infectieuses.

II. Le lambeau libre de fibula vascularisée

1. Histoire

L'utilisation d'une fibula pour reconstruire une perte de substance osseuse a été pour la première fois évoquée par Huntington en 1905, dans le cadre d'une reconstruction tibiale. Il s'agissait d'une greffe osseuse, non vascularisée. L'hypertrophie n'avait pas été constatée à cette époque. Le premier transfert microvascularisé de fibula date du 1^{er} juin 1975 et a été réalisé par Taylor, dans un contexte post traumatique (22). Le premier lambeau libre de fibula vascularisée dans un contexte tumoral revient à McKee en 1978 (23).

La technique chirurgicale décrite par Taylor, qui utilisait une voie postérieure par la fossette poplitée, a été modifiée par Gilbert en 1979, qui décrit une voie d'abord externe, utilisée de nos jours (24). Les variantes du prélèvements sont par la suite étudiées et un prélèvement de soléaire associé est décrit par Baudet en 1982 et le lambeau ostéo-cutané, par Chen et Yan en 1983 (25).

Cette technique de reconstruction gagne en popularité au fur et à mesure des années, dans la mesure où elle permet une préservation du membre pathologique, alors que l'amputation était de mise auparavant. De plus, les pertes de substances osseuses étant souvent de grande taille, la fibula permet de combler ces dernières. Il s'agit d'un os fin et étroit, il permet donc de reconstruire des pertes de substance osseuse du membre supérieur, ainsi que du membre inférieur. En outre, l'apport d'un os vascularisé a pour intérêt de limiter le risque infectieux, de garder la possibilité de réaliser une radiothérapie, de conserver le potentiel de croissance de l'os, tout en limitant les séquelles du site donneur. De plus, une hypertrophie fibulaire est constatée lors des reconstructions du membre inférieur par un mécanisme de transfert de pression, de micro-fractures et de formation de cal osseux. En revanche, des fractures du greffon sont tout de même observées, mais évoluent vers une consolidation. Jones en 1988 décrit une technique de fibula vascularisée en double barre, afin d'obtenir une meilleure solidité pour les reconstructions fémorales (26). Capanna en 1988 décrit donc le concept du lambeau libre de fibula, couplé à une allogreffe non vascularisée, qui apporte une structure importante à la fibula et grâce à ses propriétés ostéoinductrices, cette dernière limite les complications de l'os non vascularisé de cadavre (27).

2. La microchirurgie chez l'enfant

Les transferts chirurgicaux micro vascularisés sont largement utilisés en reconstruction chez l'adulte et chez l'enfant depuis de nombreuses années. En effet, bien que les premières indications étaient décrites chez les adultes, le premier lambeau micro vascularisé chez l'enfant date de 1975 (28). Par la suite, de nombreuses séries sont publiées dans la littérature, renforçant la fiabilité de cette technique chez l'enfant, mais également révélant peu de séquelles du site donneur, ce qui était un argument initialement contre. (29–34)

De nos jours, l'arsenal thérapeutique en reconstruction est divers et des techniques simples peuvent entrer en concurrence avec les lambeaux libre. Cependant, ce dernier garde tout de même des applications cliniques, autant chez l'adulte que chez l'enfant.

La microchirurgie, chez l'adulte comme chez l'enfant, requiert une expertise et une formation rigoureuse du chirurgien. La particularité des vaisseaux de l'enfant, mis à part leur taille qui est à l'évidence inférieure, est leur capacité à se spasmer, ce qui peut compromettre la réussite de l'intervention. Afin de prévenir cet événement, l'utilisation d'un fort grossissement, d'instruments de microchirurgie et de substances vasoplégiques (papavérine ou xylocaïne) sont fortement recommandés. De plus, un bloc plexique préalable peut permettre d'accentuer et de prolonger la vasoplégie (35).

Malgré ces difficultés techniques notables chez l'enfant, ce dernier possède un système vasculaire sain et dénué de pathologies athéromateuses. Ce système circulatoire de qualité explique le haut taux de réussite des transplantations chez l'enfant. En 1996, la série de Serletti et al. concernait 20 transferts microvascularisés chez 19 enfants entre 3 et 17 ans. Ils recensent 100% de succès des lambeaux et aucune anomalie de croissance au niveau du site donneur (29). Upton et al. publient une série de 433 cas de transferts microvascularisés pédiatriques, entre 4 mois et 16 ans. Ils constataient 99,8% de succès, avec 9% de complications (30). Organek et al. en 2006 publient une série de 34 cas de transferts libres tissulaires au membre inférieur, chez 32 enfants entre 3 et 19 ans. La survie du lambeau était chiffrée à 85,3%, avec une perte partielle de 8,8% et complète de 5,9%. (32).

Pour finir, il faut garder en mémoire que l'enfant n'est pas un adulte en miniature et qu'il s'agit d'un être en croissance. C'est pourquoi une attention particulière doit être portée sur le cartilage de croissance, afin de préserver au mieux sa capacité à grandir. Cette

particularité ajoute une difficulté technique lors de la reconstruction des membres chez l'enfant.

3. Anatomie et vascularisation

La fibula est un os non portant du membre inférieur, ce qui permet son utilisation en reconstruction osseuse, sans provoquer de séquelles majeures du site donneur.

Sur une coupe transversale de la jambe passant par la jonction du 1/3 supérieur et du 1/3 moyen, on observe les trois loges : antérieure, postérieure, et latérale (figure 1). La loge latérale contient les muscles fibulaires et le nerf fibulaire commun entre dans la partie supérieure de cette loge après avoir quitté le creux poplité, en croisant la portion proximale du gastrocnémien latéral et contournant la tête fibulaire, où il se divise en nerf fibulaire superficiel et profond.

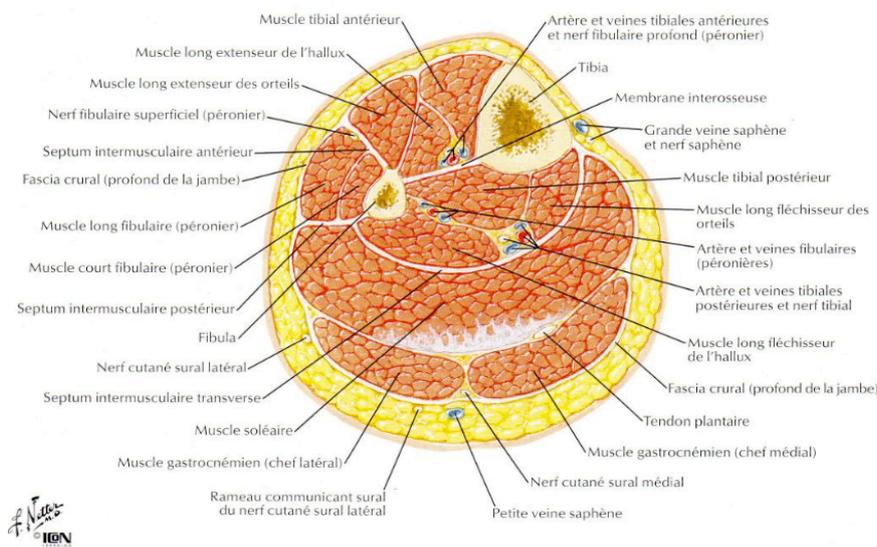


Figure 1 : Coupe transversale à la jonction 1/3 supérieur 1/3 moyen de la jambe

Au niveau de la jambe, les muscles sont séparés en muscles superficiels et profonds par le fascia transverse. Le muscle tibial postérieur est en arrière de la membrane interosseuse et l'artère fibulaire chemine en arrière de ce dernier, proche de la crête médiale de la fibula. Les vaisseaux tibiaux postérieurs et le nerf tibial postérieur sont situés plus en médial, au

dos du tibia. La face postérieure de la fibula possède les insertions du muscle soléaire et en distal, celles du long fléchisseurs de l'hallux (Annexe 1).

Le tronc tibiofibulaire prend naissance au niveau de l'anneau soléaire, c'est la bifurcation dorsale de l'artère poplitée. Il descend verticalement dans la loge dorsale de la jambe et se termine à 5 cm au-dessous de l'anneau du muscle soléaire par deux branches : l'artère tibiale postérieure et l'artère fibulaire. Cette dernière suit la fibula et donne des branches segmentaires musculaires qui passent autour de la fibula (figure 2).

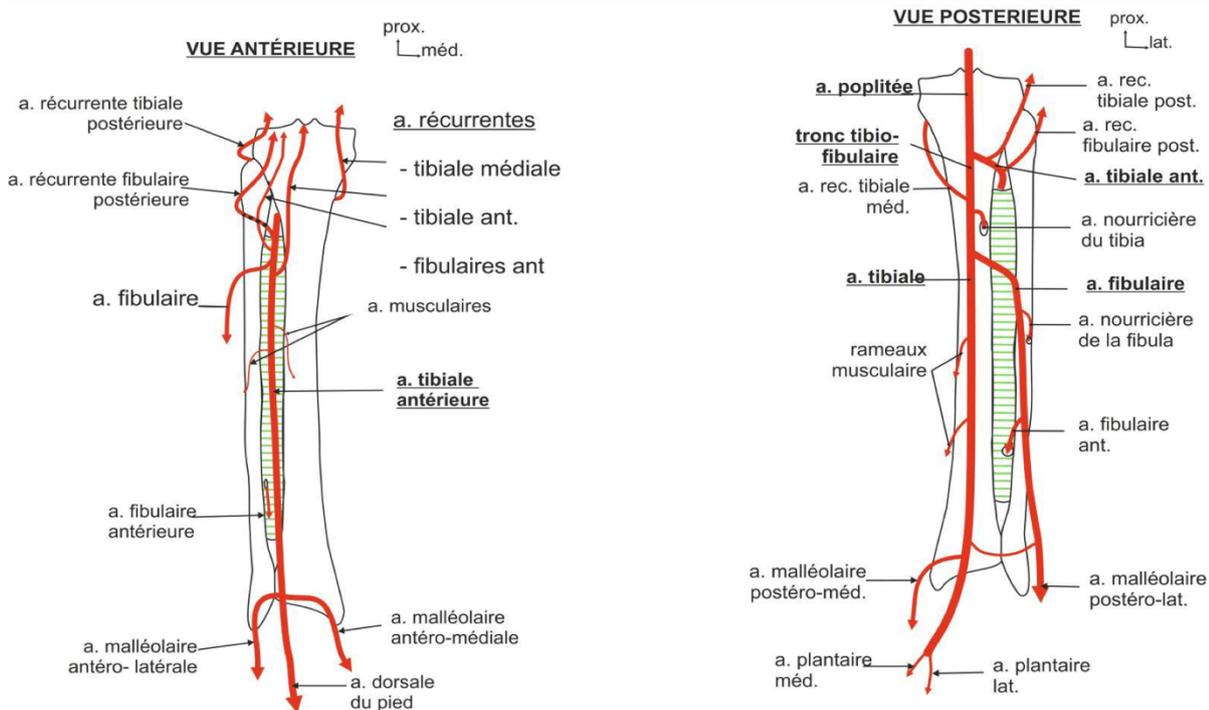


Figure 2 : Vascularisation de la jambe

La fibula est vascularisée par l'artère fibulaire et le vaisseau nutritif pénètre l'os en proximal par rapport au milieu de la diaphyse fibulaire, d'après Taylor. Il existe quatre à huit perforantes de l'os, au niveau du 1/3 moyen et distal de la fibula. En distal, les perforantes sont volontiers septo-cutanées, tandis qu'au niveau du 1/3 moyen de la fibula, elles sont usuellement musculo-cutanées, en perforant le soléaire et le long fléchisseur de l'hallux. La vascularisation veineuse suit de façon parallèle la vascularisation artérielle fibulaire. Le

diamètre des artères est de 1,5mm à 2,5mm, tandis que celui des veines est de 2 à 4mm, chez l'adulte (36).

Le périoste participe également à la vascularisation osseuse. L'épiphyse est vascularisée par une branche de l'artère tibiale antérieure récurrente. En ce qui concerne le retour veineux, celui-ci est facilité si une tranche musculaire est prélevée avec la fibula (du long fléchisseur de l'hallux ou du tibial postérieur). L'artère fibulaire prélevée peut servir de pontage vasculaire lorsqu'il existe une perte de substance d'un axe vasculaire artériel au niveau du site receveur.

Afin de mener au mieux l'intervention, et de faciliter le prélèvement, l'étude de l'emplacement du foramen nutritif de la fibula a été décrite par Guo en 1981, sur 295 pièces anatomiques provenant d'amputations. Il retrouve 66,4% des foramen au niveau du 1/3 supérieur, 15% au niveau du 1/3 moyen et 13,5% du 1/3 inférieur. Dix fibula présentaient deux foramens et cinq n'en avaient aucun. Cependant il existe de nombreux foramens accessoires le long de la fibula, où les artères perforantes musculaires de l'artère fibulaire pénètrent à travers le périoste et permettent donc de compenser la vascularisation lorsqu'aucun foramen nutritif principal n'est retrouvé (37) (figure 3). Ces résultats diffèrent par rapport aux travaux de O'Brien qui retrouve le foramen nutritif au milieu de la diaphyse fibulaire (38) et de Taylor, qui le retrouve en proximal du milieu diaphysaire.

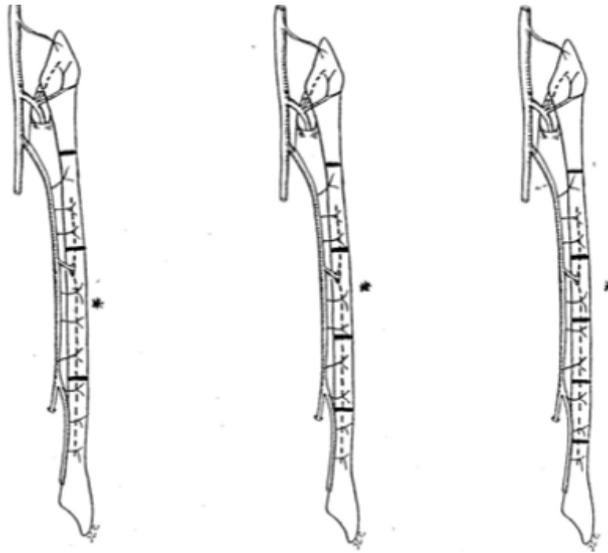


Figure 3 : Différentes ostéotomies fibulaires selon Cariou et al.

4 artères fibulaires, 11 artères nourricières, 10 artères périostées, 2 artères tibiales antérieures
différentes ostéotomies possibles de la fibula. * segment osseux bénéficiant de la double vascularisation.

III. La technique de membrane induite

1. Histoire

Cette technique chirurgicale a été décrite par le Pr Alain Masquelet pour la première fois en 1992, illustrée par une courte série de cas. Cette chirurgie en deux étapes a débuté par l'application de ciment acrylique après résection en bloc de pseudarthroses septiques post-traumatiques de jambes, dans le but de préserver l'espace afin de réaliser une reconstruction osseuse dans un deuxième temps. Cette deuxième étape avait lieu 2 ou 3 mois après la première, après contrôle de l'infection locale et consistait en le retrait de l'entretoise de ciment, puis comblement de la cavité avec de l'autogreffe osseuse spongieuse prélevée au dépend des crêtes iliaques.

De façon contemporaine à cette communication, une équipe allemande réalisait la même technique de mise en place de ciment, puis d'autogreffe spongieuse, mais leurs résultats s'étaient avérés peu probants, avec résorption des greffes pour des pertes de substance de grande taille. Cette équipe réséquait entièrement la membrane induite lors de la greffe.

Le rôle crucial de la membrane induite a donc été mis en évidence et confirmé par une première étude préclinique sur le mouton. Après création d'une perte de substance osseuse diaphysaire et mise en place de ciment dans la cavité créée, plusieurs groupes ont été constitués : le groupe A avec préservation de la membrane induite, le groupe B pour lequel la membrane induite était réséquée, le groupe C pour lequel la membrane était laissée en place sans greffe et le groupe D pour lequel la membrane était réséquée aucune greffe n'était réalisée. L'autogreffe d'os spongieux se résorbait dans le groupe B, tandis qu'une consolidation était observée dans le groupe A. Pour les groupes C et D, aucune consolidation n'était constatée. (39)

Par la suite, l'étude de la composition de la membrane induite a été menée. Pelissier et al. utilisèrent des techniques histologiques et immunohistochimiques à partir de prélèvements de membrane induite chez les lapins. Ils retrouvaient lors de l'analyse histologique un tissu richement vascularisé. En immunohistochimie, ils mirent en évidence la présence de facteur de croissance comme le VEGF (vascular endothelial growth factor) ou le TGF (transforming growth factor) ainsi qu'une protéine ostéoinductrice, la BMP-2 (bone morphogenic protein-2). De plus, ils remarquèrent que le taux maximum de BMP-2 était signalé à 4 semaines après la mise en place du ciment. (40)

Ces constatations ont fait l'objet de multiples études précliniques et cliniques, qui confirment les résultats initiaux. (41)

De nos jours, la membrane induite a fait ses preuves en matière de reconstruction osseuse. Elle est clairement décrite comme une membrane pseudo-synoviale, très vascularisée, permettant la revascularisation de l'autogreffe et limitant la résorption de cette dernière pour les pertes de substance osseuse de grande taille, de plus de 5cm. (40,42–46)

2. Principes chirurgicaux

En 2019, le Professeur Masquelet publie un article afin de mener au mieux l'intervention (47).

Concernent le premier temps :

- Si une infection réside au niveau du site opératoire, elle doit être complètement éradiquée afin d'éviter une progression de cette dernière lors du second temps
- Des prélèvements doivent être effectués pour analyse bactériologique
- Chaque extrémité osseuse doit être recouverte par le ciment, d'au moins 1 cm, pour faciliter la formation de la membrane induite dans la cavité. Le ciment peut également être légèrement invaginé dans le canal médullaire pour améliorer la stabilité si l'immobilisation est réalisée par un fixateur externe. On peut également prévenir un déplacement secondaire du ciment grâce à une broche de Kirschner de 2mm en intramédullaire.
- Durant la consolidation du ciment en poly méthyl méthacrylate, les parties molles des alentours doivent être protégées. En effet, l'échauffement du ciment durant la solidification est important et une irrigation par du sérum est nécessaire.
- Si des antibiotiques sont ajoutés au ciment, la préparation du ciment doit être réalisée de façon particulière, afin de maximiser sa porosité.
- Un protocole de soins minutieux doit être mis en place si la fixation est assurée par un dispositif externe (fixateur externe), afin de limiter le risque d'infection du site opératoire.
- La reconstruction des tissus mous environnant doit être optimale et appropriée pour fournir une enveloppe saine et bien vascularisée autour de la membrane en formation.
- Une surveillance clinique et biologique est nécessaire pour traquer l'infection locale.

Concernant le deuxième temps :

- Si le patient présente une infection chronique, l'antibiothérapie doit être retardée jusqu'à obtention des résultats bactériologiques pour éviter de créer des résistances et pour cibler les germes en cause.
- L'approche chirurgicale de la membrane induite doit être minutieuse afin de ne pas toucher à son intégrité ou à sa vascularisation. Après la greffe, la suture de la membrane doit être effectuée sans tension.
- Les extrémités osseuses doivent être avivées afin de faciliter la prise de greffe. De plus, un alésage minime du canal médullaire est utile pour favoriser la communication entre la greffe et l'endoste.
- La greffe ne doit pas être impactée.
- Une fixation adéquate et définitive doit être réalisée dans ce temps opératoire pour favoriser la consolidation.
- Si la voie d'abord médiale ne peut être envisagée à cause de cicatrices extensives au niveau antérieur ou médial du tibia, une greffe inter-tibiofibulaire peut permettre un pont vers le défaut tibial. Un « spacer » en ciment peut être donc placé dans le compartiment postérieur profond de la jambe, afin de préparer la greffe. (48)
- Lorsqu'une déformation en varus est prévisible dans certains types de reconstruction, surtout celles au niveau du fémur, une fibula non vascularisée peut être placée en médial de la perte de substance, à l'extérieur de la membrane, pour contre balancer les forces.

IV. Autres techniques de reconstruction de membre chez l'enfant

1. Greffe osseuse

La greffe osseuse simple peut être envisagée dans le cadre des pertes de substance osseuse de petite taille. Les autogreffes utilisées dans les reconstruction sont les greffes spongieuses, qui se revascularisent plus rapidement et complètement, en comparaison avec les greffes d'os cortical (49). Généralement, la taille maximum tolérée pour réaliser une autogreffe d'os spongieux est de 4 à 5 cm chez l'adulte (50). Weiland et al. recommandent d'utiliser un transfert libre osseux pour les pertes de substance supérieures ou égales à 6-8cm, chez l'adulte (18).

La greffe osseuse cortico spongieuse présente des propriétés ostéoinductrices, ostéogéniques, ostéoconductrice. Cependant, son incorporation au sein d'une perte de substance dépend du type de greffe, du site receveur, du type de fixation et de la qualité du transplant. (51,52).

2. Technique d'Illizarov

La technique d'Illizarov a été décrite par lui-même dans les années 1950. Elle consiste en la mise en place d'un fixateur externe circulaire et la distraction progressive d'un foyer de corticotomie ou de pseudarthrose permet une ostéogénèse, sans utiliser la greffe osseuse. Les indications premières de cette technique étaient les malformations ainsi que les fractures, mais cette dernière a été largement décrite dans le contexte de pertes de substances osseuses et d'allongements. (55)

Cette technique peut être envisagée dans le cadre de pertes de substances osseuses de petites tailles, inférieures à 8cm en théorie. Cependant, elle présente de nombreux

inconvenients : il s'agit d'un traitement long et encombrant et le risque d'infection de fiches ou de broches n'est pas négligeable, surtout chez les patients traités par chimiothérapie (56).

Notamment dans le traitement des pseudarthroses congénitales de tibia, les équipes de Paley et al. et de Boero et al. utilisèrent cette technique. On retrouve une meilleure consolidation chez les patients âgés de plus de 5 ans et il existe une consolidation chez 66,7% et 94% respectivement lors de la première intervention (57,58). L'un des avantages de cette technique est sa capacité à pouvoir corriger un défaut d'axe.

Enfin, le cadre des pseudarthroses septiques, une revue systématique de la littérature en 2015, les résultats montrent un faible taux de mauvaise consolidation et peu d'anomalies fonctionnelles (59).

3. Allogreffes

L'allogreffe, comme son nom l'indique, correspond à un os de banque, non vascularisé provenant d'un cadavre et Cryo préservé. Depuis les années 1970, les reconstructions massives sont décrites.

Étant donné l'absence de vascularisation, cet os est sensible aux infections, à la résorption massive, à la non-consolidation et aux fractures. Certaines équipes ont cependant décrit des séries de reconstruction massive de pertes de substances osseuses avec cette technique, notamment Mankin, qui décrit une large série de cas et retrouve 10% d'infections à 1 an et 19% de fractures à 3 ans (60). En effet, l'absence d'apport sanguin entraîne un défaut de cellules ostéogénique, limitant leur pouvoir immunologique. La consolidation de

ces dernières est lente, superficielle et incomplète, étant donné que seuls 2 à 3 mm distaux sont colonisés par des cellules osseuses vivantes.

Afin de contrecarrer les complications liées à l'allogreffe et son absence de vascularisation, tout en conservant l'avantage principal de l'allogreffe massive qui est de reconstruire un defect volumineux, Capanna décrit en 1988 une technique qui associe la fibula vascularisée et l'allogreffe massive. Les premiers résultats cliniques sortent en 1989 et 1991. La technique définitive est publiée en 1993 (27). Le but est donc d'utiliser les propriétés ostéogéniques de la fibula pour permettre une consolidation primaire, le tout supporté par la structure de l'allogreffe.

La technique chirurgicale associe donc le prélèvement d'un lambeau libre de fibula vascularisé, qui est enchâssé dans le canal intramédullaire de l'allogreffe, ce qui procure une stabilité aux greffons. Une ostéosynthèse est toutefois nécessaire pour renforcer la fixation (27,61). La fibula vascularisée, avec son pouvoir ostéogénique, permet donc de limiter le taux d'infections, de pseudarthroses et de fractures.

L'équipe de Moran et al. Décrit une série de sauvetage de membres utilisant la technique de Capanna, chez l'enfant et l'adolescent, dans le contexte de chirurgie tumorale. Sur 7 patients, toutes les interventions étaient un succès, et 2 patients nécessitèrent une autogreffe spongieuse pour traiter une pseudarthrose. Le temps de consolidation était de 9 mois en moyenne et aucune fracture ni infection n'étaient constatées (62).

En 2010, Jager et al. étudièrent une série de 7 cas pédiatriques présentant une tumeur osseuse, opérés d'une reconstruction osseuse selon Capanna. Ils retrouvèrent une consolidation dans 85,7% après le premier temps opératoire, en moyenne 7 mois après la chirurgie (63).

4. Protéines ostéoinductrices

Avec l'essor de la régénération tissulaire, l'idée de produire des protéines inductrices de l'os a été décrite dans le but d'améliorer la consolidation osseuse et de limiter les complications. Les BMP ou bone morphogenic protein appartiennent à la famille des facteurs de croissance, en particulier en agissant sur l'ostéogenèse (64). Elles ont été identifiées dans les années 90 et ont permis de comprendre le processus de formation et de consolidation osseuse.

