



éditorial

# Navigation à vue et incertitude

Par **Philippe TRACOL**, Président du CNP-COT  
et **Luc FAVARD**, Président de l'AOT



Quand nous avons programmé ce numéro du BOF avec un dossier consacré à l'intelligence artificielle (IA) nous étions bien loin d'imaginer la situation dans laquelle nous serions au moment de son édition. Nous naviguons à vue et sommes encore dans l'incertitude sur ce que nous ferons les prochaines semaines.

Quoi qu'il en soit, nous espérons que ce numéro vous distraira un peu et vous donnera envie de mieux appréhender ce que peut nous apporter l'IA, thème de notre prochain congrès. Il ne fait d'ailleurs guère de doute que cette même IA est et sera largement utilisée pour gérer cette pandémie au Covid 19, que ce soit pour le tracking, l'interprétation des données à grande échelle (big data), ou la recherche clinique.

Son apport dans notre pratique quotidienne sera tout aussi important dans les années à venir. Il ne serait pas étonnant que d'ici une quinzaine d'années, la traumatologie routière ait considérablement diminué comme c'est le cas actuellement pour d'autres raisons, que certains paraplégiques remarchent à l'aide d'exosquelette, que nos planifications opératoires et nos interventions se fassent à l'aide de logiciels 3D, de lunettes de réalité augmentée et de l'utilisation d'instruments sur-mesure fabriqués par des imprimantes 3D, que nos patients et peut-être aussi nos prothèses soient connectées, et que la collection de toutes ces données de santé permette des analyses jusque là inenvisageables.

Toutes ces innovations permises par l'IA et le numérique seront largement développées lors du prochain congrès de la SOFCOT et nous espérons que ce dossier vous donnera encore un peu plus envie d'y venir ce qui est, bien sûr, notre souhait le plus cher.

# BOF infos

Bulletin des Orthopédistes Francophones  
organe de liaison édité par la SOFCOT

## sommaire

### effort

Tu vas à l'EFORT cette année ? ..... 2-3

### covid-19

Nouvelles recommandations du CNP-SOFCOT à partir du 10 mai et jusqu'à la levée du plan blanc ..... 3

### dossier - intelligence artificielle

Histoire et définition de l'intelligence artificielle ..... 4-6  
Que peut attendre un chirurgien orthopédiste de l'IA dans sa pratique quotidienne ? ..... 6-8  
Applications concrètes de l'IA pour l'orthopédiste-traumatologue ..... 9-12  
Faut-il craindre l'IA dans notre domaine d'activité ? .. 12-15  
L'impression 3D en orthopédie-traumatologie : bases techniques et applications ..... 15-25  
Avenir de l'intelligence artificielle en chirurgie ..... 26-32

### dissection anatomique

La dissection en anatomie : traditionnelle ou tout numérique ? Un défi ! ..... 33-40

### comptes rendus

Compte rendu de voyage : six mois à New York. .... 41-46  
Fellowship clinique en oncologie orthopédique à Toronto ..... 47-51  
Bourse de recherche sur les sarcomes à Montréal .... 52-54

réunions scientifiques ..... www.sofcot.fr

9-11 NOVEMBRE 2020

— PALAIS DES CONGRÈS, Paris, France

[sofcot-congres.fr](http://sofcot-congres.fr)

→ Intelligence artificielle et orthopédie



# SOFCOT

→ NATION INVITÉE MAROC

→ SOCIÉTÉ MISE À L'HONNEUR La SOFEC

Soyez connecté #SOFCOT20





## Tu vas à l'EFORT cette année ?

Par **Philippe NEYRET**, Président de l'EFORT et **Adrian OTT**, Directeur de l'EFORT

C'est cette phrase que nous aurions bien aimé entendre sur toutes les lèvres mais le coronavirus est passé par là. Tous les congrès programmés au printemps se sont annulés tour à tour. Même les événements prévus à l'automne sont désormais remis en question.

La décision de confinement s'est imposée à la plupart des pays européens même si les mesures visant à restreindre la liberté de circulation ou de se rassembler prennent en compte les situations nationales ou régionales. Une illustration du thème du congrès 2020 : « **Diversité et Harmonisation** » en Europe !

Nous savons que cette situation n'est pas une situation « On/Off », et la levée des mesures de confinement sera progressive et ne permettra pas une reprise similaire et immédiate de l'activité antérieure. Nous entrons dans une période très incertaine et les scénarios possibles sont multiples. Nul ne sait quelle sera la disponibilité des chirurgiens, de l'industrie à l'automne, ni même les possibilités de déplacement.

Ainsi, parmi les options envisagées nous avons rapidement écarté la tenue d'un congrès au cours du deuxième semestre. Devions-nous pour autant faire l'impasse sur l'année 2020 ? L'EFORT, son office, son bureau, ses membres avaient tout préparé pour le congrès de Vienne en juin 2020 et sélectionné plus de 600 abstracts et 72 symposia, conférences d'enseignement, discussions entre experts, ... et invité des chirurgiens prestigieux : Gilles Walch et Freddie Fu.

Des internes, des assistants ont soumis des communications de grande qualité scientifique. Il est important de leur donner l'opportunité de les présenter pour leur CV et l'obtention de leur diplôme.

### Le congrès EFORT 2020 sera « on line » fin octobre

Pour toutes ces raisons nous avons opté pour l'organisation d'un congrès « on line » la dernière semaine d'octobre 2020. Les professeurs Sören Overgaard (Danemark) et

L'EFORT vous donne rendez-vous sur le net fin octobre, une seule adresse : [www.efort.org](http://www.efort.org)



Enrique Gomez Barrena (Espagne) sont en charge de trouver un format nouveau qui permettra à chacun d'actualiser ou parfaire ses connaissances.

Il s'agit d'un véritable défi car les congrès virtuels d'orthopédie ne sont pas légion. Mais nous sommes motivés et déterminés car c'est bien la mission de l'EFORT de participer à la formation des chirurgiens orthopédistes et traumatologues en Europe.

Les détails organisationnels vous seront bientôt communiqués. L'EFORT ne cesse d'innover à chaque congrès. Le congrès virtuel ne fera pas exception. Un prix pour la communication « *the best national paper* » sera décerné dès cette année. Chaque société nationale a sélectionné la « meilleure » communication émanant de son pays. Et c'est la meilleure d'entre elles qui sera récompensée à l'échelon européen.

Cette offre permettra un accès facile sur le plan financier mais aussi la possibilité d'adapter votre participation à votre agenda avec non seulement les présentations en direct mais aussi les enregistrements de toutes les sessions rendant possible leur accès en différé.

Alors, rendez-vous sur le net pour les webinars organisés par l'EFORT dans les semaines à venir et au mois d'octobre. Soyez nombreux à venir découvrir le premier congrès « on line » de l'EFORT.

### Le congrès EFORT de Vienne du 30 juin au 2 juillet 2021

Vienne restera la destination de l'EFORT en 2021. Le professeur Klaus-Peter Günther (Allemagne) sera le président et, du fait des circonstances, Philippe Neyret sera le co-président du congrès. Le choix de cette période fin juin s'explique par notre désir de ne pas interférer avec les nombreux congrès européens qui ont été reportés en mai 2021. Beaucoup des innovations prévues en 2020 quant à l'organisation y seront présentées. Nous aurons besoin de votre soutien et de votre présence. Cochez ces dates sur votre agenda.

### Pourquoi participer au congrès « in person » de Vienne en 2021 ?

- Lors d'un congrès de l'EFORT, les codes sont européens et on retrouve l'**innovation**, la créativité mais aussi la diversité qui font la richesse de l'orthopédie européenne.
- **Les sociétés de spécialité** font partie intégrante du programme scientifique et dispensent un programme éducatif de haute qualité. Le projet d'une rotation sur trois ans de l'enseignement de base, mais couvrant tous les domaines essentiels de l'orthopédie et la traumatologie de l'appareil locomoteur sur trois ans est en route.
- **Avec l'industrie** nous développons de nouveaux partenariats originaux avec des démonstrations chirurgicales sur cadavre ou « *wetlab* », au sein de la zone d'exposition de notre congrès annuel.
- Les modérations, les cours d'instruction sont assurés presque exclusivement par les **orthopédistes européens**. Seules les communications libres (les « *free papers* »), sont sélectionnées parmi des abstracts soumis et venant de chirurgiens « tout azimut ».

- L'EFORT est aussi soucieuse des **enjeux écologiques** et des formules innovantes sont en cours d'évaluation. Fort de notre expérience acquise en octobre 2020, une partie du congrès fera l'objet d'une retransmission en direct via internet. Une possibilité de vision différée est discutée.
- L'EFORT est aussi résolument tournée vers **les plus jeunes** qui, entre autres, peuvent s'enregistrer à un tarif préférentiel. Soulignons ici les partenariats en cours avec **FORTE**. FORTE représente les jeunes chirurgiens orthopédistes en Europe, pour qui des plages horaires ont été allouées pendant toute la durée du congrès. Au-delà, L'EFORT participe activement à l'élaboration du programme de la « *FORTE Summerschool* ».

Ces initiatives rendent chaque congrès EFORT unique.

Les villes où se dérouleront les congrès après Lisbonne 2022 ne seront plus forcément des capitales européennes mais peut-être bien des deuxièmes ou troisièmes villes nationales dont une découverte sortirait un peu des sentiers battus. Bien desservies, accessibles mais à taille humaine elles se prêtent parfaitement aux rencontres et des coûts par participant moins onéreux pourraient

bien s'en faire ressentir. Ces villes, dotées de centres de congrès de première qualité et de grande capacité permettront de plus nombreux échanges. Lyon, Hambourg, et quelques autres sont sérieusement considérées pour la tenue de congrès annuels de L'EFORT dans un futur proche.

Parallèlement, L'EFORT continue d'assurer la continuité de ses tâches en dépit du Covid 19. Car il est un réel atout souvent méconnu que seul L'EFORT est à même de jouer : la défense de notre discipline à l'échelon européen. Souvenons-nous que les orthopédistes ne représentent que 4 % des médecins en Europe et le poids d'une société nationale isolée reste modéré lorsqu'il s'agit de discuter avec l'industrie ou avec la Commission Européenne, là où se décident, par exemple, la régulation de la mise en place d'implants sur le marché, les relations des chirurgiens avec l'industrie. Des sujets ô combien discutés en ce moment. L'EFORT par sa présence à l'échelon européen a soutenu le report de la mise en application des MDR (*Medical Device Regulation*) pour une période de 1 an. Le Professeur Per Kjaersgaard-Andersen (Danemark) est en charge des affaires européennes de L'EFORT.

Loin d'être abattus ou défaitistes nous savons que dans toute épreuve, il y a des opportu-

nités. Nous apprendrons de cette guerre sanitaire et nous voulions vous donner des nouvelles du front européen.

Avec L'EFORT, on retrouve des valeurs qui font l'Europe. Le respect des diversités et le souci d'harmonisation. En un mot L'EFORT est une plateforme unique en Europe qui au travers des sociétés nationales regroupe une communauté d'orthopédistes. L'EFORT donne un podium, une audience aux chirurgiens créatifs et ingénieux et par là également l'occasion, pour ses membres, dont la SOFCOT, de faire connaître tout ce qu'une société nationale apporte à l'orthopédie.

Vous l'avez bien compris, L'EFORT recherche la complémentarité et se réjouit à l'idée de ce que peuvent apporter les sociétés nationales, de spécialités et continentales telles la COA (*Chinese Orthopaedic Association*) ou l'AAOS (*American Academy of Orthopaedic Surgeons*) auxquelles nous restons très attachés.

Permettez-nous, en guise de conclusion, de retenir parmi les atouts de L'EFORT, le fait qu'il s'agisse de notre « terrain de jeu » naturel et culturel : nous pouvons y promouvoir nos idées et nos valeurs, celles qui nous animent tous les jours.

**Philippe NEYRET, Adrian OTT**

## Recommandations covid-19

30 avril 2020

### Nouvelles recommandations du CNP-COT à partir du 10 mai et jusqu'à la levée du plan blanc

1. La prise en charge traumatologique.
2. La chirurgie tumorale ayant un caractère d'urgence.
3. Les lésions infectieuses.
4. Les complications chirurgicales.
5. Les pathologies urgentes ou hyperalgiques, les dégradations fonctionnelles rapides pour lesquelles la non-prise en charge ou le retard de prise en charge entraînerait une perte de chance ou un retentissement socio professionnel pour le patient devront être prioritaires. En cas de facteurs à risque de Covid grave (1), la décision sera prise en concertation collégiale incluant le patient en évaluant le rapport bénéfice risque.
6. Les autres interventions pourront être envisagées dans les départements verts à l'exception des interventions lourdes pouvant nécessiter un séjour en réanimation prévisible (hors complication) ainsi que les patients présentant un facteur de risque Covid grave (1). Ces interventions devraient être ajournées jusqu'à la levée de l'état d'urgence sanitaire.

**En cas de doute**, la décision de prise en charge chirurgicale devrait être collégiale et multidisciplinaire et tracée dans le dossier patient.

La décision doit s'appuyer sur le diaporama présenté lors du [webinaire du 29 avril 2020](#).

Ces recommandations peuvent être adaptées en fonction du contexte local (matériel, per-

sonnel). Elles pourront être modifiées en fonction de la situation sanitaire.

Dans tous les cas il est conseillé de privilégier les anesthésies locorégionales ainsi que les hospitalisations de courte durée.

#### 1) Facteurs de risque Covid grave

- Âge > 70 ans
- Pathologie respiratoire chronique
- Dialyse
- Insuffisance cardiaque
- Cirrhose
- Antécédent cardiovasculaire
- Diabète ID ou compliqué
- Immunodépression
- Grossesse
- Obésité (IMC > 35)

# Histoire et définition de l'intelligence artificielle

Par **Mikaël CHELLI**<sup>1,2,3</sup> et **Nicholas AYACHE**<sup>1</sup>

1. Université Côte d'Azur, INRIA Équipe EPIONE, Sophia-Antipolis, France ; 2. CHU de Nice, Institut Universitaire Locomoteur et du Sport, France ; 3. EasyMedStat.com, France

## Introduction

Aussi moderne qu'il puisse paraître, le concept d'intelligence artificielle (IA) date de plus de 70 ans ! Alan Turing, le père de l'informatique moderne, en jette les bases dans les années 1950 en imaginant le test éponyme. Le test de Turing consiste à mettre en confrontation verbale à l'aveugle un sujet et une machine ou un autre humain. Si le sujet n'est pas capable de distinguer un être humain d'une machine, la machine a passé avec succès le test. En 1959, Arthur Samuel définissait l'apprentissage automatique dans son article « Études en apprentissage automatique (*machine learning*) utilisant le jeu de dames », comme la capacité d'un ordinateur à apprendre sans être reprogrammé [1].

Le concept a été re-popularisé dans les années 1980 par un Français, aujourd'hui à la tête de la recherche chez Facebook : Yann LeCun. Il obtient des résultats impressionnants sur une tâche simple, mais alors non triviale pour les informaticiens : la reconnaissance automatique de chiffres manuscrits de 0 à 9 [2]. Ses recherches serviront aux services des Postes à adresser automatiquement le courrier en fonction du code postal manuscrit sur l'enveloppe. Elles s'appuient sur la programmation d'un réseau de neurones et ouvriront la porte aux algorithmes d'apprentissage profond (*deep learning*). Nous définirons ces termes plus loin.

Cette compétence des réseaux de neurones artificiels à identifier, segmenter et classifier des images de plus en plus riches a provoqué un engouement dans de nombreux domaines et plus spécifiquement en reconnaissance faciale, conduite automobile autonome et recherche médicale. Des résultats impressionnants sur la détection de cancers ou de rétinopathie diabétique ont été publiés depuis 2017 dans des revues prestigieuses comme Nature par plusieurs laboratoires de recherche (entre autres Google AI) et ont rendu la discipline très populaire [3, 4].

Notre objectif est de définir et de placer dans leur contexte historique les principaux concepts attachés à cette discipline : apprentissage automatique, apprentissage profond, réseaux de neurones artificiels, apprentissages supervisés et non supervisés, etc. Nous décrirons également des principes méthodologiques de base permettant au lecteur de mieux appréhender la lecture des articles traitant du sujet en chirurgie orthopédique. Cet article d'introduction ne saurait détailler la grande complexité des techniques d'IA actuelles mais permettra au lecteur de s'approprier les principaux concepts rencontrés actuellement dans la littérature médicale.

## Apprentissage automatique (*Machine Learning*)

L'apprentissage automatique ou *machine learning* (ML) est une sous-discipline de l'IA utilisant des algorithmes informatiques capables d'apprendre à partir de données et de s'améliorer avec l'augmentation du nombre de données. Une fois entraîné, l'algorithme est capable de prédire un résultat à partir de nouvelles données qu'il n'a jamais rencontrées. Par exemple, l'algorithme de Thian *et al.* [5] a été entraîné sur plus de 7 000 radiographies du poignet où lorsqu'elles étaient diagnostiquées, des fractures ont été annotées par des radiologues. L'algorithme était ensuite capable de prédire un nouveau jeu de 500 radiographies avec une sensibilité de 97 % et une spécificité de 86 % pour prédire des fractures du radius distal. L'apprentissage est dit automatisé car il n'est pas nécessaire d'expliquer à l'algorithme ce qu'est une fracture. Il l'apprend de lui-même en déterminant des caractéristiques qui différencient les radiographies de fracture de celles ne présentant pas de fractures. Cependant, ces caractéristiques ne sont pas forcément celles qu'un radiologue ou un chirurgien orthopédiste identifieraient, et il est assez difficile de « comprendre » le chemin emprunté par l'algorithme pour pré-

## Dates clés de l'intelligence artificielle

**1936** : Alan Turing pose les fondements théoriques de l'informatique.

**1950** : Alan Turing imagine un test permettant de juger de la capacité d'un ordinateur à imiter un humain.

**1956** : Université d'été de Dartmouth considérée comme l'acte de naissance de l'intelligence artificielle.

**1957** : Frank Rosenblatt développe le perceptron.

**1970-1990** : « hivers » de l'IA avec diminution des financements et de l'intérêt des chercheurs.

**1997** : Deep blue d'IBM bat le maître d'échecs Garry Kasparov.

**2010** : Les GAFA développent leurs assistants personnels vocaux utilisant des IA : Siri, Alexa, etc.

**2016** : Victoire d'Alpha Go de Google face au champion Lee Sedol au jeu de Go jusqu'à alors réputé trop complexe pour être traité par un ordinateur.

dire le résultat, y compris par des experts. C'est la raison pour laquelle ces réseaux de neurones profonds sont parfois assimilés à des « boîtes noires », bien que les informations contenues dans les boîtes noires des avions soient, au contraire, très bien caractérisées et compréhensibles par les experts ...

## Apprentissages supervisés et non supervisés

Tout apprentissage automatique se range dans l'une de ces 2 catégories : supervisé ou non supervisé. L'apprentissage supervisé est celui auquel le public est le plus familier. Il consiste à fournir à un algorithme des données annotées pour que celui-ci apprenne automatiquement à annoter les cas suivants, jamais rencontrés. C'est le cas de l'étude précédente sur les fractures du poignet ou de celle de Mutasa *et al.* [6] dont l'objectif est de prédire l'âge d'enfants à partir de radiographies de leur main gauche. Ces derniers ont utilisé 20 000 radiographies d'enfants dont l'âge était connu pour entraîner un algorithme à prédire l'âge d'un nouveau patient à partir de sa radiographie. L'erreur absolue moyenne était inférieure à 1 an.

L'apprentissage non supervisé a plus rarement été utilisé en médecine. Il est réalisé à partir de données non annotées et consiste à trouver une structure sous-jacente aux données. Le partitionnement en k-moyennes (*k-mean clustering*) en est une des techniques les plus utilisées et consiste à segmenter un jeu de données en un nombre prédéfini de groupes homogènes partageant des caractéristiques communes. Par exemple, Chen *et al.* [7] ont mesuré les paramètres morphométriques de 422 fémurs comme le rayon de courbure, le diamètre intérieur, la longueur du fémur, etc. Un algorithme de partitionnement en 3 moyennes a ensuite automatiquement défini 3 groupes de fémurs présentant des caractéristiques morphométriques similaires. Les auteurs espèrent ainsi pouvoir faciliter la conception de différents types de clous centromédullaires adaptés aux morphologies de ces 3 groupes. Dans cette dernière étude, les fémurs n'étaient pas préalablement qualifiés par des experts. C'est l'analyse des ressemblances et des différences entre les différents sujets qui a permis la classification des cas dans un des 3 groupes. C'est ce qui différencie cet apprentissage non supervisé de l'apprentissage supervisé où les données sont préalablement annotées.

**Réseau de neurones artificiels (RNA)**

C'est la technologie la plus célèbre en apprentissage automatisé. Elle est inspirée du fonctionnement des neurones humains même si la ressemblance est en réalité très théorique. Le premier RNA fut inventé par Frank Rosenblatt en 1957 au sein du *Cornell Aeronautical Laboratory* et fut appelé Perceptron car le chercheur avait pour idée de modéliser informatiquement un neurone sensoriel.

Un réseau de neurones est composé de 3 couches (*layers*) : une couche d'entrée qui reçoit les données à analyser, une couche dite cachée qui comprend une succession de neurones artificiels et une couche de sortie qui donne le résultat final des calculs effectués dans la couche précédente. La couche cachée est elle-même composée d'une succession de couches de neurones communiquant les uns avec les autres (Figure 1) et fonctionne schématiquement de la manière suivante : la 1<sup>re</sup> couche de neurone cachée reçoit les données de la couche d'entrée. Chaque neurone de cette couche cachée considère les valeurs des neurones de la couche d'entrée avec lesquels il est connecté, les multiplie par un coefficient

(appelé poids) et les additionne pour calculer une valeur qui est stockée dans ce neurone de la première couche cachée. Les neurones de la 2<sup>e</sup> couche cachée reçoivent les résultats de la couche précédente et appliquent généralement un opérateur non linéaire (par exemple le calcul d'une valeur absolue, ou d'une valeur maximum parmi un ensemble de neurones). Ensuite, ces opérations sont répétées de proche en proche jusqu'à la dernière couche cachée du réseau. *In fine*, le réseau exprime un résultat qu'il va comparer à la valeur qui était attendue, par exemple à la valeur fournie par un médecin lors d'un apprentissage supervisé. En comparant la valeur générée par le réseau et la valeur réelle attendue, le RNA va ajuster les poids de toutes les couches précédentes pour s'approcher progressivement de cette valeur attendue à l'aide d'une fonction mathématique qui est calculée sur le réseau et d'un algorithme adapté (rétropropagation du gradient). Ainsi, le RNA va progressivement apprendre à prédire des réponses de plus en plus proches de ce qu'on attend de lui. C'est la raison pour laquelle on parle d'apprentissage automatique supervisé.

**Apprentissage profond (deep learning)**

Ce terme très populaire est utilisé pour définir des réseaux de neurones artificiels dont le nombre de couches cachées est important, généralement supérieur à 5. Plus il y a de couches cachées, plus le réseau est profond et est capable de mettre en évidence des relations non linéaires entre les données d'entrée et les données de sortie. La contre-

partie de cette profondeur est l'augmentation du nombre de calculs à effectuer et surtout du nombre de poids à ajuster (ce sont les paramètres du réseau). Un autre désavantage de la profondeur est la difficulté croissante pour un humain à comprendre le cheminement emprunté par l'algorithme et la signification de ces paramètres. Enfin, un réseau trop profond entraîné avec un nombre insuffisant de données expose à un risque de surapprentissage (*overfitting*). C'est un problème récurrent en apprentissage automatique. Il se produit lorsqu'un algorithme apprend à prédire trop parfaitement un jeu de données d'apprentissage et devient incapable de généraliser ses performances à de nouvelles données. Par exemple si un réseau est entraîné à reconnaître des fractures du fémur proximal à partir d'une base constituée uniquement de radiographies du bassin où toutes les fractures sont situées sur le fémur gauche, il est probable qu'il soit incapable de reconnaître des fractures du fémur droit.

**Réseau de neurones à convolution (Convolutional Neural Networks ou CNN)**

C'est un type de réseaux de neurones artificiels spécialisé dans le traitement des images. Ils ont montré leur efficacité pour la classification et la segmentation d'images médicales. Derkach *et al.* [8] ont par exemple utilisé un réseau à convolution pour prédire la présence de fractures vertébrales sur des radiographies standard à partir d'un échantillon de plus de 12 000 radiographies. Ils obtenaient une sensibilité de 87 % et une spécificité de 88 % pour l'identification de fractures.