Viateau en 2007 effectue une étude comparative sur les moutons, entre l'utilisation de particules d'os obtenues par expansion in vitro de cellules souches mésenchymateuses osseuses positionnées sur des granules et l'autogreffe spongieuse classique. Il ne retrouve pas de différence au niveau de la quantité d'os formée (65).

Par la suite, l'équipe de Lee se penche sur le traitement d'une pseudarthrose congénitale de tibia par la protéine recombinante humaine RhBMP-7. Leurs résultats montrent que les protéines recombinantes seules ne peuvent être utilisées pour permettre une consolidation de l'os pathologique présent en cas de pseudarthrose congénitale (66). En 2007, un essai clinique français étudiait l'action du RhBMP-2 pour traitement de pseudarthrose du tibia. Cependant, deux cas de sarcomes sont survenus, ce qui a stoppé l'essai. Cet essai remet en question l'innocuité des BMP.

Aujourd'hui deux études cliniques ont permis la mise sur le marché de protéines recombinantes de l'os : RhBMP-2 (Inductos®) (67) et RhBMP-7 (Osigraft®) (68). Les indications d'utilisation de ces protéines dans ces études se limitent aux fractures, à la pseudarthrose dans les suites d'une fracture des os long et aux arthrodèses rachidiennes.

Enfin en 2015, Bosemark étudie chez les rats, la capacité de consolidation d'une reconstruction osseuse par la technique de membrane induite, sans autogreffe, en

associant un scaffold en hydroxyapatite et tricalcium phosphate seul, ou combiné avec des BMP-7, et/ou des biphosphonates par voie systémique. Il retrouve dans le groupe combinant les biphosphonates, le scaffold et les BMP-7, une meilleure minéralisation osseuse et une meilleure épaisseur d'os formée. Cette technique pourrait permettre d'améliorer la reconstruction osseuse par membrane induite et de limiter les complications comme la non-consolidation (69).

5. Greffe de périoste

Dans la mesure où le périoste procure à l'os une grande partie de sa vascularisation et possédant des propriétés ostéoinductrices (70), Codivilla propose en 1906 des greffes ostéopériostées (71).

De plus, la physiopathologie des pseudarthroses congénitales est suggérée comme étant liée à une anomalie du périoste. Deux équipes décrivent la greffe de périoste dans le traitement des pseudarthroses congénitales du tibia (72,73). Ahmed et al. procèdent donc à l'excision du périoste et de l'os pathologique largement, puis une greffe périostée libre, une greffe osseuse et un clou centromédullaire combiné à un fixateur externe selon Ilizarov assurent la reconstruction de la perte de substance. Cette technique permettrait de limiter le nombre de fracture et de non-consolidation. Cette équipe ajoute également des BMP afin d'améliorer la consolidation au niveau du site de pseudarthrose (73).

Récemment en 2018, Gallardo-Calero étudie chez le rat : l'efficacité d'un lambeau périosté vascularisé pour améliorer la consolidation au niveau de la jonction entre une allogreffe et l'os hôte, la capacité du lambeau périosté à revasculariser l'allogreffe et enfin il étudie le type d'ossification engendrée par le lambeau périosté. Il retrouve effectivement une meilleure consolidation entre l'allogreffe et l'os hôte avec le lambeau et une

revascularisation de l'allogreffe grâce à ce dernier. L'ossification retrouvée chez le rat est une ossification membraneuse (74).

6. Électrostimulation

L'électrostimulation est aujourd'hui à l'étude. En effet, cette technique pourrait permettre, via l'utilisation de champs électromagnétiques pulsés, le traitement de fracture, de non-consolidation ou de pertes de substance chez l'adulte (75,76). Le mode d'action de cet artifice serait une activation des cellules souches mésenchymateuses de la moelle osseuse, entraînant leur différenciation en cellules cartilagineuses, osseuses et stromales (77).

V. Amputation et chirurgie prothétique

Historiquement, l'amputation était de guise pour le traitement des tumeurs osseuses, étant donné qu'il fallait réaliser un traitement curatif du cancer. Les thérapies néo-adjuvantes et les techniques opératoires avec conservation du membre ont par la suite fait leur preuve et sont une alternative acceptable à l'amputation (1). En effet, l'équipe de Rougraff et al. a montré une absence de différence significative en terme de survie, de récurrence entre les patients ayant bénéficié d'une amputation et ceux ayant eu un sauvetage de membre (2). L'aspect psychologique et la qualité de vie des patients amputés a également été étudiée et l'équipe de Postma et al. montrent que les patients dont le membre pathologique a été conservé, ont une meilleure qualité de vie, sans montrer de différence significative. (5)

Cependant, la technique de reconstruction doit être adaptée au patient et l'amputation garde des indications dans certains cas. En effet, l'appareillage moderne permet parfois d'obtenir une fonction meilleure lorsqu'une amputation est réalisée. C'est pourquoi, une approche multidisciplinaire est indispensable. Il faut également garder à l'esprit que les techniques de reconstruction osseuse, notamment celles évoquées ci-dessus, présentent parfois des

défauts de consolidation allant parfois jusqu'à la non-consolidation, des infections chroniques et des déformations importantes. L'amputation sera alors indiquée, afin de restaurer une fonction au patient. Ceci n'est pas sans conséquence en terme d'atteinte psychologique (6).

Le remplacement prothétique d'une articulation peut être utilisé chez l'enfant, dans le cas de tumeurs localisées proches d'une articulation ou l'envahissant. Cette technique fait partie de l'arsenal thérapeutique dont nous disposons lorsqu'un sauvetage de membre est entrepris. En effet, cette technique procure une stabilité à l'articulation reconstruite, se déroule en un temps chirurgical et permet d'obtenir une fonction satisfaisante.

Chez l'enfant, il ne faut pas perdre de vue qu'il s'agit d'un être en croissance, et la résection d'une articulation entraîne de toute évidence une résection du cartilage de croissance. Afin de préserver la croissance, le remplacement prothétique de l'articulation par une prothèse de croissance et sur mesure permet de conserver une croissance du membre.

Une étude de 2004 a cependant étudié les complications liées à ces reconstruction prothétiques, après résection de tumeurs du genou. L'équipe de Yang a retrouvé un nombre important de plaies, d'infections, de fractures de fatigues, de sublaxations, de cassures mécaniques de la prothèse, de cassures du polyéthylène. La sélection des patients éligibles à cette technique doit donc être rigoureuse (53).

Une étude de Fujiwara en 2020 expose les facteurs de risque d'infection de prothèse en reconstruction post résection de cancer osseux. Ils remarquent un taux de 12% d'infection profondes et les facteurs de risque de survenue étaient le sexe masculin, la présence d'un envahissement tumoral des tissus mous, la durée de l'intervention et l'administration antérieure de radiothérapie (54).

VI. Étiologies des pertes de substance osseuses chez l'enfant

1. Les tumeurs osseuses

Les tumeurs primitives osseuses représentent 5% des cancers de l'enfant et de l'adolescent.

a. L'ostéosarcome

L'ostéosarcome est une tumeur maligne osseuse, dont le taux d'incidence s'élève à 40 nouveau cas par million par an en France, et concerne préférentiellement l'adolescent et le jeune adulte entre 15 et 25 ans. Le sexe ratio est de 0,8. (1 fille pour 1,4 garçon). (78)

Cette tumeur atteint plus souvent les os longs (70 à 80%), plus particulièrement au niveau du genou, de l'extrémité distale du fémur ou de l'extrémité proximale du tibia. Cependant, elle peut se développer dans tous les os du squelette, également au niveau de l'humérus proximal pour 10 à 15%, et au niveau du bassin ou des os plats. Elle est hautement agressive et des métastases pulmonaires ou osseuses sont à rechercher sur le bilan d'extension. (79)

Il existe trois sous-types d'ostéosarcome et le plus agressif est l'ostéosarcome de haut grade.

Cliniquement, il se présente sous la forme d'une douleur, et/ou d'une masse palpable en regard d'un os. Radiologiquement, il se présente sous forme d'une lésion lytique ou sclérotique ou une combinaison des deux. Il existe souvent une masse des tissus sous-cutanés associée. Il existe une réaction périostée en regard de la tumeur, pluri lamellaire discontinue, perpendiculaire à la corticale avec aspect en feu d'herbe et avec éperon de Codman dans 80 à 90% des cas. L'IRM est alors indispensable pour réaliser le bilan pré-

thérapeutique de la lésion. Elle sera également réalisée après la chimiothérapie néo-adjuvante pour juger de la nécrose tumorale et donc de l'efficacité de cette dernière. (80)

Radiologiquement, les facteurs pronostics sont les suivants : la taille de la tumeur, la présence de skip métastase, la présence de métastases et la réponse en IRM à la chimiothérapie. (81)

Le diagnostic de cette tumeur est confirmé en anatomopathologie, grâce à une biopsie osseuse dont le trajet doit être planifié afin de faciliter la résection tumorale, emportant le trajet de biopsie.

La prise en charge de ces tumeurs passe par une réunion de concertation pluridisciplinaire. Le traitement consiste en l'administration d'une chimiothérapie néo-adjuvante (méthotrexate), permettant de réduire le volume tumoral, suivie de près par la chirurgie. La résection carcinologique en bloc de la tumeur, emportant le trajet de biopsie est de guise. La chimiothérapie peut alors être administrée, selon les résultats anatomo-pathologiques et lorsque le patient présente un état général satisfaisant et une cicatrisation de bonne qualité (82). Lorsqu'il existe une ou plusieurs métastases, la résection chirurgicale de ces dernières peut être envisagée. Le traitement de la survenue d'une récurrence sera discuté en réunion pluri disciplinaire et fait souvent appel à une reprise chirurgicale, suivie d'une chimiothérapie.

Historiquement, l'amputation était l'indication de référence pour le traitement des ostéosarcomes, mais des études cliniques ont montré l'absence d'un taux de récurrence, locale ou à distance et un taux de survie égal lorsqu'un sauvetage de membre était réalisé (1,2,14,15). Aujourd'hui, la reconstruction peut être réalisée dans le même temps que la résection tumorale.

b. Le sarcome d'Ewing

Le sarcome d'Ewing, moins fréquent que l'ostéosarcome, est le deuxième cancer osseux primitif, avec un taux d'incidence en France de 38 nouveaux cas par millions par an. Le sexe ratio est de 1,1 (78). Il survient le plus souvent durant la deuxième décennie de vie.

Il s'agit également d'une tumeur maligne, avec un risque métastatique non négligeable, qui entraîne plus de 90% de décès sans traitement systémique (83). Les métastases sont volontiers retrouvées au niveau des poumons (50%), des os (25%) et de la moelle osseuse (20%). Le sarcome d'Ewing peut atteindre tous les os du squelette et contrairement à l'ostéosarcome qui atteint surtout les os longs, la proportion de sarcomes d'Ewing des os plats et des os longs est la même. Lorsqu'il se situe sur un os long, on le retrouve plus couramment en médio diaphysaire.

Cliniquement, une douleur et/ou une masse sont des symptômes pouvant révéler la tumeur. En radiographie conventionnelle, on identifie une masse lytique ou mixte, lytique et sclérotique, en « bulbe d'oignon », due à une réaction périosté associée à la croissance de la tumeur. Une IRM doit également compléter le bilan pour préciser l'extension locale et intramédullaire de la tumeur (84). Le diagnostic de certitude reste l'analyse anatomopathologique de la biopsie, effectuée dans un centre de référence et de préférence par le chirurgien qui pratiquera l'exérèse tumorale.

Le traitement du sarcome d'Ewing associe la chimiothérapie néo-adjuvante, la chirurgie, la chimiothérapie adjuvante et la radiothérapie. La prise en charge des patients décidée en réunion de concertation pluridisciplinaire. Le protocole EURO-Ewing 99 est employé de nos jours et s'articule de la façon suivante :

- La chimiothérapie néo-adjuvante appelée VDC-IE (vincristine, doxorubicine, cyclophosphamide, ifosfamide et etoposide) est administrée pendant 14 cycles, et plus si des métastases sont présentes (85).
- La chirurgie suit ce traitement systémique et consiste en une résection en bloc de la tumeur, avec des marges suffisantes, en emportant le trajet de biopsie. La réponse à la chimiothérapie sera évaluée sur la pièce opératoire et est qualifiée comme bonne lorsqu'il reste moins de 10% de cellules cancéreuses. La radiothérapie complète le traitement local de la tumeur pour prévenir les récives. Elle est parfois employée seule lorsque la tumeur est jugée inopérable.
- La chimiothérapie post-opératoire, adjuvante, est similaire au traitement préopératoire, et adapté en cas de risque de récive (86).

La reconstruction osseuse est aujourd'hui largement employée et peut être effectuée dans le même temps que la résection osseuse.

c. L'adamantinome

L'adamantinome est une tumeur maligne, primitive et rare de l'os. Elle touche le plus souvent le jeune adulte. Son pic de survenue est de 15 à 35 ans mais peut survenir à tout âge. Contrairement au sarcome d'Ewing ou à l'ostéosarcome, c'est un sarcome de bas grade, qui évolue lentement.

Le diagnostic différentiel est la dysplasie fibreuse, de laquelle il se rapproche fortement à l'analyse histologique. En effet, en microscopie, on observe des cellules épithéliales malignes, noyées dans un stroma fibreux ou ostéofibreux.

L'os le plus touché est le tibia, mais d'autres os peuvent être concernés. La diaphyse est la localisation de préférence, mais la métaphyse est parfois touchée. Des métastases peuvent être présentes et les sites les plus touchés sont les poumons, les ganglions lymphatiques et le squelette.

Cliniquement, le premier symptôme est la douleur, puis on peut observer une masse d'augmentation progressive. De plus, une fracture peut révéler la tumeur. Radiologiquement, il s'agit de lésions focales lytiques, multiples, excentriques ou centromédullaires, à contours sclérotiques, au niveau diaphysaire. On la caractérise comme une lésion en « bulles de savon ». Habituellement, la corticale est intacte, bien qu'elle puisse apparaître soufflée. La réaction périostée est variable. L'IRM est l'examen de choix pour compléter le bilan de la lésion, et préciser son extension aux tissus mous et intramédullaire. (87)

Le diagnostic positif est effectué grâce à une biopsie, réalisée par une équipe spécialisée dans un centre de référence, en prenant compte que son trajet doit être excisé en bloc avec la tumeur lors de la résection.

Le traitement chirurgical avec résection en bloc de la lésion avec marges, en emportant le trajet de biopsie est la référence. La reconstruction osseuse peut être réalisée dans le même temps. La chimiothérapie ou la radiothérapie ne sont pas utiles dans le traitement de cette lésion. (88)(89)

2. La pseudarthrose congénitale

La pseudarthrose congénitale de jambe est également une cause de pertes de substances osseuses chez l'enfant. C'est une affection rare que l'on observe chez 1/150 000 naissances. Sa localisation préférentielle est diaphysaire. Le sexe ratio est de 1. (90)

Son lien avec la neurofibromatose de type 1 (NF1) ou maladie de Von Recklinghausen a été démontré dans les années 1950 par Ernest Aegerter (91), mais sa physiopathologie est encore floue. La NF1 est une pathologie à transmission autosomique dominante, touchant 1/3000 à 5000 naissances. Elle est d'expression variable, mais sa pénétrance est complète chez l'enfant. Elle correspond à une mutation du gène suppresseur de tumeur NF1. Des signes de neurofibromatose chez le patient, ou dans la famille sont à rechercher, et les symptômes les plus fréquents sont dermatologiques avec la présence de taches café au lait ou de neurofibromes. Elle peut également être responsable de gliomes des voies optiques, de tumeurs cérébrales, oculaires, viscérales, endocriniennes, ou de troubles cognitifs et de difficultés d'apprentissage.

Cliniquement, on peut observer une déformation de la jambe à la naissance, avec un tibia convexe en avant et latéralement, ou une discontinuité osseuse du tibia. La fibula est impliquée dans 50% des cas. Elle peut également atteindre la clavicule, le radius et le rachis (cypho-scoliose). Les présentations cliniques sont variables et ont été classées selon Boyd (92) ou Crawford (93). Cette dernière classification est la plus employée de nos jours.

La classification de Boyd, en 6 stades, est la suivante :

- **Type I** : courbure antérieure associée à d'autres déformations congénitales.
- **Type II** : Courbure antérieure et aspect de sablier du tibia / fracture spontanée ou après traumatisme mineur souvent chez l'enfant <2ans / extrémités osseuses effilées, arrondies et scléreuse avec oblitération du canal centromédullaire. Souvent associée à une FN1, mauvais pronostic avec récurrences fréquentes.
- **Type III** : pseudarthrose développée à partir d'un kyste intra osseux / courbure antérieure précédant ou suivant le développement de la fracture. Taux de consolidation élevé et récurrences rares.

- **Type IV** : os scléreux sans courbure pathologique / canal médullaire partiellement ou complètement obturé / fracture de fatigue peut survenir et évoluer vers une pseudarthrose. Le pronostic est bon si le traitement a lieu avant la fracture de fatigue.
- **Type V** : aspect dysplasique de la fibula / pseudarthrose localisée sur l'un ou l'autre des deux os de la jambe. Pronostic bon si la lésion est localisée uniquement sur la fibula, l'extension au tibia rend le pronostic proche des types II.
- **Type VI**: fibrome intra osseux ou Schwannome. Le pronostic est fonction de l'agressivité de la lésion intra osseuse.

La classification de Crawford, en 4 stades, est la plus utilisée (figure 4) :

- Type I** : courbure antérieure avec augmentation de la densité corticale et canal médullaire étroit
- Type II** : courbure antérieure et canal médullaire étroit et scléreux
- Type III** : courbure antérieure en association à un kyste ou un état préfracturaire
- Type IV** : courbure antérieure et fracture franche avec pseudarthrose associant souvent le tibia et la fibula

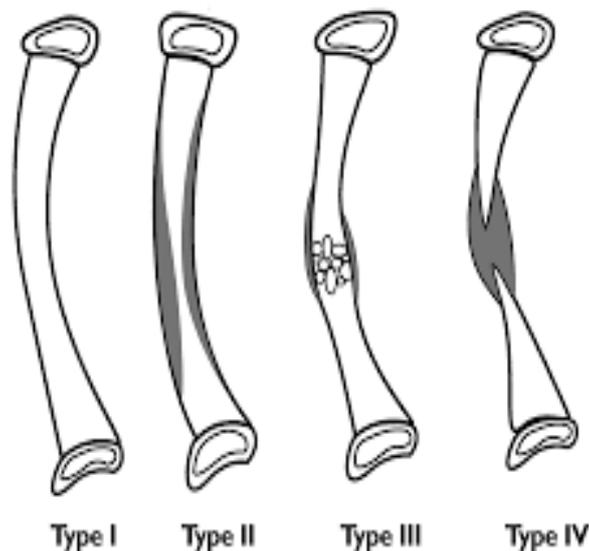


Figure 4 : Classification de Crawford

Radiologiquement, on retrouve une déformation osseuse à convexité antérolatérale. L'os est plus ou moins continu et lorsqu'il est discontinu, on retrouve une résorption des deux extrémités osseuses, témoin d'un manque de substance osseuse. Il existe également des formes kystiques pour lesquelles la déformation n'apparaît qu'entre 6 semaines et 1 an. L'IRM permet de préciser l'atteinte des tissus mous environnant, en particulier le périoste et détaille de façon plus claire les anomalies osseuses. En effet, il existe des anomalies de vascularisation au niveau du périoste, ce qui pourrait expliquer la physiopathologie de la pseudarthrose (94,95). Cet examen d'imagerie permet alors de mieux définir les limites de résection.

Les données physiopathologiques dont nous disposons pour expliquer cette maladie sont peu nombreux. En effet, une anomalie de vascularisation du périoste est décrite par Codivilla (71), la présence d'une activité ostéoclastique supérieure à l'activité ostéoblastique à l'endroit de l'hamartome fibreux, tissu d'interposition au niveau de la pseudarthrose ont été décrits (95). Enfin, en 2004, une équipe allemande décrit la présence de cellules *neural-like*, entourant les vaisseaux périostés, et provoquant un défaut de vascularisation du périoste par rétrécissement voire oblitération de ses vaisseaux (94).

Son traitement est un véritable défi pour le chirurgien, dans la mesure où l'os pathologique trouve des difficultés à consolider. En outre, le pronostic fonctionnel est souvent mauvais, avec une faiblesse du membre inférieur, des déformations résiduelles et une inégalité de longueur des membres (96). La reconstruction osseuse est réalisée dans le même temps que la résection de l'os pathologique, mais les difficultés de consolidation et le risque élevé de potentielles séquelles fonctionnelles n'excluent pas la possibilité de recourir à une amputation.

3. Autres étiologies

Les pertes de substance osseuses chez l'enfant peuvent aussi être de causes traumatiques ou infectieuses.

En effet, les traumatismes de hautes cinétiques, plus particulièrement les accidents de la voie publique, peuvent entraîner des pertes de substance osseuse de grande taille, nécessitant une reconstruction. Le contexte s'avère être différent des étiologies citées ci-dessus, dans la mesure où régulièrement, il s'agit de fractures ouvertes. Le contexte est donc septique et la reconstruction osseuse doit être différée, afin de contrôler l'infection en première intention. De plus, la couverture de l'os par un lambeau est également la première étape à effectuer avant de procéder à une reconstruction osseuse complexe (10,97–100)

L'évolution de ces situations septiques, peuvent entraîner une pseudarthrose septique, dont le traitement peut également faire appel à des techniques de reconstruction osseuse complexe. (59,101,102). Il en est de même pour les situations septiques telles que l'ostéomyélite ou l'ostéite (101,103–105).

VII. Objectifs de l'étude

La reconstruction osseuse pour les pertes de substance osseuse chez l'enfant représente un enjeu de taille pour les chirurgiens. En effet, elles sont souvent de grande taille et la reconstruction doit pouvoir restaurer une fonction au patient, en limitant les complications au maximum. Les deux techniques majoritairement utilisées de nos jours pour traiter les pertes de substance osseuse sont le transfert de fibula microvascularisé et la membrane induite.

L'objectif principal de notre étude était de comparer la qualité et le temps de consolidation de ces deux techniques chirurgicales.

Les objectifs secondaires étudiés étaient : identifier les complications inhérentes à la chirurgie, les séquelles du site de prélèvement, le taux de reprise chirurgicale, l'inégalité de longueur des membres, le score fonctionnel, le retour aux activités de la vie courante (école et sport) ainsi que la qualité cicatricielle.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

I. Recueil de données

Il s'agit d'une étude bi centrique, rétrospective, portant sur 54 enfants ayant bénéficié d'une reconstruction de perte de substance osseuse par la technique de Masquelet, et/ou par la technique de lambeau libre de fibula, entre 2004 et 2020.

Ces enfants ont été pris en charge dans la Clinique d'orthopédie pédiatrique du CHU de Lille (Hôpital Jeanne de Flandre) ou par les équipes de chirurgie pédiatrique orthopédique et de chirurgie plastique du CHU de Nantes (Hôpital Mère-Enfant et Hôtel Dieu).

Les données ont été recueillies de façon rétrospective, sur dossier médical, après accord du Comité National des Informations et des Libertés (CNIL). Certains patients ont été revus en consultation dans le cadre de leur suivi à long terme. Ceux qui n'ont pas pu être revu en consultation ont été contactés par téléphone afin de recueillir les données manquantes.

Cinquante-quatre patients ayant bénéficié d'une reconstruction selon la technique de fibula vascularisée (n=31) ou de membrane induite (n=23) ont été inclus dans notre étude. Les reconstructions post traumatiques ont été exclues. Les données telles que l'âge, le sexe, la date de décès, la date d'intervention, l'âge au moment du bloc opératoire, la durée du suivi, l'étiologie de la perte de substance, l'histologie de la tumeur, le statut primaire ou récidivant de cette dernière, sa taille en longueur, sa localisation, le côté concerné, la longueur de la perte de substance, le pourcentage d'os réséqué ont été recueillies à partir des dossiers et des radiographies. La taille de la perte de substance était mesurée sur les radiographies peropératoire, ou relevée sur les comptes rendus d'anatomopathologie.

Concernant les patients ayant présenté une tumeur maligne, le traitement néo adjuvant, adjuvant, leur délai par rapport à la chirurgie et la réponse à la chimiothérapie selon la classification de Huvos (106) ont été mentionnés dans notre recueil et ont été analysés dans un sous-groupe (Annexe 2).

Les éléments concernant la reconstruction ont également été collectés, tels que le type de reconstruction (fibula simple, bifoliée ou trifoliée, double fibula, ou membrane induite), l'utilisation d'autogreffe spongieuse, d'allogreffe et la longueur de cette dernière, les lambeaux associés, la longueur de fibula prélevée, la longueur de fibula distale restante, l'utilisation d'une vis de syndesmodèse tibiofibulaire distale et la méthode de fixation. La longueur de fibula transplantée ainsi que la longueur distale de fibula restante étaient mesurées sur les radiographies réalisées en postopératoire immédiat, ou à 15 jours lors de la première consultation.

Les données opératoires, post-opératoires, la durée d'hospitalisation, les complications immédiates et à long terme ont également été colligées.

II. Méthodes d'évaluation et variables analysées

Concernant notre critère de jugement principal qui étudiait la qualité de la consolidation et la durée de consolidation totale :

- la consolidation était considérée comme bonne si une seule intervention chirurgicale était nécessaire pour obtenir une consolidation optimale,
- moyenne si une intervention était nécessaire pour traiter une non-consolidation,
- mauvaise si la consolidation n'était pas obtenue.