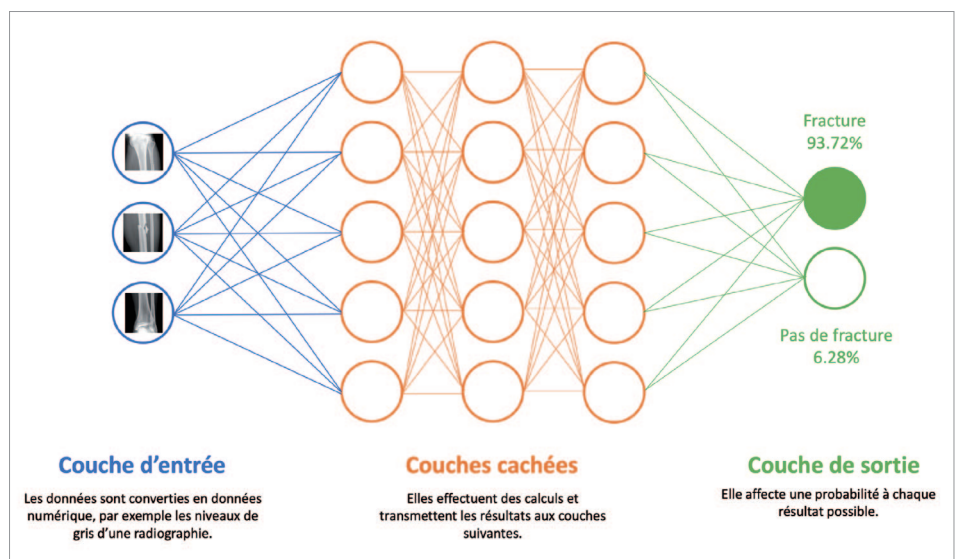


Figure 1. Schéma d'un réseau de neurones artificiels classant des radiographies standard de face en « fracture » ou « pas de fracture ».

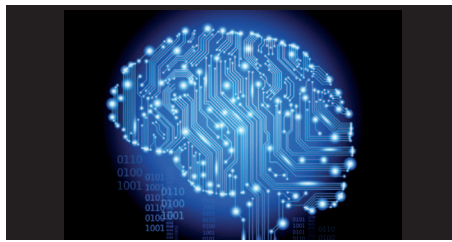
Dans ce type de réseau de neurones, chaque image est découpée en plus petites zones puis analysée par les couches cachées du réseau. Par exemple, une radiographie de 1024 x 1024 pixels est découpée en carrés de 8 x 8 pixels qui constituent la couche d'entrée du réseau. Un scanner de 512 coupes axiales mesurant chacune 512 x 512 pixels sera découpé en cubes de plus petite taille. L'avantage de cette technique est qu'elle conserve la conformation spatiale des images et leurs dimensions : une image 2D est analysée en plus petites images 2D et un volume 3D est analysé en plus petits volumes 3D.

### Traitement automatique du langage naturel (Natural Language Processing ou NLP)

Il s'agit d'un domaine multidisciplinaire aux frontières de la linguistique et de l'intelligence artificielle. L'objectif est ici de traiter informatiquement le langage pour en extraire le sens et structurer des données qui ne le sont pas. En médecine, cette discipline présente l'intérêt d'extraire automatiquement des informations depuis des dossiers médicaux, des comptes rendus de radiologie ou des comptes rendus opératoires afin de créer une base de données d'information exploitables par des moyens informatiques. Wang *et al.* [9] ont utilisé des comptes rendus de radiologie de la Mayo Clinic pour identifier les patients qui présentaient des fractures de différents os. Ils obtenaient une sensibilité de 93 % et une spécificité de 100 %. Cette technologie identifiant de manière automatique des patients présentant une fracture, sans avoir à parcourir manuellement les dossiers de chaque patient, pourrait permettre d'inclure facilement des patients dans une étude ou d'entraîner un réseau de neurones artificiels à détecter des fractures sans qu'un expert n'ait besoin de classer manuellement les radiographies en « fracture » ou « pas de fracture ».

### Méthodologie générale en apprentissage automatique

- **Un grand nombre de données est supérieur à un algorithme très complexe.** Il a été montré par plusieurs équipes de recherche fondamentale en IA que l'augmentation du nombre de données permettait d'obtenir de meilleurs résultats que l'augmentation de la complexité d'un réseau de neurones. Par ailleurs, comme en recherche clinique, une base de données large et variée de patients permet d'augmenter la « généralisabilité » des résultats.



- **Les algorithmes ne doivent jamais être entraînés sur les mêmes données qui servent à les évaluer.** Après avoir été entraînés, les algorithmes sont testés, ce qui permet de mesurer leurs performances : sensibilité, spécificité, aire sous la courbe, etc. Si les algorithmes sont testés sur les mêmes données qui ont servi à les entraîner, la performance est artificiellement surévaluée. C'est pourquoi les jeux de données doivent toujours être divisés en 1) données d'entraînement (pour ajuster les paramètres du réseau), 2) données de validation (pour optimiser l'organisation générale du réseau), et 3) données de tests (pour l'évaluation finale des performances).

- **En apprentissage supervisé, le gold standard est généralement humain** mais peut être lui-même sujet à des biais. Les algorithmes sont entraînés à se rapprocher progressivement de la performance des experts, comme par exemple des radiologues identifiant des tumeurs sur un examen d'imagerie. Cependant, si l'expert est lui-même sujet à des erreurs, l'algorithme apprendra les mêmes erreurs et risquera de les reproduire. Par exemple, la classification des fractures de l'humérus proximal selon Neer est réputée comme peu reproductible entre observateurs [10, 11]. Entraîner un algorithme à classer des fractures selon Neer est donc une tâche à haut risque de biais. D'excellents résultats de la machine signifient simplement qu'elle est capable de prédire la vision de l'expert mais son interprétation ne peut être considérée comme une vérité absolue.

### Conclusion

L'intelligence artificielle est un concept large et ancien très popularisé depuis les années 2000 par l'avènement des techniques d'apprentissage automatique. Ses applications en médecine sont nombreuses et présentent des résultats très performants. Elles nécessitent cependant de très grands jeux de données, le plus souvent annotés par des experts humains et une méthodologie rigoureuse et adaptée à chaque cas.

**Mikaël CHELLI, Nicholas AYACHE**

### Références

- [1] Samuel AL. *Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers*. IBM J Res Dev 1959;3:210–29. <https://doi.org/10.1147/rd.33.0210>.
- [2] Lecun Y, Boser B, Denker JS, Henderson D, Howard RE, Hubbard W, et al. *Backpropagation applied to handwritten zip code recognition*. Neural Comput 1989;1:541–51.
- [3] Esteva A, Kuprel B, Novoa RA, Ko J, Swetter SM, Blau HM, et al. *Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks*. Nature 2017;542:115–8. <https://doi.org/10.1038/nature21056>.
- [4] Poplin R, Varadarajan AV, Blumer K, Liu Y, McConnell MV, Corrado GS, et al. *Prediction of cardiovascular risk factors from retinal fundus photographs via deep learning*. Nat Biomed Eng 2018;2:158–64. <https://doi.org/10.1038/s41551-018-0195-0>.
- [5] Thian YL, Li Y, Jagmohan P, Sia D, Chan VEY, Tan RT. *Convolutional Neural Networks for Automated Fracture Detection and Localization on Wrist Radiographs*. Radiol Artif Intell 2019;1:e180001. <https://doi.org/10.1148/ryai.2019180001>.
- [6] Mutasu S, Chang PD, Ruzal-Shapiro C, Ayyala R. *MABAL: a Novel Deep-Learning Architecture for Machine-Assisted Bone Age Labeling*. J Digit Imaging 2018;31:513–9. <https://doi.org/10.1007/s10278-018-0053-3>.
- [7] Chen F, Zhao Z, Gao C, Liu J, Su X, Zhao J, et al. *Clustering of Morphological Features for Identifying Femur Cavity Subtypes With Difficulties of Intramedullary Nail Implantation*. IEEE J Biomed Health Inform 2018;22:1209–17. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2017.2761980>.
- [8] Derkatch S, Kirby C, Kimelman D, Jozani MJ, Davidson JM, Leslie WD. *Identification of Vertebral Fractures by Convolutional Neural Networks to Predict Nonvertebral and Hip Fractures: A Registry-based Cohort Study of Dual X-ray Absorptiometry*. Radiology 2019;190201. <https://doi.org/10.1148/radiol.2019190201>.
- [9] Wang Y, Mehrabi S, Sohn S, Atkinson EJ, Amin S, Liu H. *Natural language processing of radiology reports for identification of skeletal site-specific fractures*. BMC Med Inform Decis Mak 2019;19:73. <https://doi.org/10.1186/s12911-019-0780-5>.
- [10] Shrader MW, Sanchez-Sotelo J, Sperling JW, Rowland CM, Cofield RH. *Understanding proximal humerus fractures: Image analysis, classification, and treatment*. J Shoulder Elbow Surg 2005;14:497–505. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2005.02.014>.
- [11] Foroohar A, Tosti R, Richmond JM, Gaughan JP, Ilyas AM. *Classification and treatment of proximal humerus fractures: inter-observer reliability and agreement across imaging modalities and experience*. J Orthop Surg 2011;6:38. <https://doi.org/10.1186/1749-799X-6-38>.

# Que peut attendre un chirurgien orthopédiste de l'IA dans sa pratique quotidienne ?

Par **Louis DAGNEAUX**

CHU de Montpellier, Président du CJO

**U**n orthopédiste moderne, c'est un orthopédiste à l'écoute de son temps ! Les dernières innovations numériques, notamment celles incluant une Intelligence Artificielle (ou IA) seront au cœur de nos préoccupations futures : techniques, logistiques et pédagogiques. Les promesses de cette IA sont nombreuses : améliorer notre efficacité diagnostique et thérapeutique, personnaliser à l'extrême la prise en charge du patient, augmenter notre capacité d'analyse et de recherche institutionnelle et collaborative, pour enfin redéfinir les critères d'excellence de la Chirurgie Orthopédique (rien que cela) [1]. Des promesses nombreuses, mais les questions soulevées le sont également [2, 3]. Parmi les autres spécialités chirurgicales, la chirurgie orthopédique sera l'une des disciplines les plus en phase avec ces innovations technologiques et industrielles ! Essayons de nous projeter, voulez-vous ?

## Atout technique tout d'abord, avec l'utilisation du numérique et de l'IA pour assister le chirurgien dans son geste opératoire

Certaines applications sont déjà à portée de mains : l'exemple le plus familier étant l'instrumentation robotique assistée pour « mieux » positionner nos implants. Néanmoins, les applications de l'IA vont au-delà de l'automatisation robotique. Dans un registre similaire, l'accès du chirurgien à la donnée instantanée au bloc opératoire sera permis par une interface numérique et physique permettant un affichage en réalité virtuelle ou en temps réel. La planification et modélisation en temps réel permettra de résoudre instantanément l'équation d'une fracture complexe à plusieurs fragments, tout en proposant à l'utilisateur la meilleure taille de plaque ou le meilleur positionnement de vis d'un point de vue biomécanique. L'implant connecté prévoit déjà d'analyser *in situ* une

série de marqueurs biologiques (température), biochimiques (microparticules, ions) et mécaniques (nombre de cycles, distance parcourue). Toutes ces innovations seront au service du patient, pour une chirurgie résolument plus moderne, plus spécialisée, plus spécifique individuellement [1].

## Atout décisionnel, avec l'utilisation de l'IA pour mieux comprendre, analyser et personnaliser notre stratégie orthopédique

Dans ce domaine où se rejoignent grandes bases de données « big data », statistiques et réseau neuronal, la prédiction d'un risque, d'une complication permettra une personnalisation de l'information au patient, d'imposer un suivi particulier, de modifier nos consignes post-opératoires. Cela, nous le faisons déjà au quotidien, mais par entraînement neuronal intégrant les stratégies de 600 000 patients à travers le monde [2], comme si le savoir médical était contenu

dans le système qui a le plus de données. L'analyse personnalisée du risque fracturaire ou celui de l'usure changerait notre décision chirurgicale ou notre choix d'implants. Mais, la prédiction du risque opératoire, de la mortalité lors de la mise en place d'une prothèse totale de hanche chez un patient fragile sera-t-il un critère opposable ou un simple critère de choix pour porter notre indication ? Car cet atout décisionnel est avant tout un questionnement technique et non éthique. La célèbre Mayo Clinic (USA) a débuté dans ce cadre un partenariat en septembre 2019 avec Google : cette collaboration de 10 ans entend redéfinir et accélérer la position du numérique dans la décision médicale [4]. La production et la conservation de ces données médicales sera la clé de voute du système : équivalence des données entre les populations, accessibilité pour tous aux soins « IA », responsabilité médicale, protection des données personnelles, utilisation commerciale ou assurantielle.