La consolidation totale jugée sur les radiographies de face et de profil était obtenue lorsqu'un pont cortical était observé sur les deux clichés, au niveau des extrémités distales

et proximales de la fibula transplantée ou de la greffe osseuse sur membrane induite. Le délai de consolidation était calculé selon la date de bloc opératoire pour le groupe fibula et selon le premier ainsi que le deuxième temps opératoire pour le groupe membrane induite. Ceci a permis de minimiser les biais liés au fait que les enfants présentant une tumeur osseuse traitée par chimiothérapie adjuvante, étaient pris en charge pour le deuxième temps de Masquelet lorsque leur traitement adjuvant était terminé.

Les critères secondaires étudiés étaient colligés en consultation ou par téléphone. Nous avons recueilli : la durée d'hospitalisation en réanimation et en chirurgie pédiatrique, la notion de récurrence de la tumeur à distance ou locale, l'administration de traitements néo-adjuvants et adjuvants (chimiothérapie et radiothérapie), la localisation de la perte de substance ainsi que la taille de cette dernière, le pourcentage de cellules résiduelles après chimiothérapie néo-adjuvante, le côté choisis pour prélever la fibula, l'utilisation d'allogreffe et sa longueur, le type d'ostéosynthèse, la réalisation d'une syndesmodèse tibiofibulaire distale, la durée de l'intervention, l'utilisation de traitements antiagrégants ou anticoagulants en per opératoire et/ou post opératoire, la nécessité de recourir à une transfusion post opératoire, l'hypertrophie fibulaire, les complications du site donneur et receveur en post opératoire immédiat (dans le mois suivant la chirurgie) et post opératoire tardif, la nécessité de recourir à une amputation, la présence d'une inégalité de longueur des membres, la nécessité d'une reprise chirurgicale, la date d'appui partiel et total sans attelle, le délai de retour à l'école, la pratique des activités physiques et l'aspect esthétique des cicatrices. La morbidité du site donneur, comme le valgus de cheville, pouvaient faire l'objet de radiographie, lorsqu'il s'agissait d'une reconstruction par fibula. Les déformations résiduelles étaient également observées à l'examen clinique et en radiographie. Enfin, l'inégalité de longueur des membres inférieurs était constatée à l'examen clinique et une télémétrie permettait de quantifier cette dernière (116).

L'hypertrophie fibulaire était également évaluée, pour le groupe ayant bénéficié d'une reconstruction par fibula vascularisée. La formule utilisée était celle de De Boer, modifiée par El-Gammal (114,115). La formule est la suivante :

$$HT\% = (F2/R2 - F1/R1) / (F1/R1) \times 100$$

F1 : largeur antéropostérieure de la fibula d'origine

R1 : largeur antéropostérieure de l'os receveur d'origine

F2 : largeur antéropostérieure de la fibula transplantée lors du recueil

R2 : largeur antéropostérieure de l'os receveur lors du recueil

Dans les cas de fibula bifoliée ou trifoliée, la largeur correspondait à la largeur moyenne des deux segments. L'hypertrophie fibulaire était définie, selon El-Gammal, par une augmentation de 30% ou plus.

Sur le plan fonctionnel, les patients répondaient au questionnaire MSTS (Musculoskeletal Tumor Society) en consultation ou par téléphone (107). L'aspect esthétique des cicatrices était jugé par les patients et classé selon l'échelle suivante : 1/ très belle, 2/ assez belle, 3/ plutôt disgracieuse, 4/ très disgracieuse.

Enfin des photographies étaient prises en consultation pour illustrer nos cas, avec accord signé du patient et des parents.

Les patients étaient suivis dans le service d'orthopédie pédiatrique de chaque centre, à long terme. En effet, la consultation post-opératoire avait lieu à 15 jours après la reconstruction, puis le patient était revu toutes les 6 semaines pendant 3 mois, puis tous les 3 mois pendant deux ans et enfin tous les 6 mois. A chaque consultation, un examen clinique et une radiographie étaient réalisés.

III. Techniques opératoires

Concernant les patients présentant une tumeur osseuse, la résection en bloc de la tumeur a été effectuée, associant l'excision de la voie d'abord de la biopsie. Pour les autres étiologies, la résection en bloc de l'os pathologique a également été réalisée. La reconstruction et la résection étaient réalisées dans le même temps opératoire.

1. La fibula vascularisée

La technique chirurgicale employée est celle de Gilbert, décrite en 1979, par voie latérale.

(24)

Une planification pré opératoire, incluant le choix des vaisseaux receveurs, la longueur du greffon et la technique de fixation est arrêtée dans le but de mener au mieux cette intervention complexe. Une angiographie pré opératoire peut être réalisée au préalable, afin de décrire les axes vasculaires du membre inférieur, et de préciser la vascularisation fibulaire du patient (100). Cet examen n'a jamais été fait dans notre série.

Au bloc opératoire, sous anesthésie générale, le patient est placé en décubitus dorsal sur la table d'intervention. Un coussin peut être placé sous la hanche du côté homolatéral au prélèvement de la fibula, pour que le membre inférieur soit en légère rotation interne et que le genou et la hanche soient semi fléchis (24) (22). Certains auteurs décrivent une dissection de ce lambeau en décubitus latéral (36). L'opération est réalisée sous garrot pneumatique, placé à la racine du membre. Cette intervention se déroule en double équipe chirurgicale : une équipe prélève le lambeau, et une équipe prépare les vaisseaux au niveau du site receveur. (Annexe 4)

La voie d'abord est latérale et l'incision remonte en proximal jusqu'au col de la fibula et en distal jusqu'à la malléole externe. La dissection doit inclure le 1/3 moyen de la diaphyse afin de s'assurer d'emmener dans le lambeau, l'artère nourricière. Après incision cutanée, le

fascia crural est incisé, ce qui permet de mettre en évidence le plan entre le muscle soléaire et les muscles fibulaires. Le muscle long fibulaire est récliné en avant et le soléaire en arrière ce qui permet d'exposer la face latérale de la fibula. En avant de la fibula, le septum séparant la loge antérieure et latérale de la jambe est incisé, et en arrière, l'arcade du soléaire est libérée par une incision proximale. Il est impératif de respecter le périoste et sa vascularisation dès l'entrée en contact avec la fibula. On libère les muscles fibulaires de la face antérolatérale de la fibula sur toute la hauteur désirée.

En avant de la fibula, la membrane inter tibiofibulaire est exposée en réclinant en avant les extenseurs. En arrière de la fibula, le soléaire est récliné afin de permettre la visualisation du paquet vasculonerveux tibial postérieur, et l'origine de l'artère fibulaire. Le soléaire reçoit des petites artères provenant de l'artère fibulaire : ces dernières doivent être ligaturées.

Au contact du périoste de la fibula, la membrane interosseuse est incisée, en faisant attention au paquet vasculonerveux tibial antérieur. En arrière, le long fléchisseur de l'hallux est libéré en extra périosté, et de nombreuses perforantes provenant de l'artère fibulaire doivent être ligaturées. Une mince portion charnue du muscle long fléchisseur de l'hallux, de 2 à 4 mm d'épaisseur, doit être laissé inséré sur l'os afin de préserver la vascularisation périostée. Le long fléchisseur de l'hallux est sectionné afin de mettre en évidence le pédicule fibulaire et le nerf tibial postérieur, qui se situe en position latéral par rapport au pédicule vasculaire tibial postérieur. Le plan de dissection se poursuit donc en arrière entre les vaisseaux fibulaires et le nerf tibial postérieur.

En avant, une portion charnue du muscle tibial antérieur de 2 à 4 mm d'épaisseur est également préservée pour préserver la vascularisation périostée et augmenter le retour veineux.

Une fois la longueur de fibula nécessaire définie, le périoste est incisé en distal et en proximal du prélèvement osseux, dans le but d'exposer l'os pour l'ostéotomie circulaire. Le prélèvement peut ainsi être tracté en latéral avec soin, pour exposer le muscle tibial postérieur, qui est sectionné en laissant également une portion insérée à l'os.

Le pédicule artério-veineux fibulaire est abordée en distal du prélèvement, et disséquée de distal en proximal jusqu'à son origine au niveau de l'artère tibial postérieure. Chaque élément vasculaire, (1 artère et 2 veines) sont ligaturées séparément. On réalise la ligature distale.

Le garrot est relâché afin de vérifier la vascularisation du transplant, et d'effectuer les hémostases soigneusement. En proximal, le pédicule sera ligaturé et sectionné au niveau de son origine, sur l'artère tibiale postérieure, de la même façon qu'en distal.

Un ou deux drains sont mis en place dans la loge, en aspiration. Les différentes couches cutanées sont suturées plan par plan.

Ce lambeau libre osseux peut être utilisé tel quel, mais des variantes existent. En effet, une palette cutanée peut être associée au lambeau libre osseux. Yoshimura et al. décrivent ce lambeau ostéo cutané grâce à des études anatomiques (108). Cette dernière se situe à mi-distance entre la tête et l'extrémité distale de la fibula, car une importante branche artérielle cutanée issue de l'artère fibulaire se situe à cet endroit, de façon constante. Le dessin de la palette est généralement en forme d'ellipse, son axe longitudinal correspondant au bord sous cutané de la fibula. Les bords antérieur et postérieur du lambeau cutané peuvent être dessinés à 5 cm du bord longitudinal, dans toutes les directions, mais la taille maximale est de 10x20cm (25). Le pédicule cutané est donc repéré entre les muscles fibulaires et le

soléaire, environ à 0,3cm du bord postérieur de la fibula. La rétraction des fibulaires en avant permet l'exposition du pédicule cutané et son origine au niveau du pédicule fibulaire.

Enfin, une portion du soléaire peut également accompagner le prélèvement osseux, pour permettre l'utilisation d'un lambeau ostéo-musculo-cutané. Il s'agit d'un transfert composite qui utilise la portion latérale du muscle soléaire, elle-même également vascularisée par le pédicule vasculaire fibulaire. Pour cette technique, la dissection est facilitée par une position en décubitus ventrale du patient. L'incision est réalisée le long du bord postérieur de la fibula et s'incurve en proximal. Le fascia est incisé afin d'identifier le chef latéral du gastrocnémien, ainsi que le nerf fibulaire commun qui est récliné en avant. Le plan entre le gastrocnémien latéral et le soléaire est identifié et une incision latérale partielle du tendon proximal du chef latéral du gastrocnémien permet de relâcher le muscle et d'ouvrir l'espace du soléaire. On soulève le gastrocnémien pour exposer le soléaire, et l'insertion fibreuse proximale est incisée pour exposer les vaisseaux poplités. Le long de la ligne médiane, le soléaire est sectionné progressivement pour libérer la portion latérale et conserver l'insertion fibulaire du soléaire.

Si une allogreffe était utilisée, on utilisait alors de la technique de Capanna. En effet, la fibula était impactée dans l'allogreffe après alésage de cette dernière, selon la technique intramédullaire.

Pour les pertes de substance de grande taille, les inconvénients de retard de consolidation et de risque de fracture du greffon sont non négligeables, c'est pourquoi Jones et al. publient en 1988 une technique utilisant une fibula divisée en deux, pour la reconstruction d'un grand défaut fémoral (109). Par la suite, Chen publie une série de 11 cas, reconstruits par une fibula en double barre, montée en canon de fusil. Tous les patients consolidèrent, dans un délai de 3 à 12 mois et tous avaient récupéré un appui total (110).

L'ostéosynthèse permettant de solidifier le montage du lambeau libre, est variable et doit être adaptée à l'âge du patient, son potentiel de croissance et la localisation de la perte de substance.

Points clés du prélèvement :

-il est important de préserver 5cm proximaux au niveau de la fibula afin de protéger le pédicule tibial postérieur et le nerf fibulaire commun qui chemine autour du col de la fibula. En cas de lésion de ce nerf, on observe un steppage à la marche.

-en distal, 5 à 6 centimètres de fibula doivent être préservés afin d'éviter une déformation en valgus de la cheville. Une vis de syndesmodèse tibiofibulaire peut être mise en place pour prévenir cette complication. (111–113)

En post-opératoire, le patient était hospitalisé pour une nuit en réanimation pédiatrique, puis transféré dans le service de chirurgie pédiatrique le lendemain, si son état demeurait stable. Une immobilisation par attelle était mise en place au bloc opératoire, contre-indiquant l'appui total pendant la durée de la consolidation. Aucun traitement anticoagulant n'était administré au patient. La sortie d'hospitalisation était autorisée lorsque la douleur pouvait être gérée par des antalgiques usuels et que le patient avait repris ses activités quotidiennes. Le patient pouvait alors poursuivre son suivi et débiter la rééducation en centre spécialisé, ou à domicile avec un kinésithérapeute.

Une consultation de contrôle était programmée à 15 jours puis de façon rapprochée afin d'effectuer des contrôle radio-cliniques itératifs.

2. La membrane induite

Première étape :

Elle se déroule au bloc opératoire, sous anesthésie générale. La mise en place d'un garrot pneumatique peut-être nécessaire.

Après résection en bloc des lésions pathologiques comme énoncé ci-dessus, le débridement et le parage, une entretoise en ciment est mise en place au niveau de la cavité créée. Le ciment est constitué de poly méthyl méthacrylate (PMMA), sans antibiotique. Il est placé au niveau de la perte de substance avant sa solidification et doit manchonner les deux extrémités osseuses.

Les parties molles environnantes doivent être vascularisées et saines, c'est pourquoi il est parfois nécessaire de couvrir le ciment mis en place par un lambeau, lorsque la suture directe n'est pas envisageable.

Les techniques d'ostéosynthèse peuvent être multiples et le chirurgien adapte cette dernière à l'étiologie de la perte de substance et à l'âge du patient. On distingue les plaques vissées, le clou centromédullaire, l'embrochage centromédullaire élastique stable et le fixateur externe.

Deuxième étape :

Après cicatrisation complète des parties molles, le patient peut bénéficier de l'autogreffe spongieuse. L'intervention se déroule également sous anesthésie générale au bloc opératoire, avec mise en place d'un garrot pneumatique si nécessaire.

Le site donneur des greffes spongieuse se situe préférentiellement au niveau des crêtes iliaques. Dans le cas où la perte de substance est de grande taille, le prélèvement peut être effectué au niveau des crêtes iliaques postérieures et antérieurs, ce qui impose une installation double en décubitus ventral puis dorsal.

Il a été montré que la période optimale pour réaliser la greffe est de l'ordre de 4 semaines après la première étape. Ce délai est évidemment adapté aux traitements adjuvants, à l'état du patient et à l'état cutané local.

Le plan cutané est incisé, et la membrane également, dans le sens de la longueur (Annexe 3). Le ciment est alors ôté et la cavité nettoyée, en prenant garde de ne pas léser la membrane. Les extrémités osseuses distales et proximales sont avivées et reperméabilisées par alésage pour favoriser la consolidation. Des greffons de 2 à 3 mm sont alors mis en place dans la cavité, avec ajout d'allogreffe ou d'os de synthèse si l'autogreffe s'avère être insuffisante, ne dépassant pas 1/3 du volume totale de greffe osseuse. L'ostéosynthèse est à nouveau réalisée ou conservée s'il s'agissait d'un fixateur externe ou d'une ostéosynthèse intra médullaire.

IV. Analyse statistique

Les variables qualitatives ont été décrites en termes de fréquences et de pourcentages.

Les variables quantitatives ont été décrites par la moyenne et l'écart type ou par la médiane et l'intervalle interquartile en cas de distribution non Gaussienne.

La normalité des distributions a été vérifiée graphiquement et à l'aide du test de Shapiro-Wilk.

La comparaison des variables qualitatives selon deux modalités a été réalisée par le test du Chi-2 ou le test exact de Fisher. En cas d'ajustement, un modèle de régression logistique a été utilisé.

La comparaison des variables quantitatives selon deux modalités a été réalisée par des tests t de Student ou U de Mann-Whitney selon la distribution des paramètres. En cas d'ajustement, un modèle d'analyse de la covariance a été utilisé. Le lien entre deux variables quantitatives a été étudié par un coefficient de corrélation de Pearson ou de Spearman selon la distribution des paramètres.

Le niveau de significativité a été fixé à 5%. Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel SAS (SAS Institute version 9.4).

RÉSULTATS

I. Données démographiques

Au total dans les deux centres, 54 enfants ont bénéficié d'une reconstruction osseuse par l'une des deux techniques, à savoir la fibula vascularisée ou la technique de Masquelet, ou les deux. On compte en tout 57 reconstructions osseuses dans les deux centres. Les résultats descriptifs selon le centre sont exposés dans les Tableau 1 et 1bis.

Dans notre population, 16 reconstructions ont eu lieu à Lille (28,1%) et 41 à Nantes (71,9%). La technique de membrane induite a été entreprise pour 23 d'entre elles (40,4%) et la fibula vascularisée pour les 34 restantes (59,6%). Notre population comprenait 52,6% de filles et 47,4% de garçons et l'âge médian lors de l'intervention était de 134 mois (12 ; 220), c'est-à-dire 11 ans et 2 mois.

Pour le groupe Masquelet, le délai médian entre les deux blocs était de 56 jours (35 ;280).

Les patients qui nécessitaient un traitement adjuvant avaient un délai médian entre les deux temps de Masquelet de 26 semaines (10 ;40) tandis que les autres avaient un délai médian de 6,5 semaines (5 ;15). Deux patients n'avaient pas un environnement propice à la greffe osseuse à 6 semaines du premier temps, c'est pourquoi le deuxième temps a été retardé à 15 semaines après le premier temps.

On déplorait 3 décès dans notre population, à un âge médian de 17 ans et 2 mois (10 ans ; 18 ans et 3 mois). Ces patients décédèrent de récurrences locales ou métastatiques de leur tumeur maligne

N°	Centre	Age	Sexe	Diagnostic	CT	RT	Huvos	Récidive	Statut du patient	Suivi (mois)
1	Nantes	23	M	Sarcome d'Ewing	+	-	3	-	Vivant	82
2	Nantes	30	F	Sarcome d'Ewing	+	-	4	-	Vivant	138
3	Nantes	18	M	Sarcome d'Ewing	+	+	3	-	Vivant	18
4	Nantes	28	M	Ostéosarcome	+	-	3	-	Vivant	110
5	Nantes	25	F	Ostéosarcome	+	-	3	-	Vivant	96
6	Nantes	18	F	Ostéosarcome	+	-	3	Locale et pulmonaire	Décédé	56
7	Nantes	18	F	Pseudarthrose congénitale	-	-	-	-	Vivant	158
8	Nantes	17	M	Ostéosarcome	+	-	4	-	Vivant	57
9	Nantes	26	F	Ostéosarcome	+	-	3	-	Vivant	94
10	Nantes	19	M	Ostéosarcome	+	-	3	-	Vivant	35
11	Nantes	10	F	Sarcome d'Ewing	+	+	2	Locale et métastase	Décédé	22
12	Nantes	17	M	Sarcome d'Ewing	+	+	2	-	Vivant	37
13	Nantes	13	M	Sarcome d'Ewing	+	-	4	-	Vivant	62
14	Nantes	18	F	Pseudarthrose congénitale	-	-	-	-	Vivant	139
15	Nantes	22	F	Sarcome d'Ewing	+	+	3	-	Vivant	16
16	Nantes	21	M	Rhabdomyosarcome	+	+	2	-	Vivant	140
17	Nantes	21	M	Pseudarthrose congénitale	-	-	-	-	Vivant	126
18	Nantes	25	M	Sarcome d'Ewing	+	-	3	-	Vivant	138
19	Nantes	32	F	Sarcome d'Ewing	+	-	4	-	Vivant	141
20	Nantes	30	F	Ostéosarcome	+	-	2	-	Vivant	155
21	Nantes	21	F	Ostéosarcome	+	-	3	-	Vivant	33
22	Nantes	15	F	Sarcome d'Ewing	+	+	4	-	Vivant	21
23	Nantes	14	F	Adamantinome	-	-	-	-	Vivant	33
24	Nantes	29	F	Pseudarthrose congénitale	-	-	-	-	Vivant	137
25	Nantes	24	F	Ostéosarcome	+	-	4	-	Vivant	108
26	Lille	23	F	Séquelle d'ostéomyélite	-	-	-	-	Vivant	60
27	Lille	16	M	Sarcome d'Ewing	+	+	3	Para vertébrale	Vivant	132
28	Lille	25	F	Ostéosarcome	+	-	2	-	Vivant	48
29	Lille	12	F	Sarcome d'Ewing	+	-	4	-	Vivant	120
30	Lille	20	F	Sarcome d'Ewing	+	+	2	-	Vivant	108
31	Lille	17	M	Ostéosarcome	+	-	2	LAM + métastase pulmonaire	Décédé	36

Tableau 1. Descriptif du groupe fibula vascularisée

N°	Centre	Age	Sexe	Diagnostic	CT	RT	Huvos	Récidive	Statut du patient	Suivi (mois)
32	Nantes	14	M	Sarcome d'Ewing	+	-	3	-	Vivant	44
33	Nantes	10	M	Pseudarthrose congénitale	-	-	-	-	Vivant	27
34	Nantes	11	F	Pseudarthrose congénitale	-	-	-	-	Vivant	67
35	Nantes	7	M	Pseudarthrose congénitale	-	-	-	-	Vivant	39
36	Nantes	21	F	Adamantinome	-	-	-	-	Vivant	60
37	Nantes	15	F	Sarcome d'Ewing	+	+	4	-	Vivant	18
38	Nantes	14	F	Glioblastome	-	-	-	-	Vivant	18
39	Nantes	17	M	Sarcome d'Ewing	+	+	2	-	Vivant	51
40	Nantes	10	M	Adamantinome	-	-	-	-	Vivant	17
41	Nantes	8	M	Fibrome chondromyxoïde	-	-	-	-	Vivant	19
42	Nantes	22	F	Sarcome d'Ewing	+	+	2	-	Vivant	70
43	Nantes	16	F	Ostéosarcome	+	-	3	-	Vivant	35
44	Nantes	23	M	Pseudarthrose congénitale	-	-	-	-	Vivant	12
45	Lille	20	M	Adamantinome	-	-	-	-	Vivant	72
46	Lille	22	F	Sarcome d'Ewing	+	-	1	-	Vivant	72
47	Lille	18	M	Ostéosarcome	+	-	2	Fémur distal gauche	Vivant	36
48	Lille	3	M	Adamantinome	-	-	-	-	Vivant	12
49	Lille	10	F	Pseudarthrose congénitale	-	-	-	-	Vivant	36
50	Lille	21	M	Ostéomyélite	-	-	-	-	Vivant	96
51	Lille	10	M	Pseudarthrose congénitale	-	-	-	-	Vivant	108
52	Lille	25	F	Ostéosarcome	+	-	3	-	Vivant	48
53	Lille	16	M	Fibrome chondromyxoïde	-	-	-	-	Vivant	24
54	Lille	27	F	Pseudarthrose congénitale	-	-	-	-	Vivant	28

Tableau 1bis. Descriptif du groupe Masquelet

Le suivi médian dans les deux centres était de 57 mois (12 ;158).

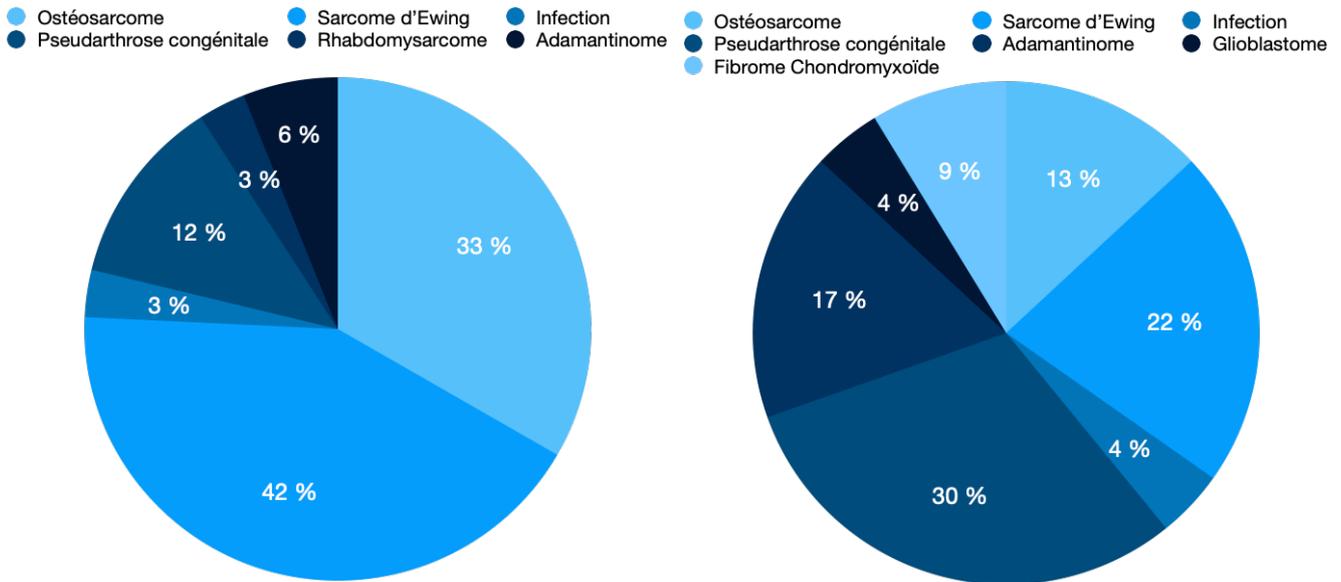


Figure 5. Répartition des étiologies dans le groupe fibula

Figure 5bis. Répartition des étiologies dans le groupe Masquelet

Concernant les indications de reconstruction osseuse, on distinguait 41 tumeurs osseuses (75,9%) et 14 autres diagnostics (25,9%). Plus précisément, l'ostéosarcome concernait 14 patients (26,9%), le sarcome d'Ewing 19 patients (25,2%), le rhabdomyosarcome était présent chez un patient (1,8%), l'adamantinome chez 4 patients (7,4%), le glioblastome chez 1 patient (1,8%) et le fibrome chondromyxoïde chez 1 patient également (1,8%). Il s'agissait de tumeurs primitives pour 37 patients (68,5%). Les autres étiologies aux pertes de substances décrites dans notre population étaient pour 2 patients une cause infectieuse (3,7%) et une pseudarthrose congénitale pour 11 patients (20,4%). La répartition des étiologies est exposée dans les figures 5 et 5bis.