## Atout logistique et organisationnel autour du geste chirurgical avec l'essor des outils numériques dévolus au diagnostic et la compréhension des flux de patients au sein d'une institution

Par exemple, l'utilisation d'une IA « raisonnée » permet déjà de nombreux progrès en imagerie diagnostique, notamment ostéo-articulaire dans le domaine des tumeurs et des malformations [2, 5]. La lecture automatisée d'une radiographie, d'un scanner ou d'une IRM rendra l'analyse d'imagerie et la réalisation de compte rendu plus rapide,



plus fiable, plus critique, limitant les faux négatifs. Elle permettra les dépistages et sélections de patients en première ligne, et renseignera le chirurgien orthopédique sur les patients nécessitant un examen plus approfondi ou plus spécialisé. L'IA interprète aujourd'hui automatiquement une radiographie pour coxarthrose, détecte des fractures considérées comme occultes, confirme la densité osseuse ou l'âge osseux [5].

Renseigner une série de symptômes, d'items cliniques et/ou biologiques afin d'obtenir son diagnostic de certitude sera chose aisée. Rapportant actuellement une précision de plus de 90 % dans le diagnostic de l'asthme [2], il n'existe aucune raison pour que cette IA n'améliore pas notre capacité diagnostique des maladies ostéoarticulaires rares ou complexes dans le futur, en intégrant automatiquement des données cliniques articulaires appréciées par une interface captant le mouvement.

Le numérique prendra sa part de responsabilité dans l'optimisation logistique du soin autour du patient, du chirurgien et de son équipe hautement spécialisée. L'IA permettra une optimisation des parcours du patient au sein d'une structure, une meilleure gestion de lits, une diminution des instrumentations chirurgicales, une automatisation des stocks et commandes au bloc opératoire ; afin de suppléer les failles d'un système technocrate que certains connaissent trop bien. L'optimisation par l'IA des programmes de bloc opératoire et des parcours du patient ont déjà démontré des bénéfices substantiels avec un temps d'attente des patients diminué de 50 % au sein du New York Presbyterian Hospital [3]. Encore une fois, les besoins du patient devront être la priorité absolue si tant est que cela soit transmissible à une interface numérique.

### Enfin, avenir de l'IA au service de la formation et de la recherche

La simulation chirurgicale, promue par nos tutelles par la réforme du 3<sup>e</sup> cycle (R3C), revêt déjà une attention toute particulière bien que trop précoce au regard des investissements publics. Les simulations chirurgicales les plus abouties intégreront nécessairement des éléments « IA » pour la construction des scénarii en chirurgie orthopédique : simulation d'une lésion artérielle ou d'une variation anatomique, appréciations des opérateurs sur le niveau technique, personnalisation de la formation. L'extraction de « big data » favorisera la recherche et le dévelop-

pement au sein de réseaux neuronaux multinationaux pour la prise en charge de nos patients, facilitant la conception d'implants prothétiques, le choix des biomatériaux, prouvant la supériorité d'une technique par rapport à une autre. Mais l'IA devra également faire l'objet d'une validation scientifique continue [6] au sein d'études cliniques de haut niveau réalisées sous une pression sociétale, industrielle et politique grandissante.

Nous apercevons que ces nouvelles technologies vont redéfinir la place du chirurgien orthopédique vis-à-vis de son patient dans son environnement médical. Le facteur humain doit et devra être pris en compte de manière permanente pour utiliser l'IA dans notre pratique quotidienne. Tout d'abord pour limiter une possible déshumanisation de notre métier qui reste avant tout un métier de relations humaines, entre un chirurgien et son patient. Mais également pour ne pas en sous-estimer les limites : les difficultés d'intégrer à notre quotidien un environnement numérique pléthorique, la prévision d'une stratégie thérapeutique imprévisible dans l'algorithme, la définition du cadre juridique dans la décision numérique, la qualité et la préservation des données nécessaires au fonctionnement neuronal, la collégialité d'une décision thérapeutique extrême (tumeur, amputation). Ce n'est pas notre capacité à transmettre à l'IA nos valeurs éthiques, mais notre capacité à conserver ces valeurs qui garantira la position centrale du chirurgien orthopédique dans cet avenir numérique tout proche.

**Louis DAGNEAUX**, *Président du CJO*

*Depuis 1997, le Collège des Jeunes Orthopédistes (CJO) fédère les orthopédistes en formation afin de promouvoir notre spécialité en France, sous l'égide du CNP. Nous intervenons sur des sujets transversaux comme la formation, l'enseignement, la recherche ou encore la mobilité internationale.*

### Références

- [1] Panchmatia JR, Visenio MR, Panch T. The role of artificial intelligence in orthopaedic surgery. *Br J Hosp Med Lond Engl* 2018;79:676-81. <https://doi.org/10.12968/hmed.2018.79.12.676>.
- [2] Artificial Intelligence: Health care, every day life, business. *Its perils and its promise*. N Y Times 2020.
- [3] Bini SA. Artificial Intelligence, Machine Learning, Deep Learning, and Cognitive Computing: What Do These Terms Mean and How Will They Impact Health Care? *J Arthroplasty* 2018; 33:2358-61. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2018.02.067>.
- [4] <https://newsnetwork.mayoclinic.org/discussion/mayo-clinic-selects-google-as-strategic-partner-for-health-care-innovation-cloud-computing/n.d>.
- [5] Gyftopoulos S, Lin D, Knoll F, Doshi AM, Rodrigues TC, Recht MP. Artificial Intelligence in Musculoskeletal Imaging: Current Status and Future Directions. *AJR Am J Roentgenol* 2019; 213:506-13. <https://doi.org/10.2214/AJR.19.21117>.
- [6] Collins GS, Moons KGM. Reporting of artificial intelligence prediction models. *Lancet Lond Engl* 2019;393:1577-9. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)30037-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)30037-6).





# Applications concrètes de l'IA pour l'orthopédiste-traumatologue

Par **Marc-Olivier GAUCI** (Nice) et **Matthieu OLLIVIER** (Marseille)

## Pourquoi le *Machine Learning* (apprentissage machine) intéresserait-il un chirurgien orthopédiste ?

Le principe du *Machine Learning* est de demander à un algorithme de répondre (juste) à une question en se basant sur de nombreuses données historiques « labélisées », par exemple détecter une fracture du col du fémur si elle existe en comparant une radiographie à une base de données certifiée exacte de fémurs proximaux normaux et fracturés.

On peut distinguer deux types d'algorithmes : supervisés et non supervisés.

Un algorithme **supervisé** fonctionne en deux phases : durant la phase d'apprentissage, on lui soumet une base de données d'entrée pour le futur problème à résoudre, mais cette base de données dite « certifiée » est accompagnée de la réponse à la question cherchée. En comparant ses propres réponses avec la « bonne réponse », l'algorithme fait progressivement converger ses paramètres internes pour minimiser l'erreur de prédiction.

Après la phase d'apprentissage (d'où « *Learning* »), l'algorithme peut commencer à traiter des données d'entrée dont la réponse à la question (« cassé ? pas cassé ? ») est in-

connue, en général et particulièrement pour le traitement de série d'images, l'algorithme fonctionnera en rapprochant les données de cette entrée à une image déjà traitée pendant la phase d'apprentissage.

Les algorithmes **non supervisés** fonctionnent sans phase d'apprentissage et fournissent directement une réponse à partir des données d'entrée. Ils traitent des classes de problèmes différents des algorithmes supervisés et sont utilisés en complément de ceux-ci. Selon la problématique posée, il est possible d'utiliser plusieurs algorithmes et méthodes comme par exemple, les arbres de décision ou la régression logistique. Ces algorithmes sont très utilisés en statistique initialement pour le trading et, depuis quelques années, pour les études scientifiques. L'idée est, par exemple, de demander à un algorithme l'évolution de la côte d'une action A en fonction de celle de deux actions B et C. Certaines études récentes établissent le même genre d'équation pour des paramètres anatomiques ou des scores fonctionnels [1, 2].

## *Machine Learning* : de l'application générique à l'orthopédie

Les techniques du *Machine Learning* sont utilisées dans de très nombreux domaines. À titre d'exemple, il peut s'agir de l'industrie

des transports pour le développement d'un système de navigation sans conducteur, du secteur médical où les machines aident à diagnostiquer le cancer, ou bancaire où l'on cherche à estimer la capacité d'une personne à rembourser un prêt.

### Un exemple : la reconnaissance d'images

Il est particulièrement intéressant d'utiliser les algorithmes du *Machine Learning* pour la reconnaissance d'images, notamment les algorithmes supervisés qui permettent d'effectuer des tâches de classification (où on veut classer les cas d'entrées à des groupes connus) et de régression (où on veut prédire une valeur de sortie à partir des données d'entrée). Par exemple, la reconnaissance d'image de Google utilise un algorithme supervisé à des fins de classification. En montrant à l'algorithme des images diverses de chat et en précisant à chaque fois une « étiquette » (« chat » ou « pas chat »), il saura, à la fin de son apprentissage, se concentrer sur les éléments distinctifs de chats qu'il aura mémorisés, et différencier un chat des autres félins proches. Dans certains cas de figure où même l'œil humain peut se tromper, l'identification devient particulièrement difficile pour un algorithme, et se joue à un détail près (Figure 1).



Figure 1

C'est le secteur qui se développe le plus en sciences humaines, des algorithmes entraînés ont déjà démontré des capacités surhumaines de reconnaissance de partie d'échecs, de jeu de Go et autres jeux de stratégie.

Cette supériorité est moins claire pour les imageries médicales où le nombre de variations anatomiques et/ou de topographies lésionnelles est infini (à la différence du nombre de Shannon ( $10^{120}$ ), colossal mais fini de parties d'échec différentes que deux joueurs peuvent jouer). La base de données certifiée doit être immense, de grande qualité et absolument exacte pour qu'un algorithme apprenne à détecter une fracture du radius distal (plus de 2 000 radiographies selon une étude récente de Gan *et al.* [3]) ou du col du fémur (23 000 pour Cheng *et al.* [4]), et sans doute beaucoup plus pour des imageries plus complexes (Scanner, IRM).

De plus, la réglementation européenne sur l'utilisation des données de santé, empêche leur exportation vers des Clouds américains (Google, Amazon, Apple, Microsoft) très en avance sur le codage de ces algorithmes ce qui limite la collaboration avec les principaux acteurs du *Machine Learning*.

### En orthopédie-traumatologie, l'IA est déjà là !

L'utilisation de l'IA en chirurgie orthopédique et traumatologique connaît aujourd'hui un succès croissant et vient « assister » le chirurgien dans toutes les étapes de sa pratique quotidienne, du diagnostic à la thérapeutique et jusqu'au suivi.

Si elle est encore décriée et accusée de prétendre un jour remplacer la réflexion et les mains du chirurgien, l'IA a eu un effet particulièrement bénéfique : remettre le diagnostic et le processus de décision thérapeutique au centre de l'attention. L'utilisation de l'IA va en effet bien au-delà du seul aspect technique du geste chirurgical ou d'une problématique de précision.

En décortiquant les composantes du diagnostic, on découvre qu'il résulte d'un faisceau d'arguments issus de l'interrogatoire, de la clinique, d'imageries morphologiques, d'analyses fonctionnelles, confrontés à des connaissances théoriques, bibliographiques finalement enveloppés d'une subjectivité forgée par l'expérience voire par les fluctuations de l'état émotionnel du chirurgien. Par exemple, le nombre de publications annuelles pour une articulation donnée a été multiplié par 10 depuis 30 ans ! L'utilisation des modèles

3D et 4D ont considérablement complexifié l'interprétation de l'imagerie au quotidien. Il est donc devenu indispensable de s'armer d'IA pour apporter au patient des soins optimaux et conformes à l'état des connaissances actuelles. Enfin, l'IA devrait libérer du temps médical, améliorer nos outils diagnostiques et limiter les erreurs de diagnostic.

### Traumatologie : des urgences à la radiologie

Loin des blocs opératoires, la traumatologie représente plus de 50 % de l'activité des urgences (hors CHU). Nées il y a moins de 2 ans, plusieurs solutions proposent une assistance à l'interprétation des examens radiographiques de débrouillage. L'utilisation de l'IA apporte ici de réelles solutions à l'isolement des urgentistes dans des centres de petites tailles sans accès direct au chirurgien orthopédiste. En effet, des diagnostics tels que la luxation postérieure d'épaule atteignent jusqu'à 80 % de « ratés » ; cela est aussi vrai pour les fractures du calcanéum, du scaphoïde carpien et contribue à une réelle perte de chance pour le patient, voire des procès. L'IA contribue donc à l'amélioration de la qualité des soins et de la satisfaction du patient (Figure 2).

L'autre intérêt de l'IA dans ce cas est de prioriser le temps médical du radiologue. Quand on sait que tous les examens radiologiques doivent être interprétés un à un

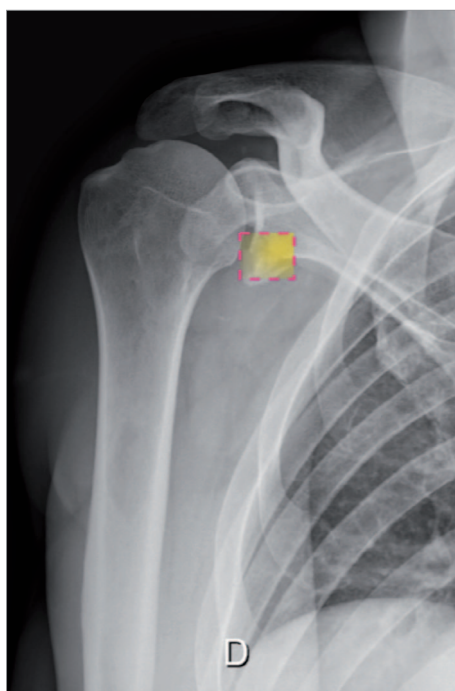


Figure 2. Détection automatique d'une fracture de la glène à l'aide de l'IA (Milvue®)

par les radiologues (souvent le lendemain des acquisitions), on imagine le temps gagné si le radiologue était automatiquement orienté vers la lésion d'intérêt ou si l'IA proposait d'emblée un complément d'investigation (scanner, etc.).

### Amélioration des performances des outils d'imagerie : exemple du scanner-IA

L'IA est aussi utilisée pour améliorer la qualité des images. Cette modalité embarquée permet l'obtention d'images de très haute qualité, tout en abaissant le niveau de dose de rayons-X (-20 à -50 %), de bruit et de temps d'examen. Elle autorise une analyse fine des textures du tissu ostéoarticulaire même en présence de matériel prothétique ou d'ostéosynthèse ou même des examens tomodynamiques dynamiques. Quelques CHU en sont d'ores et déjà dotés comme Dijon ou Nancy. D'autres outils d'imagerie comme l'échographie ou l'IRM sont aussi progressivement renforcés par l'utilisation de l'IA.

### Orthopédie : des experts internationaux s'invitent dans vos planifications

Avec le raffinement du diagnostic par la modélisation 3D et la multiplication des moyens de traitement, la décision thérapeutique est devenue plus complexe. En dehors de l'expertise propre du chirurgien qui est très variable en fonction de son activité, les consensus se réduisent à mesure que les problèmes s'affinent. Il ne persiste plus, à un certain moment, que des avis d'experts qui ne présentent qu'une concordance ( $\kappa$ ) modérée entre eux ( $0,50 < \kappa < 0,60$ ) ... et pour un même expert le choix varie même à quelques semaines d'intervalle ! ( $0,60 < \kappa < 0,80$ ) !

L'IA peut désormais venir en aide aux chirurgiens en proposant de faire émerger un « consensus par cas » pour l'aider dans un choix de prothèse par exemple. Il ne s'agit pas de remplacer le chirurgien dans sa décision mais de l'aider dans une démarche *peer to peer 2.0*. Dans la première phase du *Machine Learning*, cette IA est entraînée par de nombreux cas planifiés au fil de l'eau par des experts puis elle est testée sur de nouveaux cas, inconnus. Les résultats proposés par l'IA sont comparés aux choix effectués par un jury d'experts et tout particulièrement à leur *majority of vote* (« vote de majorité »). L'algorithme ainsi généré permet de proposer un choix d'implant considéré comme le meilleur et surtout ce choix est constant dans le temps. Au final, l'IA dans cette démarche

décisionnelle est une façon de figer à un moment donné le savoir accumulé par les experts et d'en faire une fonction applicable de façon spécifique à chaque patient. Comme un guide patient spécifique... pour la décision thérapeutique ! En pratique, devant une omarthrose centrée, par exemple, et s'il s'agit de décider, pour une glène type B de Walch, entre une prothèse anatomique et une prothèse inversée, l'IA peut apporter au chirurgien une assistance spécifique. À partir des données du patient (âge), de la morphologie 3D de la glène (version, inclinaison, orientation, direction), de la subluxation humérale, etc... l'IA propose une probabilité (en %) que sa prédiction concorde à celle des experts dans ce cas précis. Libre au chirurgien de suivre ou non cette proposition : l'interprétation d'un tel pourcentage étant encore laissée à l'appréciation de tout un chacun.

Ces solutions d'IA investissent peu à peu tous les logiciels de planification et l'implémentation de nouveaux cas au fil du temps améliorera jour après jour les performances de ces systèmes.

**Suivi et instruments de mesure : les mobilités « trackées »**

Le suivi des patients est aussi une cible d'amélioration par l'IA. En effet, là où les chirurgiens font une estimation « à l'œil » (au mieux au goniomètre) des mobilités, il existe une forte variabilité inter/intra-observateur. Or, une évaluation plus précise et reproductible des mobilités est indispensable à l'amélioration de nos pratiques : dessin de prothèses, positionnement des implants, anticipation des mobilités, réduction des complications, etc. L'IA intervient une nouvelle fois en se dissimulant derrière des algorithmes de traitement d'images. Appliqués par exemple à des images issues de caméras de profondeur (type RGB-D, cartes de profondeur), elle permet le calcul des positions des articulations. Il est donc possible d'extraire à partir d'une telle scène tridimensionnelle les angles des mobilités d'intérêt (Figure 3).

Un tel système devrait trouver dans un avenir proche un fort intérêt dans la standardisation des mesures des mobilités, son utilisation en télémédecine, le gain de temps médical en consultation.

**Big data et traumatologie**

Aux extrêmes de la vie, les fractures du sujet âgé et la traumatologie sportive bénéficieront demain d'une prévention 2.0 par l'adjonction de facteurs de risques individuels issus d'une analyse des énormes bases de données de santé. Demain, les outils de prévention des fractures ostéoporotiques intégreront des données démographiques affinées par le prisme des millions de patients pris en charge chaque année en France. Ces outils permettront d'identifier, plus précisément que ce que permet l'évaluation de la densité osseuse, les patients à risque de fracture et instaurer précocement des mesures correctives.

La prévention de la traumatologie sportive suivra la même voie avec des stratégies préventives individuelles venues de l'analyse de centaines de milliers de cas contenus dans les « clouds » de la santé.

Enfin, les thérapeutiques que nous utilisons en pré-, per-, et postopératoire vont être désormais évaluées à travers l'extraction d'immenses séries de cas. Certaines de nos pratiques pourraient être grandement changées maintenant qu'il est « faisable » d'obtenir pour chaque patient l'intégralité des prescriptions médicales, diagnostics et actes thérapeutiques. Ainsi, nos confrères européens ont déjà commencé à publier des travaux analysant l'effet des gestes chirurgicaux (PTH et PTG par exemple) sur les arrêts de travail [5].

**Conclusion**

L'IA a connu plusieurs périodes d'essor depuis les années 1950 et l'idée des « machines pensantes » d'Alan Turing. Aujourd'hui, renforcée par les technologies de communication, la puissance des processeurs informatiques, la mondialisation, la systématisation des recueils de données en particulier dans le domaine de la santé, l'IA fait un retour médiatisé et infiltre tous les domaines de notre activité quotidienne chirurgicale. Sans la remplacer, elle démultiplie notre intelligence clinique et affine notre dextérité opérationnelle. Les perspectives dans un avenir proche sont nombreuses et les bénéfiques pour les patients sont significatifs. Mais si l'IA fascine, elle reste aujourd'hui largement cantonnée à son rôle d'ancillaire (c'est-à-dire de « servant ») et elle est encore loin d'intégrer la qualité première du chirurgien face à une situation clinique inédite (et elles le sont pour beaucoup !) : le bon sens.

**Marc-Olivier GAUCI, Matthieu OLLIVIER**

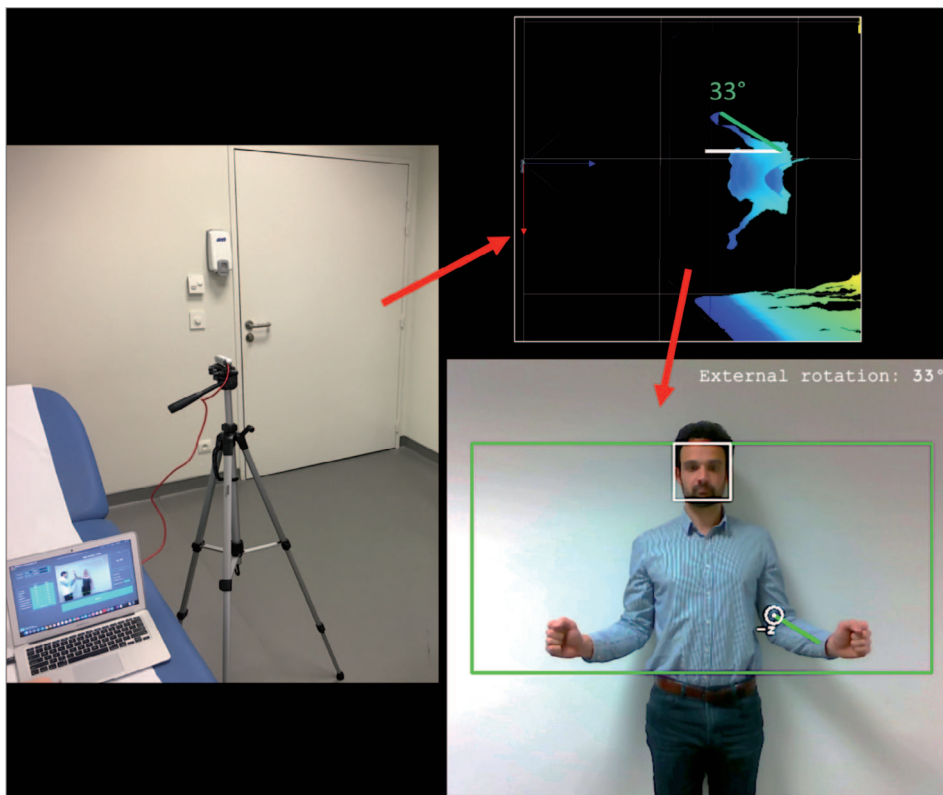


Figure 3. Acquisition automatique du mouvement de rotation externe : acquisition = RGB-D, traitement = skeletal tracking CNN, réseau convolutionnel type « stacked hourglass » dans le référentiel du repère de la caméra.

Références

[1] Kamiya N. Deep Learning Technique for Musculoskeletal Analysis. *Adv Exp Med Biol.* 2020;1213:165-176. doi: 10.1007/978-3-030-33128-3\_11.

[2] Pua YH, Kang H, Thumboo J, Clark RA, Chew ES, Poon CL, Chong HC, Yeo SJ. Machine learning methods are comparable to logistic regression techniques in predicting severe walking limitation following total knee arthroplasty. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2019 Dec 12. doi: 10.1007/s00167-019-05822-7

[3] Gan, Kaifeng, Dingli Xu, Yimu Lin, Yandong Shen, Ting Zhang, Keqi Hu, Ke Zhou, et al. Artificial Intelligence Detection of Distal Radius Fractures: A Comparison between the Convolutional Neural Network and Professional Assessments. *Acta Orthopaedica* 90, no. 4 (2019): 394-400. <https://doi.org/10.1080/17453674.2019.1600125>.

[4] Cheng CT, Ho TY, Lee TY, Chang CC, Chou CC, Chen CC, Chung IF, Liao CH. Application of a deep learning algorithm for detection and visualization of hip fractures on plain

pelvic radiographs. *Eur Radiol.* 2019 Oct;29(10):5469-5477. doi: 10.1007/s00330-019-06167-y. Epub 2019 Apr 1.