La survenue d'une récurrence locale ou à distance était observée chez 5 patients (9,26%). Parmi ces patients, l'un d'eux présentait une récurrence para vertébrale L4-L5, provoquant une paraplégie spastique. Ce patient nécessite donc des auto-sondages et est non marchant.

Tous les patients atteints d'une tumeur maligne (sarcome d'Ewing, ostéosarcome et rhabdomyosarcome) ont bénéficié d'un traitement complémentaire, à savoir une chimiothérapie néo-adjuvante et adjuvante selon les protocoles décrits. La radiothérapie post-opératoire a été administrée chez 10 patients. Neuf patients présentant un sarcome d'Ewing ont reçu de la radiothérapie post-opératoire et le patient présentant un rhabdomyosarcome également. La dose médiane cumulée de radiothérapie était de 47,5Gy (44 ;54). Aucun patient n'a reçu de radiothérapie préopératoire.

II. Analyse des variables opératoires

L'âge médian lors de l'intervention était dans notre population de 11 ans et 2 mois. La taille médiane de la résection osseuse était de 12,5cm, allant de 1,8cm à 31cm. Le pourcentage médian de résection de l'os était alors de 44%, allant de 6,4% à 100%.

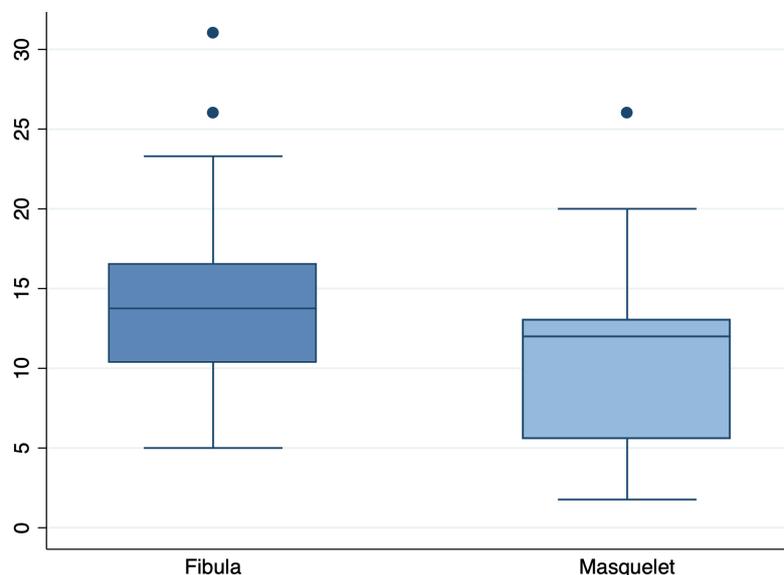


Figure 6. Taille de la perte de substance osseuse selon le type de reconstruction

On remarque dans la figure 6 que la technique de fibula vascularisée est plus utilisée pour les reconstructions de grande taille. En effet, on compte 26 fibulas vascularisées et 11 membranes induites pour les pertes de substance de plus de 10cm (69,3% et 29,7%

respectivement). La longueur médiane de la perte de substance dans le groupe fibula était de 13,75cm (5 ;30), contre 11,2cm (1,7 ;26) dans le groupe membrane induite.

La reconstruction était primaire pour 53 cas (93%), et 4 reconstructions étaient secondaires. En effet, 3 patients ayant bénéficié d'une fibula vascularisée, ont bénéficié d'un Masquelet secondairement. Deux patients présentaient une pseudarthrose radique de leur fibula transplantée. La fibula du troisième était septique et a dû être réséquée en partie. Le quatrième présentant une pseudarthrose congénitale de tibia avait bénéficié d'un clou télescopique pour allongement et réaxation, mais ce dernier n'a pas consolidé. Il a donc bénéficié d'une technique membrane induite secondairement.

Selon la classification de Huvos, le pourcentage de cellules restantes lors de l'analyse anatomopathologique après chimiothérapie néo-adjuvante était de grade 4 (0% de cellules vivantes) pour 9 patients, de grade 3 (<5% de cellules vivantes) pour 14 patients, de grade 2 (entre 6 et 49% de cellules vivantes) pour 10 patients et de grade 1 (>50% de cellules vivantes) pour 1 patient.

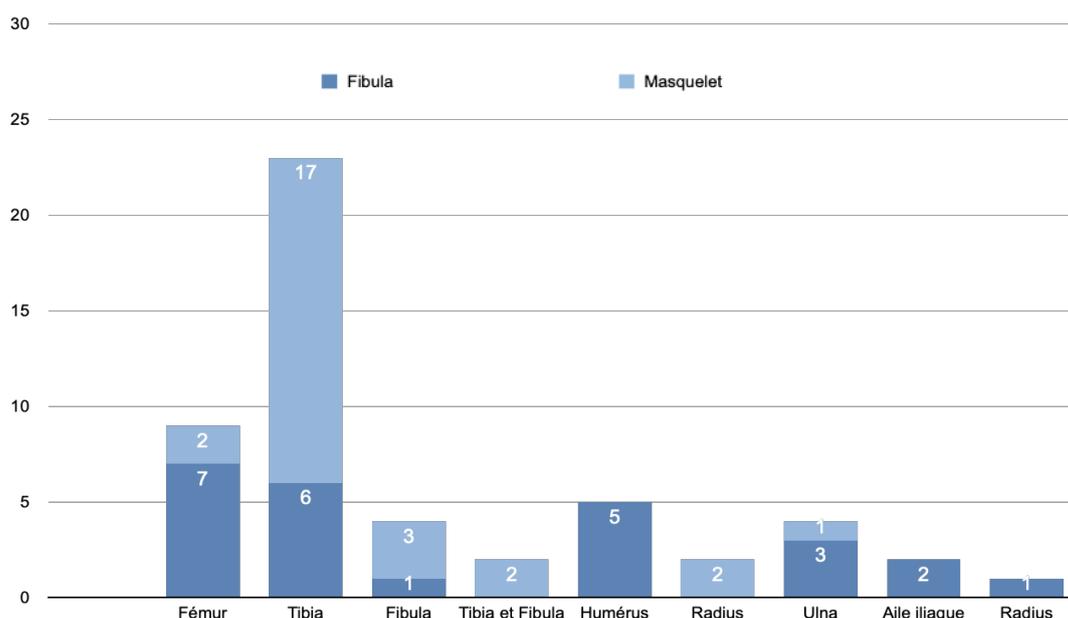


Figure 7. Localisation des pertes de substance osseuses selon le type de reconstruction

Les différentes localisations des pertes de substances osseuses sont présentées dans la figure 7. Les techniques de fixation, selon le type de reconstruction, sont présentées dans la figure 8.

Parmi le groupe de patient été opéré d'une fibula vascularisée (59,6%), pour 7 d'entre eux, il s'agissait d'une fibula bifoliée et pour un d'entre eux, d'une fibula trifoliée. Pour 6 patients, la fibula était prélevée du côté homolatéral à la reconstruction, et pour 22 patients du côté controlatéral. Les deux fibulas ont été utilisées chez 3 patients. La longueur médiane du transplant était de 18,8cm, avec un minimum de 6cm et un maximum de 35,5cm. La longueur médiane distale restante était de 5,15cm, avec un minimum de 1,8cm et un maximum de 13cm. Pour 7 reconstructions, la technique de Capanna a été employée, avec une taille d'allogreffe médiane de 23cm, un minimum de 16,5cm et un maximum de 30cm. Cette technique était employée pour 4 ostéosarcomes fémoraux et 3 sarcomes d'Ewing, dont un était tibial et 2 fémoraux.

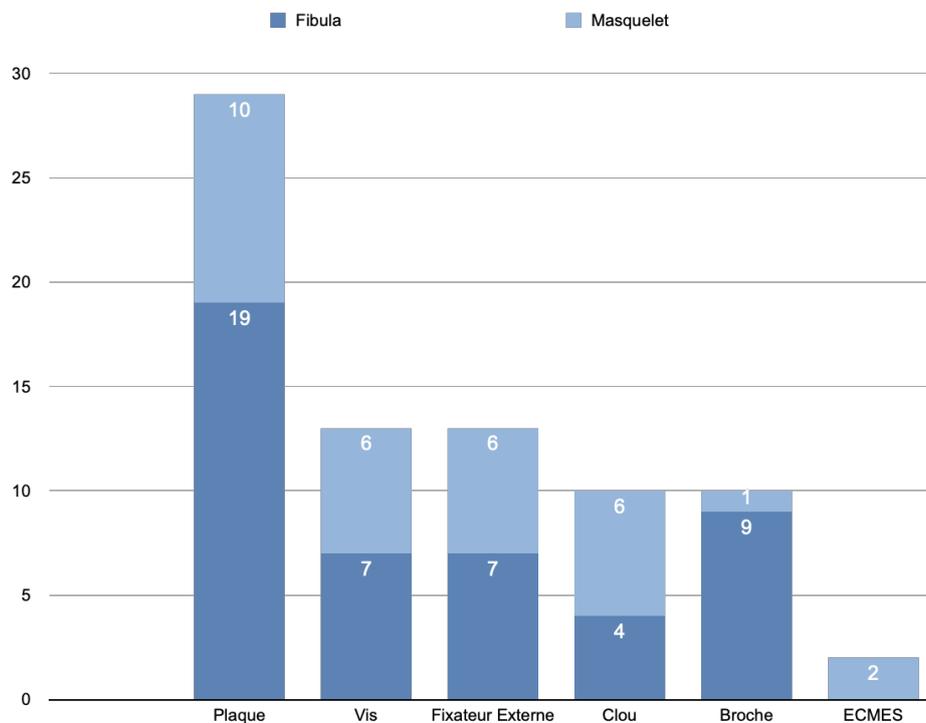


Figure 8. Type de fixation selon la technique de reconstruction

L'anastomose réalisée était dans 77,4% des cas termino-terminale, dans 19,4% des cas termino-latérale et pour un cas (3,2%) latéro-latérale. Un montage en série était performé pour 3 reconstructions et l'intervention était pratiquée par un sénior dans 100% des cas.

Un transfert épiphysaire a été réalisé pour deux patients.

Une syndesmodèse tibiofibulaire distale a été réalisée dans 64,7% des cas.

Dans le groupe opéré par la technique de membrane induite, 100% des sites de prélèvements de greffe cortico spongieuses étaient au niveau des crêtes iliaques.

Durant l'intervention, 3 patients ont bénéficié d'antiagrégants plaquettaires (2 patients du groupe fibula et 1 patient du groupe Masquelet), 4 patients du groupe Masquelet et 18 du groupe fibula ont été transfusés.

En ce qui concerne l'hospitalisation immédiate post opératoire, dans le groupe fibula, 100% des patients étaient surveillés la première nuit en réanimation. Un patient y a passé deux nuits. Dans le groupe membrane induite, un patient a passé deux jours en réanimation. Il s'agissait d'un patient présentant une pseudarthrose congénitale de tibia, dans le cadre d'une neurofibromatose de type 1 et compte tenu de ses antécédents (néphroblastome, hypertension artérielle sur sténose des artères rénales, sténose de l'artère mésentérique supérieure et mutation du gène KRAS) une surveillance post opératoire en réanimation était indiquée. Aucun autre patient ayant bénéficié de la technique de membrane induite n'a été hospitalisé en réanimation en post opératoire.

Le temps d'hospitalisation dans le service de chirurgie conventionnelle a été pour le groupe Masquelet d'une médiane de 9 jours (7 ;10) et pour le groupe fibula de 9 jours également (7 ;12). Une transfusion post-opératoire a été nécessaire pour un patient du groupe Masquelet et pour 6 patients du groupe fibula. L'administration de plasma frais congelé

(PFC) a été essentielle pour 3 patients du groupe Masquelet et 8 patients du groupe fibula. Un patient a reçu une anti-agrégation plaquettaire en postopératoire.

La durée médiane des deux temps chirurgicaux cumulés pour la technique de Masquelet était de 249 minutes (120 ;590). Le deuxième temps nécessitait systématiquement deux installations, un pour prélever l'os spongieux au niveau des crêtes iliaques postérieures et le deuxième pour réaliser la greffe au niveau de la membrane. Le temps opératoire médian pour la fibula vascularisé était de 465 minutes (282 ;780).

III. Complications

1. Complications péri-opératoires

Les complications péri-opératoires, c'est-à-dire pendant le mois suivant la chirurgie, concernent 14 patients de notre série (25,9%). Parmi ces patients, 11 avaient reçu une chimiothérapie néo-adjuvante. Sur les 33 patients ayant été traité par chimiothérapie néo-adjuvante, 33,33% présentèrent des complications péri-opératoires.

a. Complications générales

Un patient de notre série a déclaré une infection urinaire postopératoire pendant l'hospitalisation, traitée par antibiothérapie. Cette dernière était résolutive en quelques jours. Aucun décès n'a été recensé pendant l'hospitalisation.

b. Complications du site donneur

Aucune complication précoce du site donneur dans le groupe Masquelet n'a été recensée. Cependant, dans le groupe fibula, 6 patients ont présenté des complications du site donneur.

Deux patients ont révélé des signes de déficit du nerf fibulaire commun, 2 du long fléchisseur de l'hallux, et 3 du long extenseur de l'hallux. Ces symptômes ont été spontanément résolutifs.

c. Complications du site receveur

Dans le groupe Masquelet, un patient a présenté un déficit partiel du nerf fibulaire commun, spontanément résolutif en 24h (patient 34). De plus, le patient 37 a présenté une nécrose cicatricielle postopératoire, qui a nécessité une couverture par lambeau de gastrocnémien latéral.

Dans le groupe fibula, de nombreuses complications précoces du site receveur ont été recensées. Cependant, on ne relève aucun échec du lambeau libre. Deux hématomes ont dû être évacués en post-opératoire précoce, l'un au lit du malade (patient 6) et l'autre au bloc opératoire (patient 19). Un patient a présenté une ischémie en peropératoire (patient 22). La levée de l'ischémie a été réalisée par une sonde de Fogarty. Il s'agit du seul patient ayant bénéficié d'une anti-agrégation plaquettaire en postopératoire. On compte 5 infections superficielles du site receveur, traitées par lambeau local pour le patient 8 (n=1), greffe de peau mince pour le patient 3 (n=1), ou par antibiothérapie simple pour les autres (n=3). Les désunions cicatricielles sont évaluées au nombre de 5 et ont été traitées par lambeau de gastrocnémien médial pour le patient 11 (n=1), greffe de peau mince pour le patient 19 (n=1), derme artificiel (Matriderm®) et greffe de peau mince pour les patients 22 et 23 (n=2) et simple parage pour le patient 12.

	Fibula (n=34)	Membrane induite (n=23)	pvalue
Site donneur	4 (11,8%)	0	-
Site receveur	9 (26,5%)	2 (8,7%)	0,17

Tableau 2. Complications précoces selon le type de reconstruction

2. Complications tardives

a. Complications générales

On constate 3 décès dans notre population. Il s'agissait de deux ostéosarcomes et d'un sarcome d'Ewing, tous les trois ayant bénéficié d'une reconstruction par fibula. Des métastases pulmonaires et cérébrales ont été décelées et se sont avérées fatales pour ces patients.

L'administration de chimiothérapie n'augmentait pas le taux de complications, des sites donneur ou receveur (respectivement $p=0,6138$ et $p=0,3991$).

b. Complications du site donneur

Aucune complication tardive du site donneur dans le groupe membrane induite n'a été constatée.

Dans le groupe fibula vascularisée, de nombreuses complications du site donneur ont été déclarées, avec un taux de 17,6% des reconstructions par fibula.

En effet, le valgus de cheville a été diagnostiqué chez 5 patients (patients 8,13,14,21 et 22).

Tous avaient bénéficié d'une syndesmodèse tibiofibulaire distale sauf un (le patient 21) et

la longueur de fibula distale était toujours inférieure à 6cm. Un patient présentait une griffe de l'hallux persistante (patient 13).

c. Complications du site receveur

Le taux de complications global tardif des deux groupes au niveau du site receveur s'élève à 66,6%. Les résultats sont exposés dans le tableau 3.

Dans le groupe Masquelet, 69,5% (n=16) des patients reconstruits par cette technique ont présenté des complications. Les infections locales ont été déclarées chez 4 patients (17,4%). Il s'agissait d'une infection de fiche de fixateur externe pour le patient 33, d'un sepsis pour les patients 35 et 36 et d'une plaie de la face antérieure de la jambe traitée par antibiothérapie. Un patient présentait une infection ostéoarticulaire chronique, ce qui ne l'a pas empêché de consolider (patient 43). Un retard de consolidation était constaté pour 12 patients (52,17%). Un patient présentant une pseudarthrose congénitale fibulaire exclusive n'a jamais consolidé (patient 44).

Deux patients ont dû être amputés :

- Le patient 42 présentait une exposition de plaque, puis un abcès intra osseux non résolutif et a donc nécessité d'une amputation transtibiale
- Le patient 47 a présenté une récurrence de son ostéosarcome tibial au niveau du fémur distale. Une amputation sus gonale a été entreprise.

L'ostéosynthèse utilisée s'est déplacée pour un cas (patient 51), s'est pliée chez le patient 54 et s'est fracturée chez le patient 45. Dans tous les cas, cette ostéosynthèse a été remplacée.

Le patient 53 présentait une rétraction du long fléchisseur du pouce, qui a bénéficié d'un allongement.

Une déformation en varus de cheville était recensée chez les patients 37 et 45. Ces déformations ne nécessitaient pas de reprise chirurgicale lors du recueil.

Une fracture du site opératoire était déplorée chez le patient 50, traitée orthopédiquement.

	Fibula (n=31)	Masquelet (n=23)	pvalue
Infections locales	12 (38,7%)	4 (17,4%)	0,64
Retard de consolidation	11 (35,5%)	12 (52,2%)	0,13
Amputation	0	2 (8,7%)	-
Complications de l'ostéosynthèse	0	3 (13,0%)	-
Défaut d'axe	4 (12,9%)	2 (8,7%)	-
Fracture	14 (45,2%)	1 (4,3%)	0,002

Tableau 3. Complications tardives du site receveur selon le type de reconstruction

Dans le groupe fibula, le taux global de complications du site receveur à long terme était de 64,7%.

Un retard de consolidation était constaté chez 11 patients et tous bénéficièrent d'une greffe cortico-spongieuse complémentaire. L'infection cutanée est survenue chez 12 patients et deux d'entre eux ont présenté une absence de consolidation osseuse. Sur les 34 fibulas transplantées, 45,16% ont présenté une fracture du greffon, dont deux à deux reprises. Elles se manifestaient par une douleur au niveau du membre, secondaire ou non à un traumatisme mineur, ou par un trait de fracture à la radiographie de contrôle. Aucun

traitement n'était instauré dans la majorité des cas étant donné la découverte fortuite et à distance de l'évènement de ces dernières. Une fracture nécessita la pose d'une plaque. Dans notre série, sur les 7 patients ayant reçu de la radiothérapie postopératoire, uniquement un patient manifesta deux fractures de stress et une non-consolidation du transplant. Une déviation axiale était constatée chez 4 patients (12,9%) et une attitude en équin chez un patient.

De plus, l'analyse comparative entre les deux techniques chirurgicales ne retrouvaient pas plus de complication du site receveur lorsque la perte de substance osseuse était de grande taille ($p=0,5417$).

En outre, l'administration de radiothérapie entraînait statistiquement plus de complications majeures du site receveur dans le groupe fibula ($p=0,04$). Cette constatation n'était pas retrouvée au niveau du site donneur.

La synthèse du taux de complications tardives recensées dans les deux groupes est présentée dans le tableau 4.

	Fibula (n=34)	Membrane induite (n=23)	pvalue
Site donneur	6 (17,6%)	0	<0,05
Site receveur	22 (64,7%)	17 (73,9%)	0,46

Tableau 4. Complications tardives selon le type de reconstruction

IV. Résultats fonctionnels

1. Consolidation

La consolidation était jugée comme bonne et donc sans reprise chirurgicale nécessaire pour 27 reconstructions (47,4%), moyenne avec au moins une reprise chirurgicale indispensable pour 23 reconstructions (40,4%) et mauvaise signifiant une non-consolidation pour 7 reconstructions (12,3%). Parmi ces non-consolidations, 4 patients avaient reçu un traitement local par radiothérapie. On observe dans le groupe fibula 85,3% de consolidation et dans le groupe Masquelet, 95,0%.

Le délai médian de consolidation global total pour les 57 interventions était de 9 mois (1 ;64).

	Fibula (n=34)	Membrane induite (n=23)	pvalue	
Délai médian de consolidation (en mois)	10 (2 ;55)	7,5 (1 ;64)	0,54	
Qualité de la consolidation	Bonne	17 (50,0%)	10 (43,5%)	
	Moyenne	12 (35,3%)	11 (47,8%)	0,64
	Mauvaise	5 (14,5%)	2 (8,7%)	

Tableau 5. Consolidation selon le type de reconstruction

Le tableau 5 présente les résultats de la qualité de la consolidation ainsi que du délai de cette dernière selon le type de reconstruction.

Si l'on compare le délai de consolidation médian entre les deux populations en prenant en compte le premier temps de Masquelet, le délai médian de consolidation dans ce groupe est donc de 11 mois (2 ;65), ce qui le rend plus long que dans le groupe fibula, mais ce de façon non significative.

L'analyse comparative entre les deux groupes ne montrait pas de différence significative concernant la qualité de consolidation avec $p=0,64$, même si le nombre de « bonnes » consolidations était plus élevé dans le groupe fibula. (Tableau 5)

En outre, la taille de résection osseuse n'influe pas statistiquement sur la qualité de la consolidation ($p=0,89$) lors de l'analyse ajustée selon la technique chirurgicale. Cependant, pour les pertes de substances de plus de 10cm ($n=37$), la fibula vascularisée était utilisée dans 70% des cas ($n=26$).

La qualité de la consolidation osseuse après reconstruction n'était pas influencée statistiquement par l'étiologie de la perte de substance osseuse ($p=0,33$), ni par la taille de la perte de substance osseuse ($p=0,57$), après ajustement selon l'intervention. Cependant, une consolidation « bonne » était plus fréquemment retrouvée dans le groupe Masquelet chez les patients ayant reçu de la radiothérapie. En d'autres termes, la radiothérapie diminuait le taux de « bonne » consolidation dans le groupe fibula ($p=0,014$). Les patients du groupe Masquelet recevaient la radiothérapie entre les deux temps opératoires.

Le nombre d'interventions nécessaires pour l'obtention de la consolidation dans le groupe fibula était de 2 pour 10 patients, 3 pour un patient et 4 pour un patient. Dans le groupe membrane induite, le nombre d'intervention était de 2 au minimum et 10 patients nécessitèrent 3 interventions, un patient 4 et un patient 6. En moyenne, les patients du

groupe membrane induite étaient contraints d'être opéré plus de fois, mais ce de façon non significative par rapport au groupe fibula.

2. Hypertrophie fibulaire

L'hypertrophie fibulaire constatée sur les radiographies était avérée pour 17 fibulas (50%) des cas. Concernant les transferts au niveau du rachis et du bassin, aucune hypertrophie n'a été constatée.

La médiane d'hypertrophie des fibulas transplantées au niveau du membre inférieur était de 45% (16 ;64) et au niveau du membre supérieur était de 40% (26 ;44).

3. Délai d'appui

Le délai d'appui partiel médian, toutes reconstructions confondues, était calculé à 6 mois (1 ;126). Dans la population reconstruite par Masquelet, ce délai était de 7,4 mois (1 ;126) par rapport au deuxième temps opératoire et dans la population fibula, il était de 6 mois (1,3 ;12).

L'appui total était acquis chez 38 patients, sur 46 patients ayant bénéficié d'une reconstruction du membre inférieur (82,0%). Le délai médian d'appui total pour toutes reconstructions confondues était de 13,5 mois (2 ;92). Dans le groupe Masquelet, la médiane de ce délai d'appui total était de 17 mois (2 ;64) par rapport au deuxième temps opératoire et pour le groupe fibula, il était calculé à 13 mois (3 ;92).