[5] Stigmar K, Dahlberg LE, Zhou C, Jacobson Lidgren H, Petersson IF, Englund M. Sick leave in Sweden before and after total joint replacement in hip and knee osteoarthritis patients. *Acta Orthop.* 2017 Apr;88(2):152-157. doi: 10.1080/17453674.2016.1269051. Epub 2016 Dec 20.

## Faut-il craindre l'IA dans notre domaine d'activité ?

Par **Alain C. MASQUELET** (Sorbonne Université, Paris)

Si il est un trait caractéristique de notre époque, c'est bien le dévoilement impudique des extrêmes, favorisé par le déversement des réseaux sociaux, la reddition de la raison devant le primat des émotions, et l'hyperindividualisme narcissique. La démesure semble être la norme qui régit les opinions portant, notamment, sur les progrès foudroyants de ce qu'on appellera du terme très général d'informatique et de son corollaire l'intelligence artificielle. Le but de cet article est de contenir les extrêmes et de ne verser ni dans la technolâtrie dont la pointe emblématique est le transhumanisme, ni dans une technophobie qui apparaît à maintes reprises comme le repli frileux du ressentiment des laissés pour compte. « Ne pas se moquer, ne pas se lamenter, ne pas détester, mais comprendre », telle est la devise de Spinoza qui éclairera notre cheminement dans l'appréhension de ce bouleversement annoncé qu'est l'IA. Notons déjà la défiance qu'entretiennent les Européens continentaux et singulièrement les Français vis-à-vis de l'IA dont les leaders incontestés sont les Anglo-Saxons et à présent les Chinois. Il faut sans doute y voir une brèche culturelle entre les tenants du concept, dont la démarche est jalonnée par l'éthique et les partisans du pragmatisme pour lesquels une bonne idée est d'abord une idée utile. Car il est essentiel de rappeler que l'IA, avant de devenir une technique industrielle, est un



projet philosophique de compréhension du monde. La question de la vérité est au centre de ce projet. À l'inverse de la pensée conceptuelle qui n'est qu'une approximation, un système complet de symboles régi par des lois logiques permettrait, selon ses thuriféraires, de s'approcher au mieux de la vérité. Tenir la pensée pour un calcul ! On retrouve cet arrière-plan chez les grands précurseurs de l'IA : Hilbert, Frege, Turing, qui cultivaient une affinité naturelle entre science informatique et logique. Les craintes qui entourent aujourd'hui le numérique sont comparables aux réticences du passé à l'égard de la mécanisation, qui nous paraissent a posteriori

dérisoires et non fondées. En est-il de même pour cette révolution qui porte le nom d'intelligence artificielle ?

### De quoi l'intelligence artificielle est-elle le nom ?

Avant de spéculer sur les risques de l'IA, il nous faut préciser ce que recouvre ce terme. L'objectif de l'IA, terme apparu dans les années 1950, est en réalité fort simple : répliquer de manière non organique l'intelligence humaine. Confondue dans ses débuts avec l'informatique et après avoir connu quelques « hivers », l'IA en est arrivée à désigner une technique particulière, celle du *machine learning*, c'est-à-dire la possibilité pour les systèmes informatiques d'apprendre par eux-mêmes sans suivre de règle déterminée. Cette rupture, intervenue au tournant du siècle, a été favorisée par trois facteurs décisifs : l'abondance soudaine des données (data) grâce à Internet, l'accroissement vertigineux de la puissance de calcul des ordinateurs et l'exploitation des « réseaux neuronaux » qui consacrent des connexions informatiques fortement interdépendantes, assimilables aux neurones cérébraux. Ce qui est surprenant, c'est que pour tous les procédés de *machine learning* (*supervised learning*, *reinforcement learning*, *unsupervised learning*) les conclusions délivrées par la machine qui a absorbé et digéré quantité de données sont le fruit d'un cheminement

que personne ne peut reconstituer en détail. Sous ces abords de boîte noire, abordons deux exemples qui permettront de démythifier (et de démystifier) l'IA. Le premier concerne la tâche confiée à un ordinateur de pouvoir reconnaître un animal quelconque, un chien. Il est très difficile de définir un chien et cependant un enfant de 3 ans reconnaît instantanément un chien dans la rue même s'il lui manque une patte. Donc plutôt que de chercher à définir l'animal, l'ingénieur informaticien va présenter à la machine plusieurs dizaines de milliers d'images de chien afin de « l'entraîner » à reconnaître une forme caractéristique car la machine a besoin d'une suite infinie d'exemples pour épuiser toutes les situations possibles. La machine est incapable de produire l'idée de chien sous laquelle on peut subsumer un cas particulier comme le fait l'enfant de 3 ans. Le second exemple est celui du fameux Deep Blue qui a vaincu Kasparov aux échecs en 1997. En réalité, pour le mouvement d'une pièce, la machine passe en revue des millions de combinaisons possibles en quelques secondes, sans plan établi, pour sortir celle qui a le plus de probabilité de s'accorder avec la situation en cours. La conclusion de ces deux exemples coule de source. L'IA ne possède pas cette mystérieuse capacité du cerveau humain de reconnaître tous les chiens à partir d'un chien, elle est obligée de connaître tous les chiens pour en reconnaître un. Autrement dit, le concept, attribut du cerveau, est étranger à l'IA. Cela signifie aussi que notre puissance de conceptualisation (la capacité de généraliser à partir d'un nombre limité de cas) reste largement incomprise. Dit autrement, l'IA, par la puissance de calcul et l'abondance de data, se contente d'établir des corrélations entre des conditions et des images. L'intelligence artificielle n'a d'intelligent que le nom. L'IA est une illusion ; elle fait passer pour un processus ce qui n'est qu'un résultat. Deep Blue n'est pas plus intelligent qu'un grille-pain programmable. En outre l'IA ne tombe pas du ciel et ne sort pas, achevée, des circuits informatiques ; la collecte des données nécessaires à l'élaboration des algorithmes implique, à l'échelle mondiale, de recruter des milliers de travailleurs chargés de trier des images ou des informations sur le web ; en dehors de la programmation proprement dite, il y a donc, dans la genèse de l'IA, la part obscure d'un travail de fourmi, mal rémunéré et assuré par un prolétariat transnational.

Certes, les progrès du *machine learning* ont permis l'auto-entraînement de la machine qui, dans le jeu d'échecs par exemple, joue contre elle-même en renforçant sa capacité à distinguer un bon mouvement d'un mauvais sans stratégie préétablie. Mais elle continue d'imiter le résultat des parties précédentes et non pas un processus (la recherche du bon coup). Et même si n'importe quel logiciel est à présent en mesure de battre des grands maîtres, l'intelligence proprement humaine fonctionne selon des processus irréductibles à des combinaisons informatiques.

Voilà qui devrait déjà nous rassurer sur nos craintes d'être placés en situation d'infériorité par une machine plus performante que nous. Nous devons apprendre à distinguer l'intelligence humaine de sa copie artificielle. Cependant, on peut arguer que le fait que les systèmes informatiques soient une illusion par rapport à notre perception du monde (IA faible) n'empêche pas qu'ils puissent devenir une réalité en trouvant leur propre chemin vers la conscience d'eux-mêmes (IA forte).



### L'évolution de l'IA : une super intelligence consciente ?

C'est à ce stade que d'autres capacités humaines, étrangères à la machine, vont finir par dissiper le reste de crainte que nous pouvons nourrir à l'égard de l'IA notamment dans notre domaine d'activité.

Les romans et les films de science-fiction mettent souvent en scène le contrôle du monde et des humains par des machines ayant soudainement développé une conscience ; ce cauchemar rejoint le rêve de certains spécialistes de l'IA de la côte ouest des Etats Unis comme Elon Musk ou Raymond Kurzweil qui ne s'interdisent pas de penser à l'avènement d'une super intelligence, qui résulterait de l'hybridation d'un cerveau humain et d'une machine. Transférer le contenu d'un cerveau dans un ordinateur, entre autres manipulations, permettrait de rivaliser avec une IA devenue consciente et maléfique.

On peut d'ailleurs se demander pourquoi, dans ces scénarios, la révolte des machines est toujours préjudiciable au genre humain. C'est qu'une IA devenue consciente d'elle-même serait naturellement portée à préserver son existence, à améliorer ses capacités et dans ce but à se procurer des ressources pour persévérer dans son être. En réalité les « illuminés » de la Silicon Valley, portés par leur vision utilitariste, partent d'une conception erronée de l'intelligence comme capacité de remplir des objectifs complexes ; pour eux l'intelligence est donc considérée comme le calcul de moyens optimaux tendus vers une finalité imposée de l'extérieur. C'est donc sans surprise qu'ils privilégient le résultat au processus, la performance à la méthode, la corrélation à la causalité, la valeur d'utilité à la valeur de vérité. Or, outre que l'IA ne produit pas de concept, on admet actuellement que les processus mentaux sont ancrés dans un organisme, sans être limités au cerveau. La construction de l'esprit résulte d'une interaction entre notre système nerveux, dont le cerveau, mais aussi l'intestin « notre second cerveau », et le reste de l'organisme. Dans cet ordre d'idées, les travaux actuels visent à redonner un rôle primordial au corps, dans les représentations mentales. L'intelligence n'est pas bornée par la rationalité, elle puise également dans le cortège des affects, produisant ce qu'on appelle la « cognition incarnée ». Il n'y a pas de conscience sans idée, pas d'idée sans affect, pas d'affect sans corps. Ce sont les sentiments qui fondent la faculté de juger et pas seulement la raison, ce sont les sentiments qui produisent du sens et qui sont responsables de l'intentionnalité propre aux décisions humaines. L'IA est certes en mesure de déceler de la tristesse par l'analyse d'un pli du visage ou de l'intonation de la voix, elle est même en mesure de délivrer un message de consolation, mais l'IA ne comprend pas ce qu'est la tristesse. L'IA est incapable d'intégrer la notion de finalité car pour exprimer une intentionnalité il faut être doté d'un corps. L'IA n'est pas capable de choix moral, l'IA ne connaît pas la vie et donc ne peut pas menacer la nôtre. L'IA ne peut être consciente car l'acquisition de la conscience présuppose l'existence d'un corps organique (mais on peut tout à fait imaginer un être artificiel qui pourrait produire de l'intelligence consciente).

Il reste à tracer une dernière frontière à l'IA. Certes, l'IA est en mesure d'éviter de nombreuses erreurs humaines et à ce titre nous

devons composer avec les promesses de l'IA. Mais en revanche l'IA peut commettre des erreurs inconcevables pour un humain. « Traverser à la nage une rivière infestée de crocodiles affamés est une forme de suicide » est une réalité que partagent tous les humains grâce à cette capacité spécifique qu'on appelle le sens commun et qui n'a pas besoin d'être démontré. Le sens commun peut être défini comme un modèle de représentation du monde indépendant de la tâche à accomplir et capable de gérer toute situation qui diverge de la normalité en ce qu'elle recèle de l'incertitude, de l'imprévu, du risque ou de la nouveauté. Mais ce dont nous instruit instantanément le sens commun, l'IA doit l'apprendre. Si la notion de la dangerosité des crocodiles ne fait pas partie de ses paramètres, il n'y a aucune raison qu'elle s'oppose à traverser la rivière. D'où des conclusions parfois surréalistes sinon burlesques délivrées par la machine susceptibles de déclencher notre hilarité. Car l'IA ne possède ni sens commun, ni humour.

**Intelligence artificielle et domaine d'activité**

Ce qui précède peut-être perçu comme un préambule superflu ; mais traquer la crainte de l'IA est un long combat qui comporte de nombreuses étapes qui sont autant de questions auxquelles il faut apporter une réponse claire et intelligible. La question qui va nous occuper à présent est la suivante : à quelle transformation de l'activité professionnelle faut-il s'attendre avec l'emprise de l'IA dans tous les domaines ? Faut-il craindre une

perte massive d'emplois quand l'IA automatisera une grande partie du travail intellectuel comme les machines industrielles l'ont fait pour le travail manuel ? Car l'enjeu concerne bien le secteur tertiaire qui, jusqu'à nos jours, était protégé de la mécanisation. En fait, et c'est une leçon de l'Histoire, les avancées techniques créent toujours davantage d'emplois qu'elles n'en détruisent. La technique permet d'imaginer de nouveaux produits et des services qui jusqu'alors n'existaient pas, ce qui génère de nouveaux marchés et des opportunités d'emplois et d'investissement. Certes, cette vision des choses s'inscrit dans le modèle économique dominant du néolibéralisme dont la critique n'entre pas dans le cadre de cet article. Quoi qu'il en soit, la « destruction créatrice » chère à Schumpeter n'a pas été, jusqu'ici, prise en défaut. Les craintes que nous exprimons à ce sujet trahissent une tendance naturelle (et compréhensible) à enfermer l'avenir dans les paramètres du présent. Car l'avenir par définition est indéchiffrable. On peut bien sûr se complaire à prédire le futur qui n'est, somme toute, qu'une extrapolation du présent mais, toujours, l'à-venir dément le futur prédit. Il faut également faire un sort au mythe de la fin du travail et de la libération qui s'ensuivrait, ouvrant au genre humain l'espace du divertissement et de la culture. En réalité « *tout le malheur des hommes vient d'une seule chose qui est de ne pas savoir demeurer au repos dans une chambre* » disait Pascal. Nous avons un besoin vital de créer de l'activité pour persévérer dans notre être. Si nous étions délivrés de toute peine,

de tout labeur, alors nous serions en permanence en proie à une inquiétude métaphysique prenant sa source dans la conscience de notre finitude.

Exit donc la crainte des suppressions totales et irrémédiables d'activité à la réserve près qu'il faut préparer la transition vers de nouvelles formes d'emploi. Exit également le mirage d'une société humaine pacifiée parce que libérée du « fardeau » du travail.

Reste que pour une frange de la société dont nous faisons partie avec, entre autres, les juges et les banquiers, la question est de définir ce qui sera automatisable avec le concours de l'IA. Une remarque à la fois anodine et profonde de l'épistémologue hongrois Mickael Polanyi peut nous servir de fil pour répondre. « *Nous savons davantage que ce que nous pouvons exprimer* ». Il suffit à chacun de marquer un temps d'arrêt pour prendre conscience que, dans notre activité quotidienne, nous utilisons et nous exploitons, sans le savoir, une somme de connaissances infinies non explicitées. Or le code informatique repose sur l'explicitation. Comment, dès lors, un ingénieur pourrait-il écrire un programme pour simuler un processus dont il ne maîtrise pas tous les détails ? En fait, plus la tâche à réaliser est difficile à décomposer, moins elle pourra être prise en charge par l'IA. L'IA ne fera disparaître que les activités ne comportant aucune prise en compte du contexte, aucune interaction avec l'environnement ou qui ne font intervenir aucune initiative fondée sur une connaissance extérieure. L'IA excelle dans les conditions extrêmes d'un système clos. En revanche, si une tâche requiert de la souplesse d'esprit, du sens commun et l'exercice d'un jugement, il y a peu de chance que l'activité en question soit automatisable. Le sens commun, encore, celui qui permet de saisir la signification du monde qui nous entoure dans un mélange énigmatique de concepts et de finalités, échappe à la capacité de calcul de l'IA. A contrario, les activités peu exigeantes en sens commun seront entièrement soumises à l'IA. Le déchargement dans les ports maritimes, bon exemple d'environnement clos, sera à terme entièrement automatisé et fera disparaître le métier de docker car même si les tâches à accomplir ne sont pas répétitives en raison de la variation de paramètres divers, l'algorithme aura la capacité de s'adapter à des situations changeantes dans la mesure où elles ne font pas intervenir une source extérieure de connaissance.



On soutient parfois que la profession de radiologue est condamnée à terme par l'IA. En réalité, l'élaboration et l'amélioration des algorithmes requièrent un important travail de validation d'image qui ne sera jamais achevé en raison des avancées de la science médicale. D'autre part, le médecin radiologue est indispensable pour faire la synthèse des informations recueillies qui débordent largement la stricte imagerie du patient. La conclusion tient en une brève phrase : le médecin devra co-exister et collaborer (au sens fort et étymologique du terme) avec l'IA. On doit continuer à former des radiologues mais également former les radiologues à l'IA et faire en sorte que l'IA soit contrôlée par les radiologues. La profession subira une profonde transformation mais ne disparaîtra pas, car en cas d'événement inattendu ou d'irrégularité singulière, l'homme devra reprendre la main.

**Doit-on accorder crédit à ceux qui soutiennent que l'IA diminue la capacité de jugement ?**

La réponse est négative car chacun, dans son domaine, perçoit les subtilités nécessaires à l'accomplissement des tâches, qui passent inaperçues aux yeux des autres, mais qui n'en requièrent pas moins l'exercice d'un jugement auquel aucune IA ne pourra se substituer ; notamment dans la démarche médicale faite d'un nouage dialectique entre pensée explicative où l'IA sera d'une aide précieuse et pensée interprétative qui culmine dans un jugement se traduisant par l'édiction d'une règle singulière pour une situation globale qui, par définition, est unique en son genre. Et si on consent à définir la chirurgie comme une pensée en acte, pensée à la fois explicative et interprétative, l'acte est une création qui implique rectification permanente, adaptation et exercice du sens commun. Ce sens commun, parfaitement

étranger à l'IA, dont Descartes disait qu'il était la chose du monde la mieux partagée... et sûrement la moins substituable.

**En conclusion**, gardons-nous de rejeter le progrès technologique ou d'y adhérer sans réserve, ce qui revient au même, et efforçons-nous de le cerner et de le maîtriser pour améliorer notre condition. L'IA n'échappe pas à cette exhortation car elle ne menace ni notre existence ni le cœur de notre métier. Elle ne doit être qu'un outil au service de tous et non pas un instrument de pouvoir.

**Alain C. MASQUELET**

**Bibliographie sommaire**

- Antonio Damasio : *L'ordre étrange des choses*, Odile Jacob 2017
- Gaspard Koenig : *La fin de l'individu*, l'Observatoire 2019
- Luc Julia : *L'intelligence artificielle n'existe pas*, First 2019

## L'impression 3D en orthopédie-traumatologie : bases techniques et applications

Par **François BONNEL** (Montpellier)

**F**ace aux nouvelles technologies numériques, le chirurgien doit s'impliquer personnellement pour participer, maîtriser et diriger les informations obtenues. En aucun cas il ne doit déléguer à un tiers cette tâche car la décision et l'application engagent sa responsabilité vis-à-vis du patient. Il sera par contre le maître d'œuvre en s'adjoignant la compétence d'ingénieurs au sein d'équipes structurées afin de valider ce nouveau mode thérapeutique. L'impression 3D (fabrication numérique directe, prototypage rapide) sert à construire toute sorte d'objet (maisons, nourriture, avions, tissus, organes biologiques) en volume par couches successives à partir d'un fichier modèle traité dans un logiciel spécial (stratifieur). Les algorithmes nécessaires à l'impression 3D sont un exemple d'intelligence artificielle constituant un facteur d'amélioration dans la prise en charge de pathologies complexes.

Le côté technique innovant sera vulgarisé avec les différents procédés des plus simples aux plus sophistiqués auprès des médecins dont la majorité ne possède pas la culture numérique leur permettant de faire un choix stratégique au cours de leur pratique. Son utilisation médicale soulève le problème de responsabilité dans la mesure où la législation n'est pas formalisée et l'efficacité reste à démontrer.

### 1. Les procédures numériques

C'est grâce aux progrès numériques et d'algorithmes que l'impression 3D s'est développée. Les procédures de diagnostic et de thérapeutique rentrent dans un protocole qui aide à la décision en collaboration avec le radiologue. Les données de l'imagerie par tomographie (CT scan : *Computed Tomography*) et de l'imagerie par Résonance Magnétique (*Magnetic Resonance Imaging*)

bouleversent les concepts du diagnostic devenus moins invasifs et plus informatifs. Les images tridimensionnelles haute résolution sont acquises dans un temps limité. Leur visualisation 3D, le reformatage multiplanaire instantané et la navigation fluide au sein de ces empilements d'images en cours contribuent à donner à la radiologie un rôle central dans les disciplines cliniques. Cette imagerie guide les actes chirurgicaux et s'intègre au sein des réflexions de l'équipe chirurgicale. Il existe des limitations dans l'utilisation d'écrans plats pour la visualisation de données en trois dimensions. Une technique émergente comme l'impression 3D ou « *rapid prototyping* », surmonte cette limitation en produisant des objets en trois dimensions (3D) avec une meilleure compréhension des structures complexes pour améliorer et faciliter la qualité diagnostique et l'aide dans la planification pré-chirurgicale. Son application

et ses avantages dans la chirurgie crânio-faciale et maxillo-faciale [1] ont été prouvés.

## 2. Objectifs

La radiographie conventionnelle a montré ses limites dans l'analyse angulaire dont la raison principale est l'absence de reproductibilité en fonction de la position de l'organe auquel se surajoute la projection. L'examen tomodensitométrique avec traitement spécifique par des logiciels dédiés donne des renseignements précis et reproductibles indépendants de l'opérateur. Elle est la seule technique d'acquisition qualitativement envisageable et présente l'avantage d'une meilleure définition des structures osseuses et d'un temps d'acquisition nettement plus court que l'IRM. Avec les outils de post-traitement et l'appui d'algorithmes dédiés, il est possible de retraiter les données avec, à la clef, la visualisation tridimensionnelle des structures anatomiques. La chaîne de processus impliquée de l'acquisition d'image à la production d'un modèle de prototype rapide tridimensionnel se décline en trois étapes avec « acquisition d'image », « post-traitement » et « impression 3D ».

### Première étape - Acquisition d'image et traitement de l'image

Son traitement nécessite l'utilisation de logiciels dédiés, fondés sur la reconstruction volumétrique osseuse en trois étapes. Les informations numériques au format DICOM® (*Digital Imaging and Communication in Médecine*) sont copiées sur un CD-ROM ou stockées sur des serveurs accessibles à distance et transférées sur une station de travail (Figure 1).

### Deuxième étape - Post-traitement : seuillage par densité, segmentation

Leur post-traitement inclut en pratique des outils de segmentation basés sur la croissance de région, l'édition semi-automatique, aussi bien que des outils de visualisation comme le « *volume rendering* » et le reformatage multiplanaire. La segmentation manuelle ou automatisée (baguette magique) de seuillage par densité consiste à définir un intervalle de densité et de sélectionner dans l'image tous les pixels dont la densité est comprise dans cet intervalle. Du point de vue pratique, il permet de circonscrire, dans la majorité des cas, les contours osseux, ou de sélectionner la région qui correspond grossièrement aux corticales osseuses. La vérification du seuillage et la fermeture manuelle des contours consiste à vérifier sur chaque coupe,

en 2D, si l'extraction de la région d'intérêt ou la segmentation ont été correctement réalisées ou en d'autres termes si l'intervalle de densité est adapté aux structures anatomiques à mettre en évidence (Figure 2).

Il revient à l'opérateur de préciser leur morphologie pour obtenir une maquette 3D plus précise. Au terme de la segmentation, les os sont individualisés par une couleur. Le temps nécessaire à cette étape est en moyenne de 5 minutes. La différence de densité entre les os et les tissus mous permet d'expliquer l'efficacité du seuillage par densité, (Figure 2). L'ensemble des pièces osseuses étant délimité (régions d'intérêt : ROI, *region of interest*), il est possible d'obtenir automatiquement des valeurs biométriques et par l'intermédiaire des moments d'inertie des valeurs angulaires non projetées.

### Troisième étape - impression 3D et maquette 3D

Cette étape dans le protocole est fondamentale et consiste à transformer les images du format DICOM au format STL qui va servir à la fabrication de la maquette en 3D

selon le mode additif par exemple. Le but est de regrouper les différentes ROI en une ROI unique au format STL. La qualité de cette reconstruction est basée sur les données du scanner avec des coupes millimétriques selon les trois plans. La caractéristique des pièces à traiter se heurte au problème de reconnaissance initiale. Pour les grosses articulations l'obtention de la maquette en 3D est immédiate. Pour les segments distaux tels que le carpe ou le pied, un travail complémentaire appartient à l'opérateur pour individualiser les interlignes articulaires, ce qui en rebute certains. Les densités de gris ne peuvent pas déterminer automatiquement les interlignes articulaires (Figure 3). Les progrès technologiques seront dans le futur un enjeu majeur de vulgarisation de la méthode.