Il n'y avait pas de différence significative entre les deux groupes concernant le délai d'appui partiel ou total (respectivement $p=0,21$ et $p=0,13$). (Tableau 6)

De plus, le délai d'appui et la taille de la perte de substance osseuse n'étaient pas statistiquement corrélés ($p=0,95$). La chimiothérapie n'influçait pas le délai d'appui des patients ($p=0,13$).

Reconstruction	Fibula vascularisée (n=34)	Membrane induite (n=23)	p
Délai médian d'appui partiel	6 (1,3 ;12)	7,4 (1 ;24)	0,21
Délai médian d'appui total	13 (3 ;92)	17 (2 ;64)	0,13

Tableau 6. Délai d'appui selon le type de reconstruction

4. Inégalité de longueur

L'inégalité de longueur constatée cliniquement et sur les télémétries, concernaient 25 patients (46,3%). Dans le groupe Masquelet, elle était observée chez 9 patients (39,1%) et dans le groupe fibula chez 16 patients (51,6%). Après ajustement sur la taille de la perte de substance et le diagnostic, la différence n'était pas significative entre les deux groupes ($p=0,76$).

Parmi les patients présentant une inégalité de longueur des membres inférieurs, 3 bénéficièrent d'une épiphysiodèse controlatérale. Un allongement a eu lieu ou est programmée chez 4 patients.

L'analyse selon test du Chi-2 montrait une absence de différence significative en termes de fréquence d'inégalité de longueur des membres, entre les deux groupes ($p=0,55$). Néanmoins, on observait un taux d'inégalité de longueur plus élevé dans le groupe fibula.

De plus, on observait significativement plus d'inégalité de longueur des membres dans le groupe fibula, s'il survenait des complications du site donneur ($p=0,017$). Les patients du groupe fibula présentant une tumeur maligne n'avaient pas plus de risque de développer une inégalité de longueur des membres inférieurs, après ajustement sur le type d'intervention ($p=0,63$). De plus, la taille de la résection osseuse n'influçait pas statistiquement le risque de développer une inégalité de longueur des membres, après ajustement sur la technique chirurgicale ($p=0,76$).

5. Autres résultats

Les derniers résultats ont été évalués chez 28 patients opérés selon la technique de fibula vascularisée et 13 patients selon la technique de la membrane induite. Il s'agit des 41 patients qui ont pu être revus en consultation ou contactés par téléphone.

a. Score MSTS

Dans le groupe fibula, la médiane du score MSTS était calculée à 23,5/30 (6 ;29). Dans le groupe membrane induite, ce score était calculé à 18/30 (6 ;30). On observe donc un meilleur score dans le groupe fibula, mais ce de façon non significative ($p=0,23$).

b. Reprise de l'école

Le délai médian de reprise de l'école dans le groupe fibula était de 6 mois (0 ;24) et dans le groupe membrane induite de 0,5 (0 ;6). Les patients opérés par la technique de fibula

vascularisée retournaient à l'école après leur intervention plus tardivement par rapport aux patients opérés par la technique de membrane induite, et ce de façon significative ($p < 0,001$).

c. Reprise des activités sportives

Tous nos patients vivants pouvaient réaliser les activités de la vie quotidienne sans limitation. Cependant, 67,9% des patients du groupe fibula ($n=19$) et 53,6% du groupe membrane induite ($n=7$) pratiquent le sport. La différence entre les groupes n'était pas significative ($p=0,49$).

d. Aspect des cicatrices

L'aspect des cicatrices a été jugé par nos patients et leurs parents. Le groupe de patients opérés par la technique de fibula vascularisée jugent leurs cicatrices très belles pour 10 patients, assez belles pour 8, disgracieuses pour 7 et très disgracieuses pour 1 patient. Cependant, dans le groupe de patients qui ont bénéficié d'une reconstruction par la technique de la membrane induite, un seul patient juge ses cicatrices très belles, 4 patients les jugent assez belle, pour 10 patients elles sont disgracieuses et aucun patient ne les juge très disgracieuses.

L'aspect des cicatrices était donc reconnu comme de meilleure qualité par les patients dans le groupe fibula, et ce de façon significative.

e. Douleur

La douleur était présente chez 7 patients du groupe membrane induite (53,9%) contre 3 patients du groupe fibula (10,7%). Cette différence était significative ($p < 0,05$). Cependant, aucun patient qui présentait des douleurs ne nécessitait un traitement au long cours.

V. Synthèse des résultats

La synthèse des résultats principaux exposés précédemment est exposée dans le tableau 7.

N°	Consolidation (mois)	Appui complet (mois)	ILM	MSTS	Sport	Reprise de l'école (mois)
1	48	3	Non	26	Oui	2
2	21	9	Non	29	Oui	9
3	12	20	Oui	25	Oui	20
4	18	19	Non	25	Non	6
5	6	13	Non	22	Non	2
6	37	-	Non	-	Non	6
7	55	92	Oui	25	Non	2
8	10	13	Oui	23	NR	1
9	14	14	Oui	26	Oui	10
10	36	11	Non	28	Oui	6
11	-	13	Non	-	NR	10
12	-	18	Non	17	Oui	8
13	5	7,5	Oui	21	Non	24
14	6	61	Oui	24	Oui	7
15	-	-	Non	23	Non	5
16	18	-	Oui	23	Oui	4
17	29	-	Non	19	Oui	10
18	13	16	Non	28	Oui	5
19	10	8	Non	15	Non	10
20	6	-	Non	19	Oui	5
21	-	-	Non	21	Non	5
22	21	-	Non	18	Non	12
23	2	6	Oui	27	Non	4
24	6	18	Non	12	Oui	7
25	9	-	Oui	27	Non	11
26	6	-	Non	12	Non	-
27	20	-	Oui	6	Non	6
28	5	-	Non	-	-	-
29	15	16	Oui	24	Oui	0
30	5	5	Oui	-	Oui	-
31	9	12	Oui	NR	NR	NR
32	2	4	Non	30	Oui	0
33	7	27	Non	27	Oui	0
34	3	36	Oui	-	-	-
35	8	13	Oui	-	-	-
36	9	23	Oui	6	-	-
37	5	-	Oui	18	Oui	0
38	2	-	Non	28	Oui	1
39	4	17	Non	15	Non	6
40	1	2	Non	-	-	-
41	1	4	Non	-	-	-
42	-	-	Non	NR	Non	0
43	7	12	Non	-	-	-
44	-	17	Non	-	-	-
45	64	64	Non	-	-	-
46	31	31	Oui	22	Oui	6
47	10	-	Non	NR	Non	3
48	9	-	Non	15	Non	0
49	24	37	Oui	17	Oui	0
50	9	-	Non	-	-	-
51	18	19	Oui	22	Non	1
52	11	11	Oui	-	-	-
53	7	-	Non	17	Oui	4
54	10	16	Non	-	-	-

Tableau 7. Synthèse des résultats

DISCUSSION

Dans notre série de patients, les pertes de substance osseuses, quelles que soient les étiologies, sont couramment supérieures à 5cm, ce qui justifie pleinement l'utilisation d'un greffon osseux vascularisé ou la membrane induite, car la greffe simple n'est plus indiquée à ce stade (50,114,117–119).

Le choix de l'une ou l'autre technique dans notre population a été réalisé en réunion de concertation pluridisciplinaire et seule une étude retrouvée dans la littérature compare les résultats de ces deux chirurgies. Cependant, cette étude est portée sur une seule étiologie : la pseudarthrose congénitale du tibia. En effet, Vigouroux et al. En 2017 étudient les résultats chez 18 patients, avec un suivi de 9,5 ans. Il retrouve des résultats similaires en termes d'intervention chirurgicale, d'inégalité de longueur des membres ou d'amputation. De surcroît, il retrouve moins de morbidité du site donneur et moins de complications que dans la fibula vascularisée, ce qui s'accorde avec les résultats retrouvés dans notre série (120).

De nombreuses autres études se sont penchées sur la comparaison de différentes techniques opératoires pour traiter les pertes de substance osseuse, chez l'enfant et chez l'adulte. Néanmoins, la majorité compare le sauvetage de membre et l'amputation. (3–5,12,13)

I. Étiologies

L'étiologie principale retrouvée dans notre série est bien évidemment tumorale, avec 75,5% des reconstructions osseuses. La technique de la fibula vascularisée a fait ses preuves depuis de nombreuses années en termes de reconstruction osseuse après cancer osseux,

chez l'enfant et chez l'adulte (118,121–131). La technique de membrane induite décrite en 1986 est également attrayante et largement employée pour ces indications, avec une première application chez l'enfant par Biau en 2009 (132–134). En effet, elle peut être utilisée pour des pertes de substance osseuses de grande taille, supérieure à 60% du membre (132).

Les autres situations cliniques entraînant des pertes de substance osseuses sont au nombre de 14 dans notre série, soit 24,6%.

La pseudarthrose congénitale de jambe dans notre série concerne 11 reconstructions (19,3%). Cette pathologie est connue pour entraîner des taux élevés de non-consolidations et de reprises chirurgicales, c'est pourquoi de nombreuses séries étudient différentes techniques de reconstruction osseuse. En outre, des fractures du greffon sont observées alors que la fibula présente une hypertrophie dans la série de Weiland et al. (135). La reconstruction par fibula vascularisée dans la pseudarthrose congénitale de tibia a fait l'objet d'une étude multicentrique en 2000. Sur 40 patients européens, 61,0% consolidaient, dont 39,0% en une intervention et 17,5% nécessitaient une reprise pour greffe osseuse complémentaire. De plus, 5 fractures étaient constatées (16,0%) (136). Plus récemment, plusieurs séries étudièrent cette technique de reconstruction pour les CPT (137–139). On évalue le taux de reprise à 30,0%. Les résultats sont présentés dans le tableau 8.

La technique de membrane induite est également en plein essor dans cette pathologie (140–143). En effet, Pannier et al. publient en 2013 une série de 5 cas de pseudarthroses congénitales de tibia, opérées via la technique de Masquelet. Tous les patients présentèrent une consolidation en un temps, en moyenne en 4 mois. Un patient présenta une fracture non déplacée traitée orthopédiquement (144). Dans notre série, 7 patients étaient dans cette situation. On constatait 57,0% de consolidation en un temps et 28,6% de consolidation

après reprise chirurgicale. Un patient présentait une non-consolidation, mais il s'agissait d'une pseudarthrose congénitale de fibula exclusive, ne limitant pas ses activités de la vie quotidienne, l'appui bipodal, ou les activités sportives. Deux patients (28,6%) présentaient une déformation axiale résiduelle, nécessitant une reprise chirurgicale par clou centromédullaire ou fixateur externe.

Auteur et année	Type de reconstruction	Nombre de patients	Taux de consolidation en un temps	Taux de consolidation après reprise	Taux de fractures	Déformation résiduelle
Sakamoto / 2008	Fibula	8	62,5%	25%	12,5%	50%
Korompilias / 2009	Fibula	9	77,8%	11,11%	11,11%	78%
Erni / 2009	Fibula	10	90%	10%	50%	-
Présente étude	Fibula	4	50%	50%	75%	50%
Pannier / 2013	Masquelet	5	100%	0%	20%	20%
Présente étude	Masquelet	7	57%	28,6%	0%	28,6%

Tableau 8. Analyse des résultats de reconstruction osseuses dans les pseudarthroses congénitales selon la technique employée

Enfin, la technique d'Ilizarov dans cette pathologie recense un taux de consolidation entre 50,0 et 90,0% selon les séries : Paley et al. décrivent 94,0% de consolidation en un temps, Damsin et al. en 1996 en rapportent 55,0% et Boero et al. en 1997 en chiffrent 81,0% (56–58). L'European Paediatric Orthopaedic Society (EPOS) en 2000 concluent que la technique

d'Illizarov reste la méthode optimale pour obtenir une fusion osseuse de 75,5% dans la pseudarthrose congénitale de tibia, ainsi qu'un taux moindre de déformations axiales (11).

Les autres étiologies de pertes de substance osseuses dans notre série sont les causes infectieuses, et concernent deux cas (3,5%). Un patient a bénéficié d'une reconstruction par fibula vascularisée. Dans la littérature, la technique de membrane induite a fortement évolué pour traiter les pseudarthroses septiques, les ostéomyélites ou les ostéites (103,105). Dans notre série, le patient ayant bénéficié d'une reconstruction par membrane induite post ostéomyélite de l'ulna secondaire à une morsure de chien, présentait une perte de substance de 11,0% de la taille de son os. Durant le suivi, une greffe osseuse complémentaire avec mise en place d'une plaque fut nécessaire. En effet, le patient présenta une fracture non consolidée à 6 mois.

II. Gestion du péri opératoire

La technique de membrane induite décrite par Masquelet ne nécessite aucun examen complémentaire préopératoire. Masquelet et al. dans leur publication de 2019 conseillent de réaliser les deux temps opératoires avec un intervalle de 4 à 8 semaines (47). Dans notre série, 56,0% ont été pris en charge pour leur second temps opératoire dans ce délai. Le second temps était retardé dans le cadre d'une résection osseuse tumorale ; en effet, les ostéosarcomes et sarcomes d'Ewing, nécessitent tous l'administration d'une chimiothérapie, ce qui retardait le deuxième temps opératoire. En effet, comme dans les séries de Chotel et Villemagne (132,145), le deuxième temps opératoire doit être retardé, dans la mesure où la chimiothérapie induit un effet antimitotique sur les ostéoblastes et entraîne une neutropénie, augmentant la sensibilité du patient aux infections. Malgré l'allongement de ce délai entre les deux temps opératoires, nous ne remarquons pas d'influence sur la qualité de la consolidation. Les deux patients pour lesquels le deuxième

temps a été retardé, indépendamment de la chimiothérapie, présentaient un environnement osseux non propice à la greffe osseuse.

De plus, Masquelet recommande l'utilisation d'un « spacer » en ciment plutôt que de billes en ciment, afin d'améliorer la formation de la membrane. Dans notre série, un « spacer » en ciment était toujours utilisé. De plus, une fixation adéquate et solide devait être entreprise lors du premier temps, ce qui a été réalisé dans notre série. Le protocole de pansements de la fixation par fixateur externe était également minutieux afin de limiter les infections de fiches.

Concernant la technique de lambeau libre de fibula vascularisée, l'analyse des vaisseaux préopératoire par des examens complémentaires comme artériographie ou l'angio-TDM n'est pas systématique chez l'enfant. En effet, l'enfant est dénué de pathologies athéromateuses et de facteurs de risques cardio-vasculaires. En dehors des indications post-traumatiques de reconstructions osseuses où l'imagerie est indiquée pour étudier l'intégrité des axes de jambe, ces examens ne sont pas recommandés (146,147). Cependant, Young considère que chez l'enfant, l'étude de la vascularisation fibulaire par une imagerie en pré opératoire est nécessaire, afin de déceler des variations anatomiques qui pourraient compromettre le succès de l'intervention (148). Néanmoins, le scanner ou l'artériographie sont des examens utilisant des rayons X, irradiants et invasifs, leurs indications doivent être réservées aux situations de doute clinique.

Les anastomoses réalisées lors des lambeaux libres de fibula vascularisées sont pour 70,0% de nos reconstructions termino-terminales. Néanmoins, théoriquement, l'anastomose termino-latérale permettrait de maximiser la perfusion sanguine chez les jeunes enfants à fort potentiel de croissance (128). De plus, certaines équipes décrivent un retour veineux du lambeau libre par suffusion, permettant de s'affranchir d'une anastomose veineuse

microchirurgicale (149). Cependant, dans notre série, les patients ont tous bénéficié d'une anastomose microchirurgicale veineuse et artérielle.

L'anti-agrégation plaquettaire et l'anticoagulation ne font pas partie des protocoles que nous utilisons lors de l'intervention ou en post-opératoire. La prescription d'une anti-agrégation plaquettaire a été nécessaire dans le cas d'un patient, ayant présenté en peropératoire, une ischémie aiguë de membre, secondaire à la thrombose de son artère fémorale homolatérale à la reconstruction. Une sonde de Fogarty a dû être utilisée pour lever l'ischémie. Une anticoagulation préventive par héparine de bas poids moléculaire fut également administrée pendant 15 jours. Néanmoins, aujourd'hui aucun consensus n'existe dans la littérature, mais il est admis que l'enfant est un être à haut risque de spasme vasculaire lors de l'utilisation de techniques microchirurgicales (35). Canales et al. recommandent en 1991 l'administration d'un traitement par héparine de bas poids moléculaire pendant 5 jours, associé à une anti-agrégation plaquettaire pendant 4 semaines (150). Serletti et al. en 1996 recommandent une anticoagulation uniquement pour les patients de moins de 6 ans, qui présenteraient une fragilité accrue de leur paroi vasculaire, de par leur consistance gélatineuse, rendant le vaisseau fragile et sensible aux thromboses (29).

L'utilisation de la fibula controlatérale à la perte de substance osseuse dans notre population concerne 65,0% de nos reconstructions par fibula vascularisée. Dans la littérature, Cao et al. en 2002 comparent l'utilisation de l'une ou l'autre des fibulas. Il retrouve un meilleur taux de consolidation dans le groupe controlatéral et ce de façon significative (151).

III. Résultats

1. Temps et qualité de consolidation

Dans notre série, le délai médian de consolidation était de 10 mois (2 ;55) dans le groupe fibula, et de 7,5 mois (1 ;64) dans le groupe Masquelet. Il n'existait pas de différence significative du délai de consolidation entre les deux groupes ($p=0,64$). De plus, 85,3% de nos patients ayant bénéficié d'un transfert libre de fibula vascularisée et 95,0% des patients ayant bénéficié de la reconstruction par la technique de membrane induite ont consolidé.

Dans la littérature, les séries décrivant le délai de consolidation des patients opérés par un transfert libre de fibula vascularisée, retrouvent un délai de consolidation variable, allant d'une médiane de 3,7 mois à 24 mois. On remarque également que selon l'étiologie, le délai de consolidation est variable. En effet, Sainsbury publie en 2014 les résultats d'une série de 19 patients pédiatriques reconstruits par fibula vascularisée des suites d'un sarcome de membre, retrouvant un délai de consolidation allant de 9 mois à 72 mois (130). En comparaison, Korompilias publie une série de 9 cas présentant une pseudarthrose congénitale de tibia et retrouve un délai de consolidation plus court, allant de 1,5 à 6 mois (138). Cette différence n'est pas retrouvée dans notre population, mais le nombre de patients ayant bénéficié d'une fibula vascularisée pour reconstruire une perte de substance osseuse secondaire à une pseudarthrose congénitale est faible, en comparaison avec le taux de patient présentant des tumeurs osseuses.

Dans ces séries pédiatriques, le taux de consolidation en un ou plusieurs temps opératoires est de l'ordre de 76,7% à 100% selon les séries, ce qui se rapproche du taux de consolidation de notre série (85,3%) (tableau 9).

Concernant la technique de Masquelet, le nombre de publications concernant des cas pédiatriques est faible et le taux de consolidation varie de 65,0% à 100% (tableau 10), ce qui s'accorde avec les résultats retrouvés dans notre population (95,0%). De plus, le délai médian de consolidation dans la littérature est chiffré entre 4 et 9,5 mois lorsque ce dernier est étudié, ce qui concorde avec les données retrouvées dans notre population. En prenant en compte le premier temps de Masquelet, qui rallonge la prise en charge totale des patients, surtout ceux atteints d'une tumeur osseuse maligne, étant donné l'administration de traitements adjuvants, le délai de consolidation est chiffré à 11 mois (2 ;65). Cependant, dans la littérature, le calcul de ce délai est souvent non détaillé, ce qui rend nos résultats peu comparables. (133,134,140,141,144,152,153)

L'analyse statistique que nous avons réalisée ne permet pas de mettre en évidence une relation le délai de consolidation et la taille de la perte de substance ainsi que l'étiologie. De plus, le recours à une intervention chirurgicale supplémentaire pour permettre d'obtenir la consolidation n'était pas non plus corrélée à ces variables ($p > 0,05$). Néanmoins, nous retrouvons dans nos résultats que l'administration de radiothérapie dans le groupe fibula est corrélée à un nombre plus important de « moyenne » et « mauvaise » consolidation, qui imposent une greffe cortico-spongieuse supplémentaire ($p = 0,014$). De plus, nous retrouvons dans notre population deux cas de pseudarthrose radique sur fibula vascularisée, nécessitant une reconstruction secondaire par la technique de Masquelet. Nous pouvons donc penser que la radiothérapie joue un rôle négatif sur la qualité et le délai de consolidation.

Dans la littérature, il est retrouvé que plusieurs facteurs influencent la consolidation osseuse, dont l'étiologie, la fixation et l'utilisation de greffes associées. Cependant, la taille du greffon et l'orientation de ce dernier n'étaient pas liées à la consolidation. Une reconstruction secondaire à une ostéomyélite serait également un facteur de mauvaise consolidation (154).

De plus, nous avons retrouvé dans nos populations une absence d'influence de l'administration de chimiothérapie sur le délai ou la qualité de la consolidation ($p > 0,05$). Cependant, Hariri suggère dans sa population que le méthotrexate, utilisé dans le traitement adjuvant de l'ostéosarcome, inhiberait les formations osseuses et augmenterait le délai de consolidation. Il retrouve également, en concordance avec ce résultat, que la sarcome d'Ewing consoliderait deux fois plus rapidement que l'ostéosarcome (123).

La vascularisation de la fibula semble être un facteur déterminant de la qualité et du délai de consolidation. En effet, un flux sanguin satisfaisant permet une consolidation plus rapide. Précisément, Laffosse retrouve une consolidation distale toujours plus rapide des fibulas vascularisées, étant donné que la métaphyse proximale de la fibula est vascularisée par des branches de l'artère tibiale antérieure, non prélevée. Il propose donc d'épargner le quart proximal de la fibula, ou de réaliser un transfert bi pédiculé afin d'améliorer la consolidation (118). De plus, l'adjonction d'un transfert périosté à la fibula vascularisée permettrait également une amélioration de la consolidation, grâce aux propriétés ostéoinductrices du périoste (74,117).

L'ostéosynthèse influence également la consolidation, dans la mesure où elle influe sur la vascularisation du transplant. En effet, le clou centromédullaire agit sur la vascularisation de l'endoste, la plaque vissée altère la vascularisation périostée ainsi que l'endoste au niveau des vis et le fixateur externe peut également altérer la vascularisation périostée et centromédullaire au niveau des fiches. De plus, les complications septiques du fixateur externe ne sont pas négligeables, c'est pourquoi un protocole de soins post opératoires strict est mis en place chez nos patients.

Dans la littérature, l'ostéosynthèse lors d'un transfert libre de fibula vascularisée est discutée. Il doit bien sur assurer une solidité du montage, en abimant le moins possible la

vascularisation fibulaire qui pourrait compromettre la vascularisation du transplant. Cependant, une stabilité relative permettrait de diminuer les tensions sur le transplant et les contraintes (114). En effet, Falder conseille l'utilisation du fixateur externe circulaire de type Ilizarov modifié, afin de favoriser la vascularisation des extrémités du transplant (155). La plaque vissée est préférée pour Campanacci, Han et Schwarz (128,156,157). Pour obtenir une consolidation de qualité, l'ostéosynthèse idéale serait celle qui permettrait d'obtenir un montage stable et élastique, respectant la vascularisation du transplant.

Concernant la technique de la membrane induite, l'ostéosynthèse est également sujette à des discordances dans la littérature. En effet, Masquelet recommande une fixation dès le premier temps, utilisant une ostéosynthèse externe ou interne. Cette dernière doit être revue et réadaptée si besoin lors du deuxième temps afin d'optimiser la consolidation. Pour l'humérus distal, il conseille l'utilisation d'une plaque vissée et pour le fémur un clou centromédullaire verrouillé. La combinaison l'autogreffe massive avec une fibula non vascularisée est pourvoyeuse de stabilité et est désormais utilisé par l'équipe de Masquelet lors des reconstructions fémorales (47,158). Pour Karger, la fixation idéale externe reste le fixateur externe circulaire, si la fixation externe est choisie, afin d'avoir un montage stable. Cependant cette fixation externe ne sont pas très bien tolérés à long terme (48). Dans la série de Villemagne, aucun enfant ayant bénéficié d'une fixation par ECMES n'obtenait une consolidation osseuse (145). Dans notre série, nous observions un déplacement de plaque, une fracture de clou et une pliure de clou, ce qui a entraîné un changement de l'ostéosynthèse. Nous ne retrouvons pas de lien statistique entre le type de fixation et la qualité ou le délai de consolidation.

L'autogreffe spongieuse est le meilleur prélèvement pour la greffe osseuse et ses propriétés ostéoinductrices et ostéogéniques sont clairement démontrées (18). Cependant, le prélèvement de cette greffe est morbide et la quantité d'os disponible est limitée, en

particulier chez l'enfant. Elle peut être associée à un transfert osseux libre comme celui de la fibula vascularisée et De Boer retrouve une consolidation de meilleure qualité chez les patients ayant bénéficié d'une ostéosynthèse stable et d'un ajout d'autogreffe spongieuse dans le même temps que la reconstruction (154). Ce résultat est confirmé par Han (157).

Pour la technique de membrane induite, Masquelet décrit pour les reconstruction tibiales, l'importance de réaliser une greffe inter-tibio-fibulaire lors du deuxième temps afin de maximiser la consolidation et de limiter le nombre de fractures secondaires. Cependant, cette technique nécessite deux voies d'abord, une postérieure pour réaliser cette greffe, et une antérieure pour aborder la membrane induite. Cette technique est à préparer dès le premier temps chirurgical afin de mettre en place l'entretoise en ciment de façon adéquate. Dans notre série, 4 patients ont bénéficié d'une greffe inter-tibio-fibulaire lors de leur deuxième temps de Masquelet.

Afin de permettre une reconstruction de qualité permettant le retour à un appui total, en particulier pour les reconstructions fémorales ou pour les pertes de substance osseuse de grande taille, nous avons combiné l'utilisation de la fibula vascularisée avec une allogreffe massive, ce qui correspond à la technique de Capanna, pour 7 patients. Cette technique permet de s'affranchir ou du moins de limiter les complications liées à l'utilisation d'un os Cryo préservé, provenant d'un os de banque, telles que les fractures, l'infection ou le retard de consolidation. Aujourd'hui cette technique est utilisée chez l'enfant et on retrouve dans la littérature une consolidation variant entre 7 et 24 mois (27,61–63,124). Dans notre série, le délai médian de consolidation était de 14 mois (2 ;36), 2 patients ont présenté une fracture du greffon et 2 patients ont bénéficié d'une greffe osseuse complémentaire pour retard de consolidation.

Pour la technique de membrane induite, l'utilisation d'allogreffe est possible, sans dépasser 1/3 de la quantité d'autogreffe (47). Une étude préliminaire a été publiée en 2021, concernant la combinaison entre l'allogreffe massive, la fibula vascularisée et la technique de Masquelet, dans les pertes de substance osseuse de grande taille fémorales (>10cm). Dans cette série de 4 patients, la consolidation médiane était de 5,5 mois (4 ;7), avec un appui total médian chiffré à 11 semaines (8 ;12) (159).

La consolidation osseuse est au centre des préoccupations du chirurgien pratiquant une reconstruction osseuse lors de pertes de substances massives. Les facteurs influençant cette consolidation sont nombreux et les techniques pour optimiser cette dernière sont multiples mais non applicables chez tous les patients. La combinaison des techniques est à l'ordre du jour, en particulier la technique de Capanna avec des biomatériaux (61), ou avec la technique de Masquelet (159).

A ce jour, l'autogreffe osseuse dans la technique de Masquelet est le matériau de comblement le plus efficace pour obtenir une consolidation satisfaisante, en raison de sa porosité et des facteurs ostéoinducteurs et ostéoconducteurs qu'elle apporte (18). La recherche clinique aujourd'hui cherche à potentialiser la consolidation, tout en préservant le stock osseux du patient, en combinant un matériau ostéoconducteur et ostéoinducteur. En effet, Bosemark dans une étude préclinique sur modèle murin, évalue l'efficacité d'un scaffold composé d'hydroxyapatite utilisé seul ou en concomitance avec des BMP-7 et/ou des biphosphonates. Il conclue que l'utilisation du « scaffold » avec des BMP-7 et des biphosphonates permettent de créer un volume d'os bien minéralisé et de bonne qualité (69).

Le développement de la bio ingénierie tissulaire a permis également de se pencher sur les expressions génétiques de substances de la membrane induite, afin de se pencher sur

l'intérêt des cellules souches mésenchymateuses et leur intérêt pour améliorer la consolidation (160).

2. Reprise de l'appui

Une reconstruction de qualité doit pouvoir permettre la reprise d'un appui total, sans aide et sans attelle. Dans notre série, l'appui total était obtenu chez 38 patients (82,0%) parmi les 48 ayant eu une reconstruction du membre inférieur. Dans le groupe Masquelet, la médiane de ce délai d'appui total était de 17 mois (2 ;64) et pour le groupe fibula, il était calculé à 13 mois (3 ;92). Un patient de notre série ayant bénéficié d'une reconstruction par la technique de membrane induite pour une pseudarthrose congénitale de la fibula n'a jamais consolidé, mais l'appui total est acquis chez ce patient, sans douleur.

Dans les séries pédiatriques étudiant cette variable retrouvées dans la littérature, la consolidation étant acquise, l'appui total n'est pas toujours observé.

En effet, Pho et al. dans leur série de 5 cas de reconstruction par fibula vascularisée pour pseudarthrose congénitale de tibia, observent 100% de consolidation, cependant tous les patients marchent avec une béquille et/ou un plâtre et un patient n'a pas récupéré l'appui total (161). La série de Romanus en 2000 concernant les reconstructions par fibula des CPT retrouve que 80,0% des patients pouvaient marcher plus d'une heure, 36,0% avaient besoin de béquilles et 41,0% marchaient sans aide (136). Concernant les étiologies tumorales, Zaretski publie en 2004 une série de 30 patients. Le délai d'appui total était de 9,2 mois (3 ;16), et tous les patients marchaient normalement, ou presque normalement (124). Chen en 2007 retrouve un délai d'appui total moyen de 12,6 mois, dans sa population de reconstructions par fibulas, toutes étiologies confondues (129). Dans la série de Hariri, le délai moyen d'appui est calculé à 11,4 mois (1,7 ; 41,0), de façon plus rapide pour le tibia

que pour le fémur et après un temps opératoire, en comparaison avec deux temps opératoires et ce de façon non significative (123). Schwarz retrouve un délai d'appui total de 16 mois en moyenne (9 ;34) et pour 91,0% des patients, l'appui total était acquis à 2 ans post opératoire (128). Sainsbury calcule un délai d'appui moyen à 19,4 mois (4 ;85) pour 72,2% des patients (130).

Concernant la technique de Masquelet, peu de séries pédiatriques sont retrouvées dans la littérature. Gouron et al. publient leur expérience sur 14 cas, toutes étiologies confondues. Le délai médian d'appui total était de 2,5 mois (1 ;8) pour 71,4% des patients. Ces résultats s'accordent avec les résultats retrouvés dans notre série.

3. Inégalité de longueur des membres

Dans la littérature, l'inégalité de longueur des membres est variable et tous les auteurs n'étudient pas cette complication des reconstructions. Les résultats retrouvés sont présentés dans les tableaux 9 et 10.

Dans notre série, nous retrouvons Dans le groupe Masquelet, elle était observée chez 9 patients (39,1%) et dans le groupe fibula chez 16 patients (51,6%). Parmi ces patients, des chirurgies correctives ont été proposées : une épiphysiodèse controlatérale ou un allongement homolatéral sont envisageables pour corriger cette différence de longueur des membres.

Les inégalités de longueur des membres doivent être prises en charges au bon moment afin de permettre de diminuer l'écart entre les deux membres. Les inégalités inférieures ou égales à 2cm ne nécessitent pas de traitement chirurgical, étant donné qu'elles n'entraînent pas de trouble de la statique du tronc. Une compensation dans la chaussure peut être

prescrite selon la gêne fonctionnelle (116). Une épiphysiodèse peut être envisageable pour bloquer la croissance. Il s'agit d'intervenir au bon moment de la croissance, en se référant aux courbes de croissance de Green et Anderson et à l'âge osseux (162).

On retrouve des inégalités de longueur plus importantes dans les populations atteintes de neurofibromatose, reconstruites par la technique de fibula vascularisée. En effet, Pho retrouve 100% d'ILMI avec un écart de 2,5cm en moyenne, et Sakamoto retrouve un écart de 4,9cm en moyenne (137,161). Le transfert libre d'épiphyse fibulaire permettrait de conserver un potentiel de croissance non négligeable dans ces reconstructions (163). Concernant la technique de Masquelet, l'inégalité de longueur des membres est rarement mentionnée, mais non négligeable pour Pannier et al. en 2013 qui retrouvent une inégalité de 2,4cm (0,5 ;4) (144).

4. Séquelles du site donneur

Les deux techniques comparées dans notre étude permettent de reconstruire des pertes de substance osseuse de grande taille. Cependant, lorsque la technique de la membrane induite est envisagée, la quantité d'os au niveau des crêtes iliaques peut être limitée.

L'intérêt de l'utilisation de la technique membrane induite versus celle de la fibula vascularisée réside dans le fait que la membrane induite procure peu ou pas de séquelles du site donneur, ce qui est retrouvé dans notre série. La limite est donc la quantité d'os disponible à greffer pour permettre une reconstruction de grande taille. De plus, deux installations sont nécessaires afin de pouvoir prélever au niveau des crêtes iliaques antérieures et postérieures.

Ahlmann procède à une comparaison de la morbidité des sites donneurs de greffe osseuse, entre la crête iliaque antérieure et postérieure. Il conclue que le prélèvement antérieur procure une douleur prolongée et plus importante que le prélèvement postérieur (164).

La technique de greffe osseuse par RIA (reamer-irrigator-aspirator) permet de prélever une quantité d'os spongieux en quantité, pour réaliser des greffes osseuses qui requièrent un volume important d'os. McCall et al. en 2010 publient un série de 20 cas adultes, présentant une perte de substance de 6,6cm en moyenne (2 ;14,5). En moyenne, 64 cm³ étaient prélevés, dont 37,5 cm³ au niveau du tibia et 67 cm³ au niveau du fémur. Aucune complication du site donneur n'était mentionnée (165). Masquelet en 2012 utilise cette technique et retrouve une quantité d'os prélevée au niveau du fémur, semblable à la quantité prélevée au niveau des deux crêtes iliaques antérieure et postérieure. Cependant, le risque de fracture de fémur est présent (166). Enfin, Sagi compare les effets cellulaires et biochimiques ainsi que les caractéristiques de ces greffes osseuses prélevées via RIA, avec ceux des greffes prélevées au niveau des crêtes. Sur 10 patients, l'os prélevé par RIA possède une quantité plus importante de cellules souches et de facteurs de croissance, ainsi que des niveaux d'expression géniques plus importants. Il retrouve également que les débris générés lors de l'alésage intramédullaire, prélevés par RIA et le greffon osseux prélevé sur la crête iliaque, présentaient un profil transcriptionnel similaire pour les gènes connus pour agir dans les premières étapes de la réparation et de la formation osseuses (167). En outre, une étude préclinique sur 10 cadavres visait à comparer le volume d'os spongieux entre les crêtes iliaques et le tibia proximal. Le volume prélevé était plus important au niveau du tibia proximal (168). Cependant, cette technique n'est pas validée chez l'enfant, des études sont donc nécessaires pour pouvoir l'utiliser en population pédiatrique. Elle permettrait en effet de pouvoir recueillir une quantité d'os supplémentaire lorsque les pertes de substance osseuse sont de grande taille.

En ce qui concerne les complications du site donneur des patients opérés par la technique de fibula vascularisée, dans notre population, nous retrouvons 17,6% de complications. On observait 5 valgus de cheville et un patient présentait une griffe d'hallux persistante. Tous sauf un avaient bénéficié d'une syndesmodèse tibiofibulaire distale.

Les complications du site donneur de cette technique chirurgicale sont largement étudiées dans la littérature (111–113,122,149,169–172), en population pédiatrique également. Il est largement admis que la longueur de fibula distale ne doit pas excéder 5-6cm et qu'une vis de syndesmodèse tibiofibulaire distale peut être mise en place pour prévenir le valgus à ce stade, mais ceci n'est pas consensuel (111–113). Omokawa en 1996 étudie les morbidités du site donneur en population pédiatrique. Dans sa série, il retrouve un cas de valgus malgré la syndesmodèse. De plus, il retrouve un intérêt non négligeable de réaliser une syndesmodèse secondairement lorsque le valgus est constaté, surtout chez les patients de moins de 8 ans (111). Sulaiman retrouve que les enfants de moins de 6 ans ont plus de chance de développer un valgus de cheville, en raison de leur laxité ligamentaire qui augmente la pression sur le cartilage tibial latéral, provoquant un ralentissement de la croissance (170). La reconstruction du defect osseux causé par le prélèvement de fibula a été étudiée afin de minimiser le valgus de cheville. En effet, la possibilité de régénérer la fibula avec du béta-tricalcium phosphate a été étudiée chez 14 patients. Chez l'enfant, ils retrouvaient une réduction de la morbidité du site donneur (173). Gleizal préconise une réparation de la perte de substance par une baguette osseuse tibiale (169). Fragnière a évalué en 2003 le taux de déformation en valgus et a comparé deux méthodes de prévention de cette complication. Il retrouve que la syndesmodèse tibiofibulaire distale procure peu de complication et une efficacité sur la prévention du valgus, tandis que la reconstruction fibulaire par baguette osseuse donne des taux de déformations et complications plus importants (112).

Des séquelles du prélèvement de la fibula peuvent également survenir, comme une paresthésie du nerf fibulaire commun, ou une griffe d'hallux, compte tenu de la proximité de la fibula et de sa dissection avec les structures anatomiques concernées. Dans notre population, nous retrouvons un patient présentant un hallux en griffe résiduel. Cette complication est retrouvée dans 3,0 à 10,0% des cas dans la littérature (118,172).

5. Hypertrophie fibulaire et fractures

L'hypertrophie fibulaire est observée dans notre population de fibulas, pour 50% d'entre elles. En effet, l'intérêt du transfert d'une fibula vascularisée réside dans le fait que l'os étant vivant, il s'intègre dans son environnement de transfert et s'hypertrophie et se remodèle. Cette hypertrophie est causée par la formation de périoste du nouvel os. Lazar retrouve que le degré d'hypertrophie fibulaire est indépendant du diagnostic, du site de transplantation et peut être retrouvé même si l'ostéosynthèse utilisée est une plaque vissée (174). Fujimaki lors d'une étude préclinique compare deux groupes de modèles canins, ayant bénéficié d'une reconstruction par fibula vascularisée ou non. Il retrouve une hypertrophie dans le groupe vascularisé sans excéder le diamètre du tibia receveur. Aucune hypertrophie n'était constatée dans le groupe non vascularisé. Dans son étude clinique, il constatait 47,0% d'hypertrophie fibulaire et rarement une hypertrophie iliaque ou costale, ce qui s'accorde avec les résultats de notre étude. (175). El-Gammal a décrit l'hypertrophie comme une augmentation de plus de 30% de la largeur d'origine en modifiant la formule de De Boer. Il retrouve une corrélation entre les fractures du transplant que nous ne retrouvons pas dans notre série (114).

En effet, le nombre de fracture de transplants de fibula vascularisées dans notre série est évaluée à 45,2% contre 4,3% dans le groupe Masquelet. Il s'agissait pour tous les patients sauf un d'une fracture ne nécessitant pas de traitement chirurgical. Le taux de fracture n'était

pas corrélé à l'administration de radiothérapie ($p < 0,05$). Dans la littérature, le taux de fracture de transplante de fibula varie entre 21,0 et 62,0% (115,123,128,155). Concernant la technique de membrane induite, Masquelet retrouve dans sa série de 11 patients, un taux de fracture de 36,4%, tous traités de façon orthopédique (50). Villemagne constate 5 fractures chez 4 patients (41,6%) dans sa population pédiatrique (145).

6. Score fonctionnel

Le score fonctionnel utilisé dans notre étude est le score MSTS et nous retrouvons dans le groupe fibula un score médian de 23,5 (6 ;29) et dans le groupe membrane induite un score médian de 18/30 (6 ;30). La différence entre les deux populations n'était pas significative ($p=0,23$).

Dans la littérature, les études qui recensent ce score pour les patients bénéficiant d'une reconstruction par fibula vascularisée, exposent des résultats médians entre 21 et 27,2 (118,119,121,123). Pour les études concernant le Masquelet, ce score est très peu utilisé, uniquement par Fitoussi en 2015, rapportant un score médian de 74,0% (67 ;80) ce qui signifie une médiane de 22,2/30 (133).

Ce score nous permet de juger de façon objective la récupération de nos patients, mais ce qui s'avère être le plus important est le retour aux activités de la vie courante, ce qui est le cas chez l'ensemble de nos patients vivants.

7. Autres résultats

a. Reprise scolaire et des activités sportives

Dans notre série, le retour à l'école était significativement plus long dans la population opérée par la technique de fibula vascularisée. Ceci peut s'expliquer par le fait que la

majorité des patients opérés par cette technique présentait une tumeur maligne, nécessitant un traitement adjuvant et provoquant une faiblesse accrue du patient. De plus, nos patients ont pu participer à des cours scolaires à domicile durant leur période de consolidation.

Le retour aux activités sportives a été possible pour 67,9% patients opérés d'une fibula vascularisée et pour 53,6% du groupe Masquelet. Sainsbury dans sa série de 18 cas retrouve 50,0% de patients pratiquant des activités sportives (130) et Schwarz en retrouve 83,3% (128)

Cette variable n'est pas retrouvée dans les études pédiatriques concernant la technique de Masquelet.

b. Aspect des cicatrices et douleur

L'aspect des cicatrices a été évaluée chez nos patients et leurs parents, de façon subjective. Dans le groupe fibula, les patients était statistiquement plus satisfaits de la qualité de leurs cicatrices, en comparaison avec les patients du groupe membrane induite. Ceci peut-être expliqué par le fait que les patients reconstruits pas la technique de Masquelet nécessitent au minimum deux interventions, utilisant la même voie d'abord, ce qui fragilise le tissu cutané et sous-cutané et provoque une inflammation (176).

La douleur était présente chez 3 patients du groupe fibula, gênés pour les activité physiques ou intenses. Dans le groupe membrane induite, la douleur était présente pour 7 patients, mais aucun traitement médicamenteux n'était administré au quotidien.

Auteur / Année	n=	Suivi moyen (mois)	Age moyen	Étiologie	Taille de la PDS	Consolidation	ILM	MSTS moyen
Pho / 1985	5	17,5 (5 ;34)	5 (1,5 ;23)	CPT	-	100%	100%	-
Weiland / 1990	19	75,6 (24 ;132)	5,1 (1,4 ;11,4)	-	-	95%	1,6 cm (0 ;4)	-
Germain / 1996	19	36 (12,120)	9,5	Sarcome	200 (110 ;320)	-	-	-
Hsu / 1997	30	36	30 (10-60)	Tumeur	129mm (80-240)	7,6 mois 76,7% en un temps	-	-
Minami / 2000	104	-	-	Toutes	-	4 (2 ;10) 96,5%	-	-
Romanus / 2000	40	-	-	CPT	110 (40-250)	61%	57,5%	-
El-Gammal / 2003	11	38	-	Sarcome	148 (90 ;200)	3,9 mois (3 ;8)	1cm	23
Zaretski / 2004	30	-	23 (9 ;70)	Sarcome	-	2,6 ;8	-	-
Laffosse / 2007	13	50 (12 ;144)	12 (4 ;17)	Tumeur	-	841 84,6%	-	21 (7 ;29)
Germain / 2007	79	76 (24 ;216)	8,2 (4 ;17)	CPT et sarcome	190 (110 ;300)	9,3	-	26,5 ;30
Chen / 2007	25	>6	-	Sarcome	-	78%	-	-
Sakamoto / 2008	8	11,7 (4,9 ;10,6)	7 (1,9 ;11,5)	CPT	-	6,6 (4 ;10)	4,9 cm (0 ;15,7)	-
Korompilas / 2009	9	108 (24 ;180)	6,5 (1 ;12)	CPT	-	3,7 (1,5 ;6), 78%	<2cm	-
Herni / 2009	10	80 (12 ;960)	20 mois (12 ;31)	CPT	70 -90	90%	20%	-
Hariri / 2010	38	91 (4,8 ;220)	-	Tumeur	-	20,4 (2,4 ;126) 89%	-	27,2 (20 ;30)
Eward / 2010	30	58,8 (24 ;180)	-	Tumeur	148	77% 9,2 mois	-	-
Schwarz / 2012	13	63 (8 ;168)	12,6 (6 ;17)	Tumeur	-	10	-	-
Sainsbury / 2014	19	57 (9 ;72)	10 (1,5 ;17)	Sarcome	-	24 (9 ;72)	-	-
Taylor / 2016	384	-	-	Toutes	1,5 -2	-	-	-
Houdek / 2017	109	-	33 (5-78)	Toutes	-	91%	-	-
Présente étude	34	72 (16 ;158)	10,5 (2,3 ;16,3)	Toutes	137,5 (50 ;300)	10 (2 ;55) 85,3%	16 (51,6%)	23,5/30

Tableau 9. Analyse des résultats de reconstruction par fibula vascularisée en population pédiatrique

Auteur / Année	n=	Suivi moyen (mois)	Age moyen	Étiologie	Taille de la PDS	Consolidation	ILM	MSTS
Biau 2009	1	-	12	Ewing	-	100%	-	-
Gouron 2011	1	14	8 mois	CPT	65	100%	0%	-
Gouron 2013	14	30 (1 ;63)	10,6 (12 ;17)	Toutes	32,8% (13,9 ;51)	9,5 (2 ;25) 65%	-	-
Pannier 2013	5	69 (28,8 ;97)	23 (10-30)	CPT	-	100% 4 mois	2,4 (0,5 ;4)	-
Fitoussi 2015	8	47,1 (24-120)	13,3 (11 ;17)	Tumeur	180 (160 ;230)	5,6 mois (4-8)	-	74% (67-80)
Alassaf 2017	1	-	11	Traumatique	-	100%	-	-
Mansour 2017	8	12-84	3-16	Toutes	50-140	75%	-	-
Présente étude	23	36 (12 ;108)	13 (11,2 ;18,5)	Toutes	120 (18 ;260)	7,5 (2 ;55) 95,0%	39,0%	18/30

Tableau 10. Analyse des résultats de reconstruction par fibula vascularisée en population pédiatrique

CAS CLINIQUES



A



B



C



D



E

Patiente présentant un sarcome d'Ewing du tibia distal droit (A). La reconstruction a été effectuée par la technique de Capanna à l'âge de 3 ans et 4 mois, en utilisant la fibula homolatérale (B). La consolidation est acquise en 15 mois (C). Le délai d'appui était de 16 mois. La patiente pratique la danse, elle ne présente pas de douleur. Il existe une inégalité

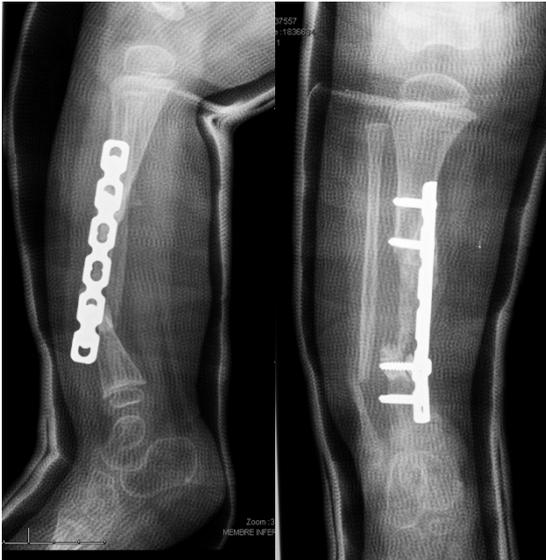
de longueur des membres inférieurs chiffrée à 7cm pour laquelle un projet d'allongement est programmé pour 2022 (D). Elle juge ses cicatrices assez belles (E).



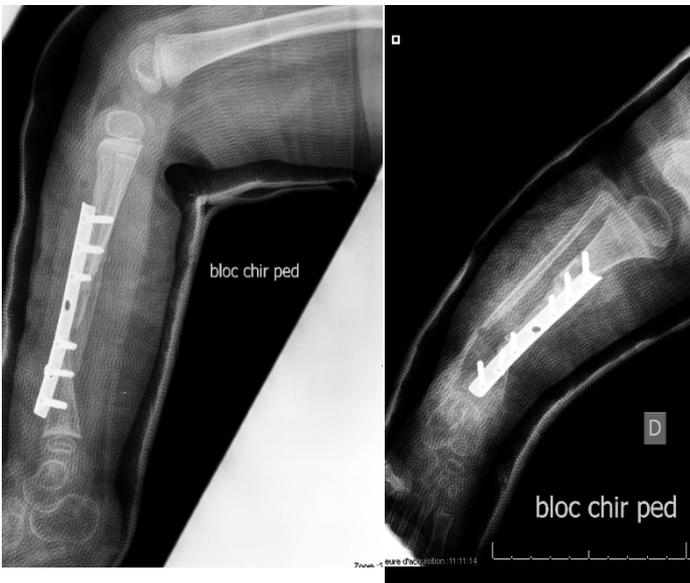
A Premier temps de membrane induite, PDS = 4,2cm, 31,3% du membre, à l'âge de 22 mois, sur une pseudarthrose congénitale de tibia et fibula



B Deuxième temps de membrane induite avec autogreffe spongieuse.



C Déplacement de l'ostéosynthèse à 4 mois.



D Reprise chirurgicale pour remplacement du matériel et greffe



E Déplacement de l'ostéosynthèse et pseudarthrose



F Changement de méthode de fixation



G Mise en place d'un clou centromédullaire télescopique



H Consolidation acquise à 24 mois



I Appui total acquis à 37 mois post opératoire.
ILMI chiffrée à 4 cm.
Elle pratique l'équitation.
Un allongement du membre opéré est prévu pour l'adolescence.



J Elle juge sa cicatrice disgracieuse.

CONCLUSION

En population pédiatrique, les techniques de reconstruction osseuses exposées ci-dessus, à savoir la technique de la membrane induite décrite par Masquelet et la fibula vascularisée, sont validées pour traiter des pertes de substance osseuse de grande taille. En effet, l'exérèse large des tumeurs osseuses, des anomalies osseuses ou des pseudarthroses congénitales, la reconstruction solide et de qualité, ainsi que la récupération fonctionnelle du membre sont des objectifs atteignables en reconstruction chez l'enfant.

Cependant, la taille limite de greffe osseuse seule exposée dans la littérature concerne l'adulte, l'indication de ces deux techniques de reconstruction, plus complexes que l'autogreffe simple, est donc difficile à définir.

Les avantages que nous retenons du transfert libre de fibula vascularisée sont nombreux, en particulier la capacité de reconstruire des pertes de substance de grande taille, tout en limitant le taux de séquelles du site donneur et permettant l'administration de traitement adjuvant, sans retarder de façon significative le deuxième temps opératoire et donc la consolidation. La membrane induite possède également des points forts, tels que l'absence de complication du site donneur et la facilité de sa technique, évitant la microchirurgie.

Cependant, la technique selon Masquelet nécessite impérativement deux temps opératoires, et la quantité d'os disponible peut être insuffisante, surtout pour les pertes de substance de grande taille.

Néanmoins, nous retrouvons dans nos deux populations des résultats satisfaisants sur le plan de la consolidation, du taux de complications, des résultats fonctionnels, permettant

aux patients un retour aux activités de la vie courante et souvent une capacité à pouvoir participer à des activités sportives.

Les perspectives en reconstruction osseuse sont nombreuses, notamment grâce à l'avènement de l'ingénierie tissulaire, des protéines ostéoinductrices et de la bio impression. Une association des techniques commence également à voir le jour, afin de pallier aux défauts de consolidation, présents dans les deux techniques.

BIBLIOGRAPHIE

1. Simon MA, Aschliman MA, Thomas N, Mankin HJ. Limb-salvage treatment versus amputation for osteosarcoma of the distal end of the femur. *J Bone Joint Surg Am.* déc 1986;68(9):1331-7.
2. Rougraff BT, Simon MA, Kneisl JS, Greenberg DB, Mankin HJ. Limb salvage compared with amputation for osteosarcoma of the distal end of the femur. A long-term oncological, functional, and quality-of-life study. *J Bone Joint Surg Am.* mai 1994;76(5):649-56.
3. Davis AM, Devlin M, Griffin AM, Wunder JS, Bell RS. Functional outcome in amputation versus limb sparing of patients with lower extremity sarcoma: A matched case-control study. *Arch Phys Med Rehabil.* juin 1999;80(6):615-8.
4. Nagarajan R, Neglia JP, Clohisy DR, Robison LL. Limb Salvage and Amputation in Survivors of Pediatric Lower-Extremity Bone Tumors: What Are the Long-Term Implications? *J Clin Oncol.* 15 nov 2002;20(22):4493-501.
5. Postma A, Kingma A, De Ruiter JH, Koops HS, Veth RPH, Goëken LNH, et al. Quality of life in bone tumor patients comparing limb salvage and amputation of the lower extremity. *J Surg Oncol.* sept 1992;51(1):47-51.
6. Weddington WW, Segraves KB, Simon MA. Psychological outcome of extremity sarcoma survivors undergoing amputation or limb salvage. *J Clin Oncol.* oct 1985;3(10):1393-9.
7. DiCaprio MR, Friedlaender GE. Malignant bone tumors: limb sparing versus amputation. *J Am Acad Orthop Surg.* févr 2003;11(1):25-37.
8. Hosalkar HS, Dormans JP. Limb sparing surgery for pediatric musculoskeletal tumors. *Pediatr Blood Cancer.* avr 2004;42(4):295-310.
9. Mauffrey C, Barlow BT, Smith W. Management of Segmental Bone Defects. *J Am Acad Orthop Surg.* 1 mars 2015;23(3):143-53.
10. Sales de Gauzy J, Fitoussi F, Jouve J-L, Karger C, Badina A, Masquelet A-C. Traumatic diaphyseal bone defects in children. *Orthop Traumatol Surg Res.* avr 2012;98(2):220-6.
11. Grill F, Bollini G, Dungal P, Fixsen J, Hefti F, Ippolito E, et al. Treatment Approaches for Congenital Pseudarthrosis of Tibia: Results of the EPOS Multicenter Study: *J Pediatr Orthop B.* avr 2000;9(2):75-89.
12. Jacob LM, Dong W, Chang DW. Outcomes of Reconstructive Surgery in Pediatric Oncology Patients: Review of 10-Year Experience. *Ann Surg Oncol.* oct 2010;17(10):2563-9.
13. Ginsberg JP, Rai SN, Carlson CA, Meadows AT, Hinds PS, Spearing EM, et al. A comparative analysis of functional outcomes in adolescents and young adults with lower-extremity bone sarcoma. *Pediatr Blood Cancer.* déc 2007;49(7):964-9.

14. Grimer RJ. Surgical options for children with osteosarcoma. *Lancet Oncol.* févr 2005;6(2):85-92.
15. Marulanda GA, Henderson ER, Johnson DA, Letson GD, Cheong D. Orthopedic Surgery Options for the Treatment of Primary Osteosarcoma. *Cancer Control.* janv 2008;15(1):13-20.
16. Ohnishi I, Sato W, Matsuyama J, Yajima H, Haga N, Kamegaya M, et al. Treatment of Congenital Pseudarthrosis of the Tibia: A Multicenter Study in Japan. *J Pediatr Orthop.* mars 2005;25(2):219-24.
17. Hertel R, Gerber A, Schlegel U, Cordey J, Rügsegger P, Rahn BA. 10. Cancellous bone graft for skeletal reconstruction Muscular versus periosteal bed — Preliminary report. *Injury.* janv 1994;25:SA59-70.
18. Weiland AJ, Phillips TW, Randolph MA. Bone grafts: a radiologic, histologic, and biomechanical model comparing autografts, allografts, and free vascularized bone grafts. *Plast Reconstr Surg.* sept 1984;74(3):368-79.
19. Taylor GI, Corlett RJ, Ashton MW. The Evolution of Free Vascularized Bone Transfer: A 40-Year Experience. *Plast Reconstr Surg.* avr 2016;137(4):1292-305.
20. 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.
21. Pelissier P, Boireau P, Martin D, Baudet J. Bone Reconstruction of the Lower Extremity: Complications and Outcomes: *Plast Reconstr Surg.* juin 2003;111(7):2223-9.
22. Taylor GI, Miller GDH, Ham FJ. THE FREE VASCULARIZED BONE GRAFT: A Clinical Extension of Microvascular Techniques. *Plast Reconstr Surg.* mai 1975;55(5):533-44.
23. McKee DM. Microvascular bone transplantation. *Clin Plast Surg.* avr 1978;5(2):283-92.
24. Gilbert A. Gilbert A. Surgical technique vascularized transfert of the fibula shaft.
25. Chen Z-W, Yan W. The study and clinical application of the osteocutaneous flap of fibula. *Microsurgery.* 1983;4(1):11-6.
26. 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.
27. Capanna R, Bufalini C, Campanacci M. A new technique for reconstructions of large metadiaphyseal bone defects: A combined graft (Allograft shell plus vascularized fibula). *Orthop Traumatol.* sept 1993;2(3):159-77.
28. Harii K, Ohmori K. FREE GROIN FLAPS IN CHILDREN: *Plast Reconstr Surg.* mai 1975;55(5):588-92.
29. Serletti JM, Schingo VA, Deuber MA, Carras AJ, Herrera HR, Reale VF. Free Tissue Transfer in Pediatric Patients: *Ann Plast Surg.* juin 1996;36(6):561-8.

30. Upton J, Guo L. Pediatric Free Tissue Transfer: A 29-Year Experience with 433 Transfers: *Plast Reconstr Surg.* mai 2008;121(5):1725-37.
31. Duteille F. Présent et futur de la microchirurgie en chirurgie infantile. 2015;
32. Organeek A, Klebuc M, Zuker R. Indications and Outcomes of Free Tissue Transfer to the Lower Extremity in Children: Review. *J Reconstr Microsurg.* 6 juill 2006;22(03):173-82.
33. Duteille F, Lim A, Dautel G. Free Flap Coverage of Upper and Lower Limb Tissue Defects in Children: A Series of 22 Patients: *Ann Plast Surg.* avr 2003;50(4):344-9.
34. Bouffaut A-L, Hamel A, Guillard S, Pannier M, Duteille F. Utilisation de lambeaux libres dans la reconstruction des membres inférieurs chez l'enfant. *Ann Chir Plast Esthét.* juin 2008;53(3):267-71.
35. Duteille F, Yeo S, Perrot P. Microchirurgie chez l'enfant. *Ann Chir Plast Esthét.* oct 2016;61(5):770-8.
36. Donski PK, Buechler U, Tschopp HM. Surgical dissection of the fibula for free microvascular transfer. *Chir Plast.* 1982;6(3):153-64.
37. Guo F. Observations of the blood supply to the Fibula. *Arch Orthop Trauma Surg.* avr 1981;98(2):147-51.
38. Edstrom LE. Microvascular Reconstructive Surgery by B. M. O'Brien. *Perspect Biol Med.* 1979;22(3):460-460.
39. Klaue. Biological implementation of « in situ » induced autologous foreign body membranes in consolidation of massive cancellous bone grafts. 1993;
40. Pelissier PH, Masquelet AC, Bareille R, Pelissier SM, Amedee J. Induced membranes secrete growth factors including vascular and osteoinductive factors and could stimulate bone regeneration. *J Orthop Res.* janv 2004;22(1):73-9.
41. Giannoudis PV, Faour O, Goff T, Kanakaris N, Dimitriou R. Masquelet technique for the treatment of bone defects: Tips-tricks and future directions. *Injury.* juin 2011;42(6):591-8.
42. Viateau V, Guillemin G, Calando Y, Logeart D, Oudina K, Sedel L, et al. Induction of a Barrier Membrane to Facilitate Reconstruction of Massive Segmental Diaphyseal Bone Defects: An Ovine Model. *Vet Surg.* juill 2006;35(5):445-52.
43. Viateau V, Bensidhoum M, Guillemin G, Petite H, Hannouche D, Anagnostou F, et al. Use of the Induced Membrane Technique for Bone Tissue Engineering Purposes: Animal Studies. *Orthop Clin North Am.* janv 2010;41(1):49-56.
44. Henrich D, Seebach C, Nau C, Basan S, Relja B, Wilhelm K, et al. Establishment and characterization of the Masquelet induced membrane technique in a rat femur critical-sized defect model: Characterization of membranes induced around a bone defect. *J Tissue Eng Regen Med.* oct 2016;10(10):E382-96.
45. Gouron R, Petit L, Boudot C, Six I, Brazier M, Kamel S, et al. Osteoclasts and their precursors are present in the induced-membrane during bone reconstruction using

- the Masquelet technique: Presence of osteoclasts in the induced-membrane. *J Tissue Eng Regen Med.* févr 2017;11(2):382-9.
46. Gugala Z, Gogolewski S. Regeneration of Segmental Diaphyseal Defects in Sheep Tibiae Using Resorbable Polymeric Membranes: A Preliminary Study: *J Orthop Trauma.* mars 1999;13(3):187-95.
 47. Masquelet A, Kanakaris NK, Obert L, Stafford P, Giannoudis PV. Bone Repair Using the Masquelet Technique: *J Bone Jt Surg.* juin 2019;101(11):1024-36.
 48. Karger C, Kishi T, Schneider L, Fitoussi F, Masquelet A-C. Treatment of posttraumatic bone defects by the induced membrane technique. *Orthop Traumatol Surg Res.* févr 2012;98(1):97-102.
 49. Cypher TJ, Grossman JP. Biological principles of bone graft healing. *J Foot Ankle Surg.* sept 1996;35(5):413-7.
 50. Masquelet AC, Begue T. The Concept of Induced Membrane for Reconstruction of Long Bone Defects. *Orthop Clin North Am.* janv 2010;41(1):27-37.
 51. Khan SN, Cammisa FP, Sandhu HS, Diwan AD, Girardi FP, Lane JM. The biology of bone grafting. *J Am Acad Orthop Surg.* févr 2005;13(1):77-86.
 52. Goldberg VM, Stevenson S. The biology of bone grafts. *Semin Arthroplasty.* avr 1993;4(2):58-63.
 53. Yang R-S. ENDOPROSTHESIS-RELATED COMPLICATIONS AFTER LIMB-SALVAGE OPERATION OF MALIGNANT BONE TUMORS AROUND THE KNEE. *Biomed Eng Appl Basis Commun.* 25 juin 2004;16(03):133-42.
 54. Fujiwara T, Ebihara T, Kitade K, Setsu N, Endo M, Iida K, et al. Risk Factors of Periprosthetic Infection in Patients with Tumor Prostheses Following Resection for Musculoskeletal Tumor of the Lower Limb. *J Clin Med.* 28 sept 2020;9(10):3133.
 55. Ilizarov GA, Ledyayev VI. The replacement of long tubular bone defects by lengthening distraction osteotomy of one of the fragments. 1969. *Clin Orthop.* juill 1992;(280):7-10.
 56. Damsin JP, Ghanem I, Carlouz H. [Contribution of Ilizarov's equipment in the treatment of congenital pseudarthrosis of the lower limb]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot.* 1996;82(1):34-41.
 57. Paley D, Catagni M, Argnani F, Prevot J, Bell D, Armstrong P. Treatment of congenital pseudoarthrosis of the tibia using the Ilizarov technique. *Clin Orthop.* juill 1992;(280):81-93.
 58. Boero S, Catagni M, Donzelli O, Facchini R, Frediani PV. Congenital Pseudarthrosis of the Tibia Associated with Neurofibromatosis-1: Treatment with Ilizarov's Device: *J Pediatr Orthop.* sept 1997;17(5):675-84.
 59. 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. *Williams BO, éditeur. PLOS ONE.* 3 nov 2015;10(11):e0141973.

60. Mankin HJ, Gebhardt MC, Jennings LC, Springfield DS, Tomford WW. Long-Term Results of Allograft Replacement in the Management of Bone Tumors: Clin Orthop. mars 1996;324:86-97.
61. 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.
62. Moran SL, Shin AY, Bishop AT. The Use of Massive Bone Allograft with Intramedullary Free Fibular Flap for Limb Salvage in a Pediatric and Adolescent Population: Plast Reconstr Surg. août 2006;118(2):413-9.
63. Jager T, Journeau P, Dautel G, Barbary S, Haumont T, Lascombes P. Is combining massive bone allograft with free vascularized fibular flap the children's reconstruction answer to lower limb defects following bone tumour resection? Orthop Traumatol Surg Res. juin 2010;96(4):340-7.
64. Chiron. Protéines inductrices de l'os. 2004;
65. Viateau V, Guillemin G, Bousson V, Oudina K, Hannouche D, Sedel L, et al. Long-bone critical-size defects treated with tissue-engineered grafts: A study on sheep. J Orthop Res. juin 2007;25(6):741-9.
66. Lee FY-I, Sinicropi SM, Lee FS, Vitale MG, Roye DP, Choi IH. Treatment of Congenital Pseudarthrosis of the Tibia with Recombinant Human Bone Morphogenetic Protein-7 (rhBMP-7): A Report of Five Cases. JBJS Case Connect. 1 mars 2006;os-88(3):627-33.
67. Khan SN, Lane JM. The use of recombinant human bone morphogenetic protein-2 (rhBMP-2) in orthopaedic applications. Expert Opin Biol Ther. mai 2004;4(5):741-8.
68. Dohin B, Dahan-Oliel N, Fassier F, Hamdy R. Enhancement of Difficult Nonunion in Children with Osteogenic Protein-1 (OP-1): Early Experience. Clin Orthop Relat Res. déc 2009;467(12):3230-8.
69. Bosemark P, Perdikouri C, Pelkonen M, Isaksson H, Tägil M. The masquetelet induced membrane technique with BMP and a synthetic scaffold can heal a rat femoral critical size defect. J Orthop Res Off Publ Orthop Res Soc. avr 2015;33(4):488-95.
70. Malizos KN, Papatheodorou LK. The healing potential of the periosteum. Injury. nov 2005;36(3):S13-9.
71. Codivilla. ON THE CURE OF THE CONGENITAL PSEUDOARTHROSIS OF THE TIBIA BY MEANS OF PERIOSTEAL TRANSPLANTATION.
72. Weber. Congenital Pseudarthrosis of the Tibia: Redefined (Congenital Crural Segmental Dysplasia).
73. Thabet AM, Paley D, Kocaoglu M, Eralp L, Herzenberg JE, Ergin ON. Periosteal Grafting for Congenital Pseudarthrosis of the Tibia: A Preliminary Report. Clin Orthop. déc 2008;466(12):2981-94.

74. Gallardo-Calero I, Barrera-Ochoa S, Manzanares MC, Sallent A, Vicente M, López-Fernández A, et al. Vascularized Periosteal Flaps Accelerate Osteointegration and Revascularization of Allografts in Rats. *Clin Orthop*. avr 2019;477(4):741-55.
75. Shi H, Xiong J, Chen Y, Wang J, Qiu X, Wang Y, et al. Early application of pulsed electromagnetic field in the treatment of postoperative delayed union of long-bone fractures: a prospective randomized controlled study. *BMC Musculoskelet Disord*. déc 2013;14(1):35.
76. Assiotis A, Sachinis NP, Chalidis BE. Pulsed electromagnetic fields for the treatment of tibial delayed unions and nonunions. A prospective clinical study and review of the literature. *J Orthop Surg*. déc 2012;7(1):24.
77. Ross CL, Siriwardane M, Almeida-Porada G, Porada CD, Brink P, Christ GJ, et al. The effect of low-frequency electromagnetic field on human bone marrow stem/progenitor cell differentiation. *Stem Cell Res*. juill 2015;15(1):96-108.
78. Registre national des cancers de l'enfant.
79. Meyers PA, Gorlick R. OSTEOSARCOMA. *Pediatr Clin North Am*. août 1997;44(4):973-89.
80. Kim HJ, Chalmers PN, Morris CD. Pediatric osteogenic sarcoma. *Curr Opin Pediatr*. févr 2010;22(1):61-6.
81. Bielack SS, Kempf-Bielack B, Delling G, Exner GU, Flege S, Helmke K, et al. Prognostic Factors in High-Grade Osteosarcoma of the Extremities or Trunk: An Analysis of 1,702 Patients Treated on Neoadjuvant Cooperative Osteosarcoma Study Group Protocols. *J Clin Oncol*. 1 févr 2002;20(3):776-90.
82. Link MP, Goorin AM, Miser AW, Green AA, Pratt CB, Belasco JB, et al. The Effect of Adjuvant Chemotherapy on Relapse-Free Survival in Patients with Osteosarcoma of the Extremity. *N Engl J Med*. 19 juin 1986;314(25):1600-6.
83. Ewing J. THE CLASSIC: Diffuse Endothelioma of Bone: *Clin Orthop*. sept 2006;450:25-7.
84. Grier HE. THE EWING FAMILY OF TUMORS. *Pediatr Clin North Am*. août 1997;44(4):991-1004.
85. Grier HE, Krailo MD, Tarbell NJ, Link MP, Fryer CJH, Pritchard DJ, et al. Addition of Ifosfamide and Etoposide to Standard Chemotherapy for Ewing's Sarcoma and Primitive Neuroectodermal Tumor of Bone. *N Engl J Med*. 20 févr 2003;348(8):694-701.
86. EURO-EWING 99: European Ewing Tumour Working Initiative of National Groups.
87. Lucas DR. Dahlin's Bone Tumors: General Aspects and Data on 11,087 Cases. *Am J Clin Pathol*. 1 nov 1996;106(5):693-693.
88. Roque P, Mankin HJ, Rosenberg A. Adamantinoma: an unusual bone tumour. *Chir Organi Mov*. déc 2008;92(3):149-54.

89. BRAUD, P1 ; TOMENO, B; COURPIED, J. P; RAMADIER, J. O; FAGOT, J; FOREST, M; D'AUBIGNE, R. M. Adamantinoma of the long bones. Seven cases treated by en bloc resection (en).
90. Pannier S. Congenital pseudarthrosis of the tibia. *Orthop Traumatol Surg Res.* nov 2011;97(7):750-61.
91. Aegerter Ernest. THE POSSIBLE RELATIONSHIP OF NEUROFIBROMATOSIS, CONGENITAL PSEUDARTHROSIS, AND FIBROUS DYSPLASIA.
92. Boyd HB. Pathology and natural history of congenital pseudarthrosis of the tibia. *Clin Orthop.* juin 1982;(166):5-13.
93. Crawford AH, Bagamery N. Osseous Manifestations of Neurofibromatosis in Childhood: *J Pediatr Orthop.* janv 1986;6(1):72-88.
94. Hermanns-Sachweh B, Senderek J, Alfer J, Klosterhalfen B, Büttner R, Füzesi L, et al. Vascular changes in the periosteum of congenital pseudarthrosis of the tibia. *Pathol - Res Pract.* mai 2005;201(4):305-12.
95. Cho T-J, Seo J-B, Lee HR, Yoo WJ, Chung CY, Choi IH. Biologic Characteristics of Fibrous Hamartoma from Congenital Pseudarthrosis of the Tibia Associated with Neurofibromatosis Type 1: *J Bone Jt Surg-Am Vol.* déc 2008;90(12):2735-44.
96. Inan M, El Rassi G, Riddle EC, Kumar SJ. Residual Deformities Following Successful Initial Bone Union in Congenital Pseudoarthrosis of the Tibia. *J Pediatr Orthop.* mai 2006;26(3):393-9.
97. 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;1457-66.
98. Masquelet A-C. Traitement des pertes de substance osseuse diaphysaires post-traumatiques. *Rev Chir Orthopédique Réparatrice Apparat Mot.* nov 2007;93(7):28.
99. Salai M, Horoszowski H, Pritsch (Perry) M, Amit Y. Primary reconstruction of traumatic bony defects using allografts. *Arch Orthop Trauma Surg.* 15 nov 1999;119(7-8):435-9.
100. Levin SL. Vascularized Fibula Graft for the Traumatically Induced Long-Bone Defect: *J Am Acad Orthop Surg.* oct 2006;14(Supplement):S175-6.
101. Giannoudis PV, Harwood PJ, Tosounidis T, Kanakaris NK. Restoration of long bone defects treated with the induced membrane technique: protocol and outcomes. *Injury.* déc 2016;47:S53-61.
102. Perna F, Pilla F, Nanni M, Berti L, Lullini G, Traina F, et al. Two-stage surgical treatment for septic non-union of the forearm. *World J Orthop.* 2017;8(6):471.
103. Powerski M, Maier B, Frank J, Marzi I. Treatment of severe osteitis after elastic intramedullary nailing of a radial bone shaft fracture by using cancellous bone graft in Masquelet technique in a 13-year-old adolescent girl. *J Pediatr Surg.* août 2009;44(8):e17-9.

104. 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):e188-93.
105. Wang X, Luo F, Huang K, Xie Z. Induced membrane technique for the treatment of bone defects due to post-traumatic osteomyelitis. *Bone Jt Res*. mars 2016;5(3):101-5.
106. Huvos AG, Rosen G, Marcove RC. Primary osteogenic sarcoma: pathologic aspects in 20 patients after treatment with chemotherapy en bloc resection, and prosthetic bone replacement. *Arch Pathol Lab Med*. janv 1977;101(1):14-8.
107. Enneking WF, Dunham W, Gebhardt MC, Malawar M, Pritchard DJ. A system for the functional evaluation of reconstructive procedures after surgical treatment of tumors of the musculoskeletal system. *Clin Orthop*. janv 1993;(286):241-6.
108. Yoshimura M, Shimamura K, Iwai Y, Yamauchi S, Ueno T. Free vascularized fibular transplant. A new method for monitoring circulation of the grafted fibula. *J Bone Joint Surg Am*. déc 1983;65(9):1295-301.
109. 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.
110. 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.
111. Omokawa S, Tamai S, Takakura Y, Yajima H, Kawanishi K. A long-term study of the donor-site ankle after vascularized fibula grafts in children. *Microsurgery*. 1996;17(3):162-6.
112. Fagniere B, Wicart P, Mascard E, Dubousset J. Prevention of Ankle Valgus After Vascularized Fibular Grafts in Children: *Clin Orthop*. mars 2003;408:245-51.
113. Kanaya K, Wada T, Kura H, Yamashita T, Usui M, Ishii S. Valgus Deformity of the Ankle Following Harvesting of a Vascularized Fibular Graft in Children. *J Reconstr Microsurg*. 2002;18(2):091-6.
114. El-Gammal TA, El-Sayed A, Kotb MM. Hypertrophy after free vascularized fibular transfer to the lower limb. *Microsurgery*. 2002;22(8):367-70.
115. de Boer H, Wood M. Bone changes in the vascularised fibular graft. *J Bone Joint Surg Br*. mai 1989;71-B(3):374-8.
116. Hamel A. Inégalité de longueur des membres inférieurs chez l'enfant. 2004;
117. Cariou JL. [The peroneal or fibular free flaps. Surgical anatomy, operative procedures and indications]. *Ann Chir Plast Esthet*. juin 2000;45(3):219-71.
118. Laffosse J-M, Accadbled F, Abid A, Kany J, Darodes P, Sales De Gauzy J. [Reconstruction of long bone defects with a vascularized fibular graft after tumor resection in children and adolescents: thirteen cases with 50-month follow-up]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*. oct 2007;93(6):555-63.

119. Germain MA, Mascard E, Dubousset J, Nguefack M. Free vascularized fibula and reconstruction of long bones in the child--our evolution. *Microsurgery*. 2007;27(5):415-9.
120. Vigouroux F, Mezzadri G, Parot R, Gazarian A, Pannier S, Chotel F. Vascularised fibula or induced membrane to treat congenital pseudarthrosis of the Tibia: A multicentre study of 18 patients with a mean 9.5-year follow-up. *Orthop Traumatol Surg Res*. sept 2017;103(5):747-53.
121. El-Gammal TA, El-Sayed A, Kotb MM. Reconstruction of lower limb bone defects after sarcoma resection in children and adolescents using free vascularized fibular transfer. *J Pediatr Orthop Part B*. juill 2003;12(4):233-43.
122. Hsu RW-W, Wood MB, Sim FH, Chao EYS. FREE VASCULARISED FIBULAR GRAFTING FOR RECONSTRUCTION AFTER TUMOUR RESECTION. *J Bone Joint Surg Br*. janv 1997;79-B(1):36-42.
123. 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.
124. Zaretski A, Amir A, Meller I, Leshem D, Kollender Y, Barnea Y, et al. Free fibula long bone reconstruction in orthopedic oncology: a surgical algorithm for reconstructive options. *Plast Reconstr Surg*. juin 2004;113(7):1989-2000.
125. Shea KG, Coleman DA, Scott SM, Coleman SS, Christianson M. Microvascularized free fibular grafts for reconstruction of skeletal defects after tumor resection. *J Pediatr Orthop*. août 1997;17(4):424-32.
126. Germain MA, Dubousset J, Mascard E, Missenard G, Kalifa C. [Reconstruction of the long bones of the legs in children via free vascularized transplant of the fibula after resection for sarcoma]. *Bull Acad Natl Med*. mai 1996;180(5):1125-41; discussion 1141-1145.
127. Hubert DM, Low DW, Serletti JM, Chang B, Dormans JP. Fibula Free Flap Reconstruction of the Pelvis in Children after Limb-Sparing Internal Hemipelvectomy for Bone Sarcoma: *Plast Reconstr Surg*. janv 2010;125(1):195-200.
128. Schwarz GS, Disa JJ, Mehrara BJ, Healey JH, Cordeiro PG. Reconstruction of Oncologic Tibial Defects in Children Using Vascularized Fibula Flaps: *Plast Reconstr Surg*. janv 2012;129(1):195-206.
129. 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.
130. Sainsbury DCG, Liu EH, Alvarez-Veronesi MC, Ho ES, Hopyan S, Zuker RM, et al. Long-term outcomes following lower extremity sarcoma resection and reconstruction with vascularized fibula flaps in children. *Plast Reconstr Surg*. oct 2014;134(4):808-20.
131. Eward WC, Kontogeorgakos V, Levin LS, Brigman BE. Free Vascularized Fibular Graft Reconstruction of Large Skeletal Defects after Tumor Resection. *Clin Orthop*. févr 2010;468(2):590-8.

132. Chotel F, Nguiabanda L, Braillon P, Kohler R, Bérard J, Abelin-Genevois K. Induced membrane technique for reconstruction after bone tumor resection in children: a preliminary study. *Orthop Traumatol Surg Res OTSR*. mai 2012;98(3):301-8.
133. Fitoussi F, Ilharreborde B. Is the Induced-membrane Technique Successful for Limb Reconstruction After Resecting Large Bone Tumors in Children? *Clin Orthop*. juin 2015;473(6):2067-75.
134. Biau DJ, Pannier S, Masquelet AC, Glorion C. Case Report: Reconstruction of a 16-cm Diaphyseal Defect after Ewing's Resection in a Child. *Clin Orthop*. févr 2009;467(2):572-7.
135. Weiland AJ, Weiss AP, Moore JR, Tolo VT. Vascularized fibular grafts in the treatment of congenital pseudarthrosis of the tibia. *J Bone Joint Surg Am*. juin 1990;72(5):654-62.
136. Romanus B, Bollini G, Dungal P, Fixsen J, Grill F, Hefti F, et al. Free Vascular Fibular Transfer in Congenital Pseudoarthrosis of the Tibia: Results of the EPOS Multicenter Study: *J Pediatr Orthop B*. avr 2000;9(2):90-3.
137. Sakamoto A, Yoshida T, Uchida Y, Kojima T, Kubota H, Iwamoto Y. Long-term follow-up on the use of vascularized fibular graft for the treatment of congenital pseudarthrosis of the tibia. *J Orthop Surg*. déc 2008;3(1):13.
138. Korompilias AV, Lykissas MG, Soucacos PN, Kostas I, Beris AE. Vascularized free fibular bone graft in the management of congenital tibial pseudarthrosis. *Microsurgery*. 2009;29(5):346-52.
139. Erni D, De Kerviler S, Hertel R, Slongo T. Vascularised fibula grafts for early tibia reconstruction in infants with congenital pseudarthrosis. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. oct 2010;63(10):1699-704.
140. Gouron R, Deroussen F, Plancq M-C, Collet L-M. Bone defect reconstruction in children using the induced membrane technique: A series of 14 cases. *Orthop Traumatol Surg Res*. nov 2013;99(7):837-43.
141. Gouron R, Deroussen F, Juvet M, Ursu C, Plancq M-C, Collet L-M. Early resection of congenital pseudarthrosis of the tibia and successful reconstruction using the Masquelet technique. *J Bone Joint Surg Br*. avr 2011;93-B(4):552-4.
142. Gouron R, Deroussen F, Juvet-Segarra M, Plancq M-C, Collet L-M. Reconstruction of Congenital Pseudarthrosis of the Clavicle with Use of the Masquelet Technique: A Case Report. *JBJS Case Connect*. 12 déc 2012;2(4):e77.
143. Abdellaoui H, Atarraf K, Chater L, Afifi MA. Congenital pseudarthrosis of the clavicle treated by Masquelet technique. *BMJ Case Rep*. 8 nov 2017;bcr-2017-221557.
144. Pannier S, Pejin Z, Dana C, Masquelet AC, Glorion C. Induced membrane technique for the treatment of congenital pseudarthrosis of the tibia: preliminary results of five cases. *J Child Orthop*. 1 déc 2013;7(6):477-85.
145. Villemagne T, Bonnard C, Accadbled F, L'Kaissi M, de Billy B, Sales de Gauzy J. Intercalary Segmental Reconstruction of Long Bones After Malignant Bone Tumor Resection Using Primary Methyl Methacrylate Cement Spacer Interposition and

- Secondary Bone Grafting: The Induced Membrane Technique. *J Pediatr Orthop.* juill 2011;31(5):570-6.
146. Lutz BS, Wei F-C, Ng S-H, Chen I-H, Chen SHT. 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.
 147. Disa JJ, Cordeiro PG. The Current Role of Preoperative Arteriography in Free Fibula Flaps: *Plast Reconstr Surg.* sept 1998;102(4):1083-8.
 148. Young D, Trabulsky P, Anthony J. The Need for Preoperative Leg Angiography in Fibula Free Flaps. *J Reconstr Microsurg.* sept 1994;10(05):283-7.
 149. Coghlan BA, Townsend PLG. The morbidity of the free vascularised fibula flap. *Br J Plast Surg.* 1993;46(6):466-9.
 150. Canales F, Lineaweaver WC, Furnas H, Whitney TM, Siko PP, Alpert BS, et al. Microvascular tissue transfer in paediatric patients: analysis of 106 cases. *Br J Plast Surg.* 1991;44(6):423-7.
 151. Cao Q-L, Wang Z, Yu X-W, Teng Y, Zhang Q-J, Cai J-Y. [Comparison of long bone repair in tibia by vascularized fibular grafting of different sides]. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi Zhongguo Xiu fu Chongjian Waike Zazhi Chin J Reparative Reconstr Surg.* mars 2002;16(2):109-11.
 152. Alassaf N, Alhoukail A, Alsahli A, Althubaiti G. Salvage of mangled upper extremity using the Masquelet technique in a child: A case report. *SAGE Open Med Case Rep.* 1 janv 2017;5:2050313X1774101.
 153. Mansour TM, Ghanem IB. Preliminary Results of the Induced Membrane Technique for the Reconstruction of Large Bone Defects. *J Pediatr Orthop.* janv 2017;37(1):e67-74.
 154. 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.
 155. 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.
 156. Campanacci DA, Puccini S, Caff G, Beltrami G, Piccioli A, Innocenti M, et al. Vascularised fibular grafts as a salvage procedure in failed intercalary reconstructions after bone tumour resection of the femur. *Injury.* févr 2014;45(2):399-404.
 157. Han CS, Wood MB, Bishop AT, Cooney WP. Vascularized bone transfer. *J Bone Joint Surg Am.* déc 1992;74(10):1441-9.
 158. Masquelet AC. Induced Membrane Technique: Pearls and Pitfalls. *J Orthop Trauma.* oct 2017;31(5):S36-8.
 159. 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

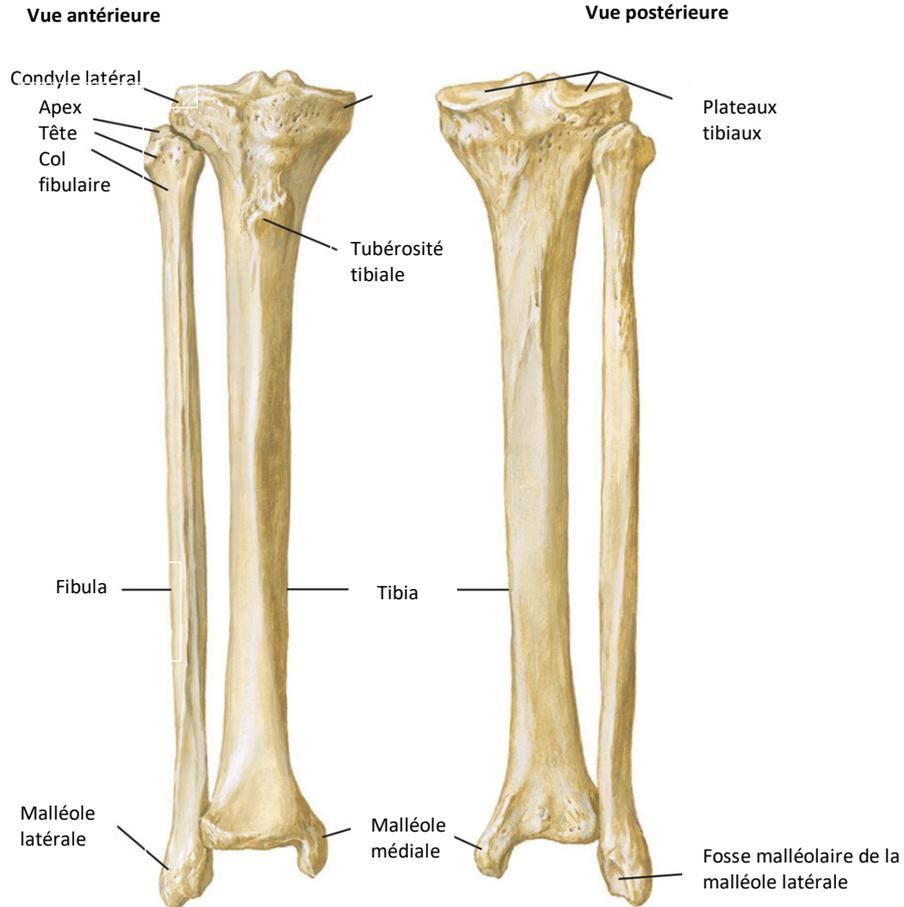
Defects—Combining a Masquelet Induced Membrane and Capanna Vascularized Fibula with an Allograft. *J Pers Med.* 9 août 2021;11(8):774.

160. Gruber HE, Ode G, Hoelscher G, Ingram J, Bethea S, Bosse MJ. Osteogenic, stem cell and molecular characterisation of the human induced membrane from extremity bone defects. *Bone Jt Res.* avr 2016;5(4):106-15.
161. Pho R, Levack B, Satku K, Patradul A. Free vascularised fibular graft in the treatment of congenital pseudarthrosis of the tibia. *J Bone Joint Surg Br.* janv 1985;67-B(1):64-70.
162. Bronfen C. Inégalités de longueur des membres inférieurs chez l'enfant et l'adolescent. In: *Conférences d'enseignement 2009 [Internet]. Elsevier; 2009 [cité 21 nov 2021].* p. 157-91. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9782842999094000092>
163. Innocenti M, Delcroix L, Romano GF. Epiphyseal transplant: harvesting technique of the proximal fibula based on the anterior tibial artery. *Microsurgery.* 2005;25(4):284-92.
164. Ahlmann E, Patzakis M, Roidis N, Shepherd L, Holtom P. COMPARISON OF ANTERIOR AND POSTERIOR ILIAC CREST BONE GRAFTS IN TERMS OF HARVEST-SITE MORBIDITY AND FUNCTIONAL OUTCOMES: *J Bone Jt Surg-Am Vol.* mai 2002;84(5):716-20.
165. McCall TA, Brokaw DS, Jelen BA, Scheid DK, Scharfenberger AV, Maar DC, et al. Treatment of Large Segmental Bone Defects with Reamer-Irrigator-Aspirator Bone Graft: Technique and Case Series. *Orthop Clin North Am.* janv 2010;41(1):63-73.
166. Masquelet A-C, Benko PE, Mathevon H, Hannouche D, Obert L. Harvest of cortico-cancellous intramedullary femoral bone graft using the reamer-irrigator-aspirator (RIA). *Orthop Traumatol Surg Res.* avr 2012;98(2):227-32.
167. Sagi HC, Young ML, Gerstenfeld L, Einhorn TA, Tornetta P. Qualitative and Quantitative Differences Between Bone Graft Obtained from the Medullary Canal (with a Reamer/Irrigator/Aspirator) and the Iliac Crest of the Same Patient. *J Bone Jt Surg.* 5 déc 2012;94(23):2128-35.
168. Engelstad ME, Morse T. Anterior Iliac Crest, Posterior Iliac Crest, and Proximal Tibia Donor Sites: A Comparison of Cancellous Bone Volumes in Fresh Cadavers. *J Oral Maxillofac Surg.* déc 2010;68(12):3015-21.
169. Gleizal A, Revol P, Bouletreau P, Sailhan F, Freidel M, Breton P. Lambeau libre de fibula chez l'enfant : morbidité du site donneur et piège à éviter. *Rev Stomatol Chir Maxillofac.* déc 2005;106(6):349-51.
170. Sulaiman AR, Wan Z, Awang S, Che Ahmad A, Halim AS, Ahmad Mohd Zain R. Long-term effect on foot and ankle donor site following vascularized fibular graft resection in children. *J Pediatr Orthop B.* sept 2015;24(5):450-5.
171. Vail TP, Urbaniak JR. Donor-Site Morbidity with Use of Vascularized Autogenous Fibular Grafts*: *J Bone Jt Surg.* févr 1996;78(2):204-11.

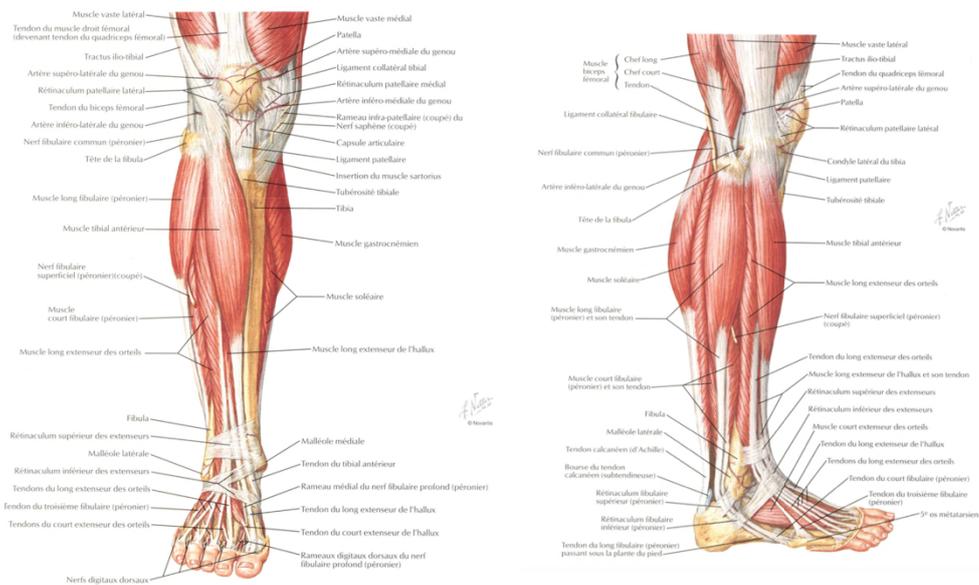
172. Babovic S, Johnson CH, Finical SJ. Free fibula donor-site morbidity: the Mayo experience with 100 consecutive harvests. *J Reconstr Microsurg.* févr 2000;16(2):107-10.
173. Arai E, Nakashima H, Tsukushi S, Shido Y, Nishida Y, Yamada Y, et al. Regenerating the Fibula with Beta-Tricalcium Phosphate Minimizes Morbidity after Fibula Resection. *Clin Orthop.* févr 2005;431:233-7.
174. Lazar E, Rosenthal DI, Jupiter J. Free vascularized fibular grafts: radiographic evidence of remodeling and hypertrophy. *Am J Roentgenol.* sept 1993;161(3):613-5.
175. Fujimaki A, Suda H. Experimental study and clinical observations on hypertrophy of vascularized bone grafts. *Microsurgery.* 1994;15(10):726-32.
176. Duquennoy-Martinot V, Belkhou A, Pasquesoone L, Depoortère C, Guerreschi P. La reprise de cicatrice chez l'enfant : situations cliniques et solutions. *Ann Chir Plast Esthét.* oct 2016;61(5):578-88.

ANNEXES

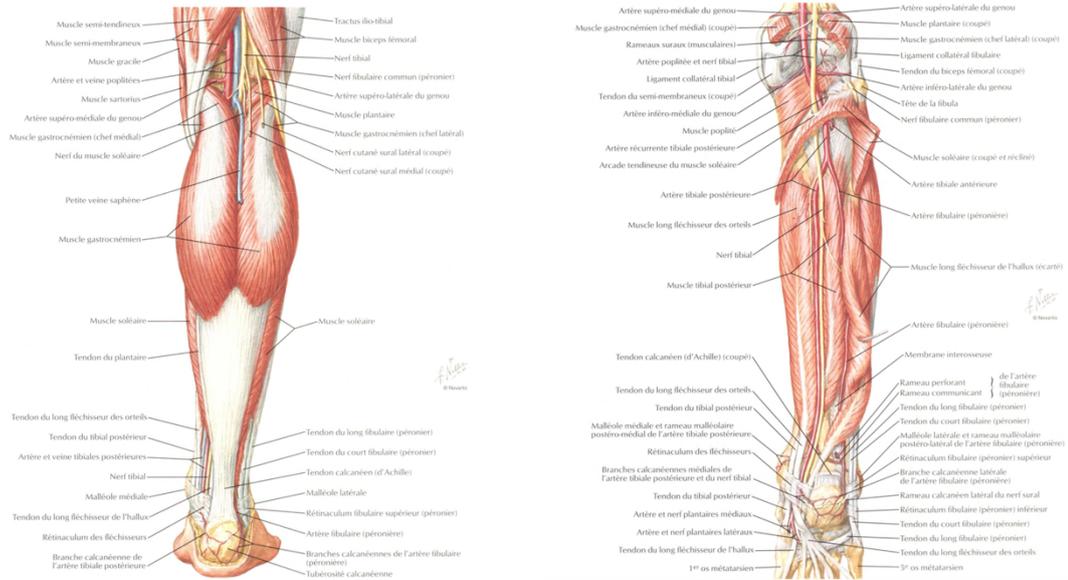
Annexe 1 : Anatomie de la jambe



Ostéologie de la jambe



Vues antérieure et latérale de la jambe

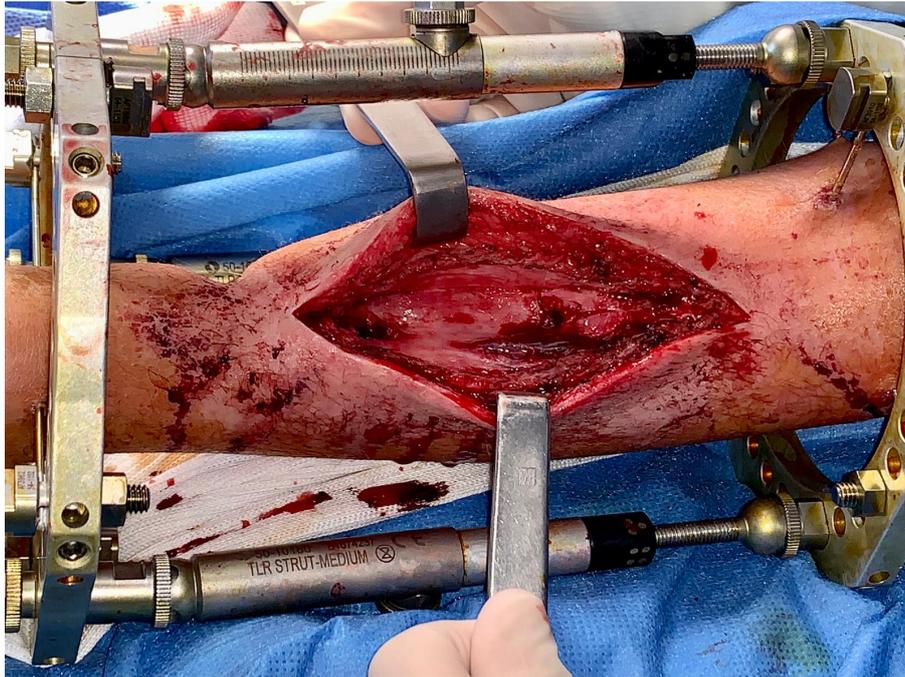


Vues postérieures de la jambe

Annexe 2 : classification de Huvos

Grade	% de cellules viables	
Grade 4	0% de cellules viables	Bons répondeurs
Grade 3	< ou = 5% de cellules viables	
Grade 2	6 à 49% de cellules viables	Mauvais répondeurs
Grade 1	> ou = 50% de cellules viables	

Annexe 3 : Photographie de la membrane induite



Annexe 4 : Prélèvement d'une fibula vascularisée



AUTEURE : Nom : VANDEWALLE

Prénom : Louise

Date de soutenance : 3 décembre 2021

Titre de la thèse : Comparaison de la reconstruction de membre par lambeau libre de fibula vascularisée versus membrane induite, à propos de 54 cas pédiatriques sur 16 ans

Thèse - Médecine - Lille 2021

Cadre de classement : chirurgie orthopédique pédiatrique

DES + spécialité : DES de chirurgie générale, DESC de chirurgie orthopédique pédiatrique

Mots-clés : Fibula vascularisée, membrane induite, Masquelet, tumeurs osseuses, pseudarthrose congénitale, consolidation.

Introduction : Les pertes de substance osseuses des membres chez l'enfant peuvent être traitées par différentes techniques. Nous comparons la reconstruction osseuse par lambeau libre de fibula à la technique de membrane induite décrite par Masquelet, en population pédiatrique. Notre objectif principal était d'évaluer, selon la technique chirurgicale, le délai ainsi que la qualité de consolidation.

Matériel et méthodes : Les données des patients opérés selon la technique de fibula vascularisée ou de membrane induite étaient recueillis rétrospectivement, sur dossier et en consultation pour certains patients, dans deux centres, entre 2004 et 2020. La consolidation était jugée sur les radiographies et les complications étaient recensées. Les résultats fonctionnels et esthétiques étaient également analysés.

Résultats : 31 patients ont bénéficié d'une reconstruction de membre en utilisant la technique de fibula libre, et 13 patients ont été reconstruits par membrane induite. Parmi les étiologies, on retrouvait 75,9% de tumeurs, donc 82,9% étaient des tumeurs malignes, 20,4% de pseudarthroses congénitales et 3,7% de causes infectieuses. La longueur médiane de la perte de substance osseuse reconstruite par fibula était de 13,75cm (5;30), contre 11,2 cm (1,7;26,0) pour la technique de membrane induite. Le délai médian de consolidation après transplantation de fibula était de 10 mois (2,55), contre 7,5 mois (1 ;64) pour la technique de Masquelet (p=0,54). Dans le groupe fibula, on observait 85,7% de consolidation, contre 91,3% dans le groupe Masquelet (p>0,05). Le taux de complications du site receveur était chiffré à 69,5% dans le groupe Masquelet, et à 64,7% dans le groupe fibula. Cependant, le taux de fractures était plus élevé dans le groupe fibula (p=0,002). L'inégalité de longueur des membres concernait 51,6% des fibula contre 39,1% des membranes induites (p=0,55).

Conclusion : La technique de membrane induite décrite par Masquelet devient de plus en plus indiquée, également pour le traitement de pertes de substances osseuses de grande taille. Dans cette technique, le temps de consolidation ne dépend pas de la taille de la perte de substance, en comparaison avec les techniques de lambeau libre. Cependant, elle nécessite un volume important de greffe autologue.

Composition du Jury :

Président : Madame le Professeur Véronique DUQUENNOY-MARTINOT

Asseseurs : Monsieur le Professeur Federico Canavese, Monsieur le Professeur Antoine Hamel, Madame le Docteur Aurélie Mézel

Directeur de thèse : Monsieur le Professeur Franck Duteille