### 3. Processus de fabrication 3D selon la technique additive (FabAdd)

La première technique de fabrication additive a été la stéréolithographie (SLA) inventée par Charles Hall en 1990, (société 3D Systems®). L'impression 3D ou impression tridimensionnelle sont les termes courants utilisés pour parler des procédés de fabrication

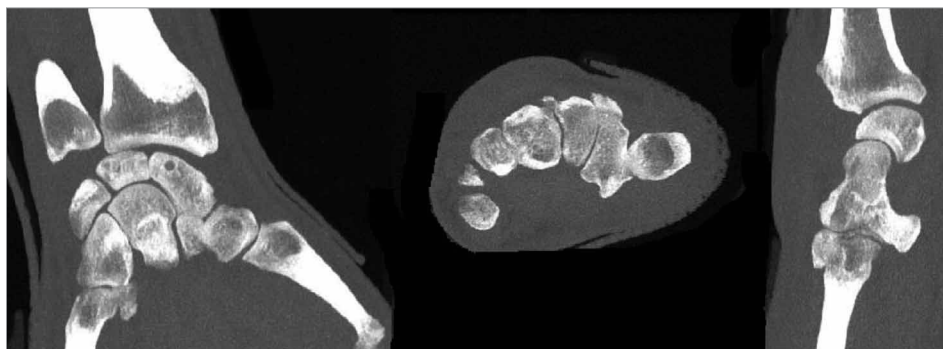


Figure 1. Exploration des os du carpe dans les trois plans. (Dossier O. Mares, Nîmes)

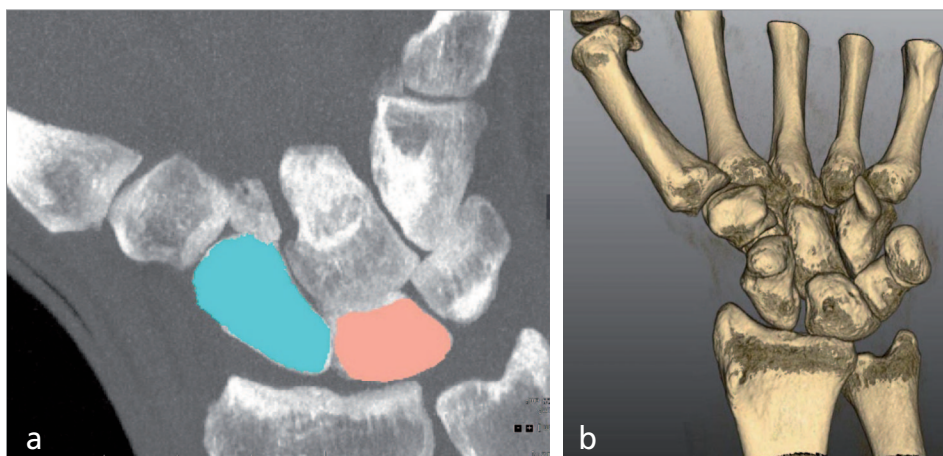


Figure 2. Préparation du carpe ; a : segmentation du scaphoïde (bleue) et du lunatum (rose), b : reconstruction au format DICOM. (Dossier O. Mares, Nîmes)



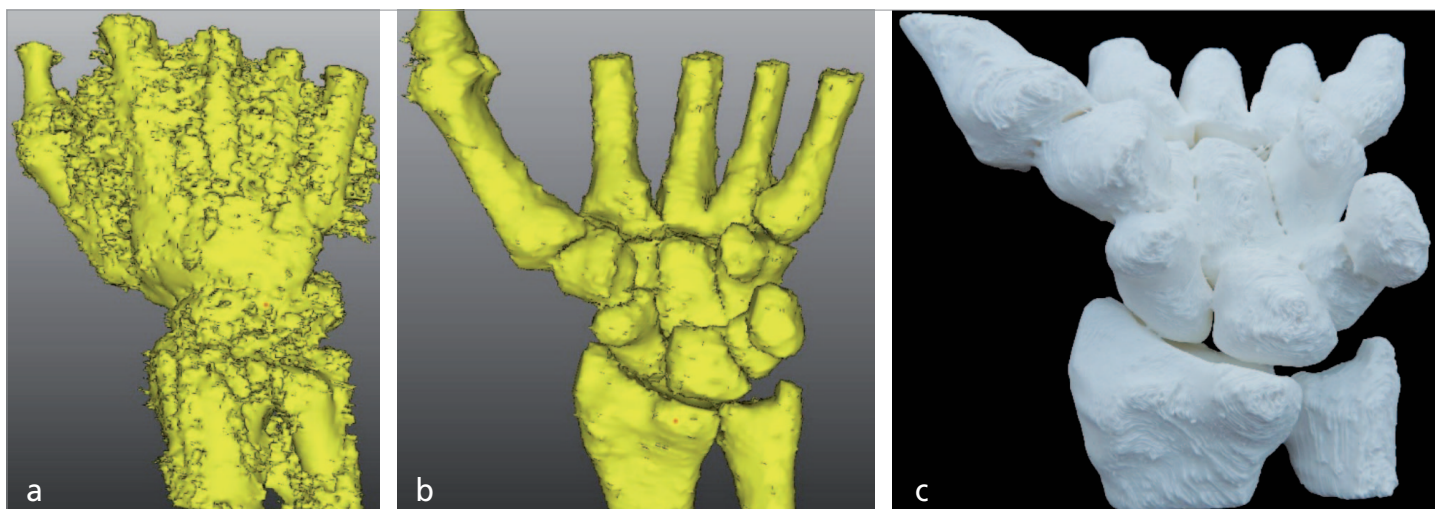


Figure 3. Transformation au format STL, a : la préparation est parasitée et nécessite un travail complémentaire, b : individualisation manuelle des interlignes articulaires, c : au terme, obtention de la maquette définitive en impression 3D. (Fablab, LabSud, Montpellier).

additive. Initialement, en raison de leurs défauts originels, ces procédés ont été développés pour le prototypage rapide, mais sont de plus en plus utilisés pour la fabrication de pièces fonctionnelles. La qualité de l'impression 3D est dépendante de plusieurs facteurs parmi lesquels les machines utilisées et les matériaux de construction. Les retombées de cette technologie ont déjà trouvé une application pour certains fabricants (industriels) qui récupèrent le fichier modèle de la pièce et n'ont plus besoin de stocker des pièces de rechange. L'industrie dentaire et la bijouterie de luxe utilisent déjà l'impression 3D avec succès pour la réalisation de pièces finales.

Des procédés existent avec le FDM (*Fused Deposition Modeling* : modelage par dépôt de matière en fusion), la SLA (Stéréolithographie : une lumière UV solidifie une couche de plastique liquide) et le frittage sélectif

par laser (un laser agglomère une couche de poudre).

### 3.a. Les machines imprimantes 3D

La première imprimante 3D a été brevetée en 1980, par Adrian Bowyer qui a conçu une machine auto-répliquante de prototypage rapide (RepRap®) capable de fabriquer presque toutes les pièces et permettant d'en construire une autre dans le cadre d'institutions appelées FabLabs (*Fabrication Laboratories*). Les machines de FabAdd actuelles savent toutes exploiter le format STL pour la plupart des travaux courants (Figure 4).

Le mot est apparu en anglais, « 3D printer », par analogie avec « printer » (imprimante), vu que ces deux appareils présentent des similarités, il s'agit de fabrication additive d'objet tridimensionnel. Il convient pour certains types de machines de fabrication additive, surtout celles destinées au grand public

avec un chariot qui se déplace pour déposer une couche de matière sur un plateau.

Un opérateur dessine l'objet sur un écran en utilisant un outil de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Le fichier 3D ainsi obtenu est envoyé vers un logiciel spécifique qui le découpe en tranches et l'envoie à l'imprimante qui dépose ou solidifie de la matière couche par couche jusqu'à obtenir la pièce finale (technique additive).

Le terme additif décrit les technologies qui peuvent être utilisées n'importe où dans le cycle de vie du produit, de la pré-production (c'est-à-dire du prototypage rapide) à la production à pleine échelle (fabrication rapide) et même pour les applications d'outillage ou de personnalisation de post-production. Des exemples de technique d'AM (*Additive Manufacturing*) sont le dépôt de filaments en fusion (*fused deposition modeling*, FDM) et le frittage par laser (*laser sintering*).

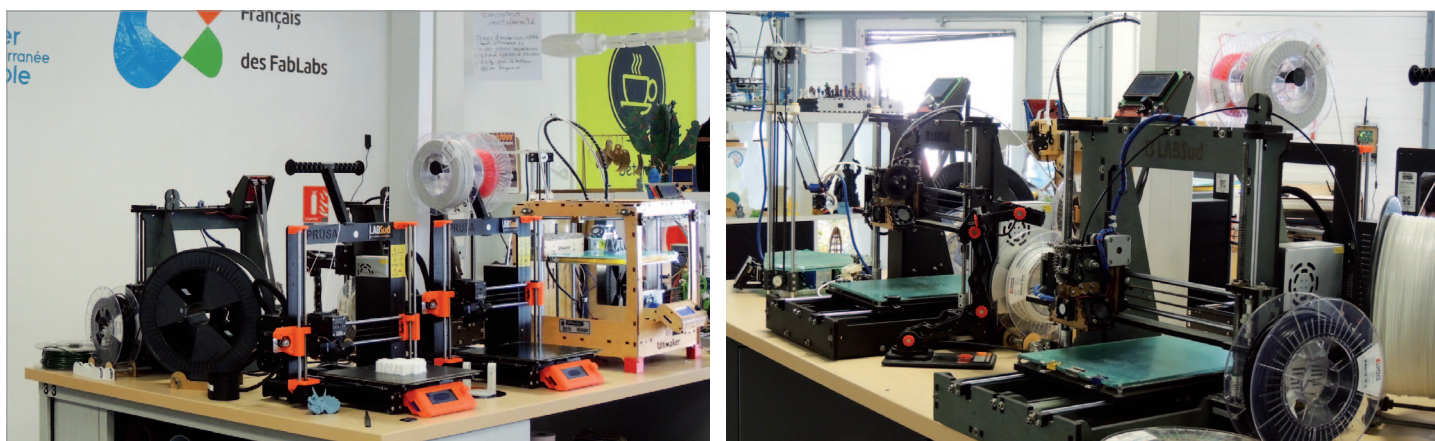


Figure 4. Disposition de différentes machines pour impression 3D dans le cadre d'un Fablab : LabSud, Montpellier (statut associatif).

On dénombre dans le cadre de technologies additives trois types de machines. Les points communs sont un extrudeur avec une buse qui va diriger un filament délivré par une bobine. La qualité de la maquette finale est sous la dépendance des déplacements de la buse dans l'espace.

• **Les machines cartésiennes** avec des possibilités de déplacement selon les trois axes X, Y, Z ont un bon niveau de précision (Figure 5). Les technologies de fabrication 3 axes, les plus courantes « principe cartésien » sont utilisées pour fabriquer la pièce finale, souvent en translation selon les trois dimensions de l'espace. L'*Additive Manufacturing* (AM) est défini par la norme ASTM comme le « processus d'assemblage de matériaux pour fabriquer des objets à partir des données du modèle 3D, le plus souvent couche après couche, par opposition aux méthodes de fabrication soustractive » (synonymes de *Additive Manufacturing* : fabrication additive, procédés additifs, techniques additives, fabrication par couche additive, fabrication des couches et fabrication de forme libre) (Figure 5).

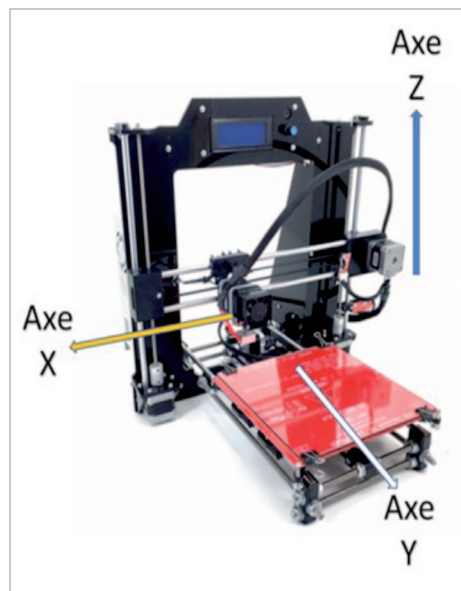


Figure 5. Machine cartésienne (Fablab : LabSud, Montpellier).

• **Les machines de type delta**, électronique avec 32 bits adaptées au mode de déplacement des robots delta, permettent une augmentation de la vitesse des déplacements mais elles sont moins précises. En effet, la carte eMotronic cadencée à 96 Mhz permet un calcul fluide du passage de l'espace cartésien à la cinématique delta (Figure 6).

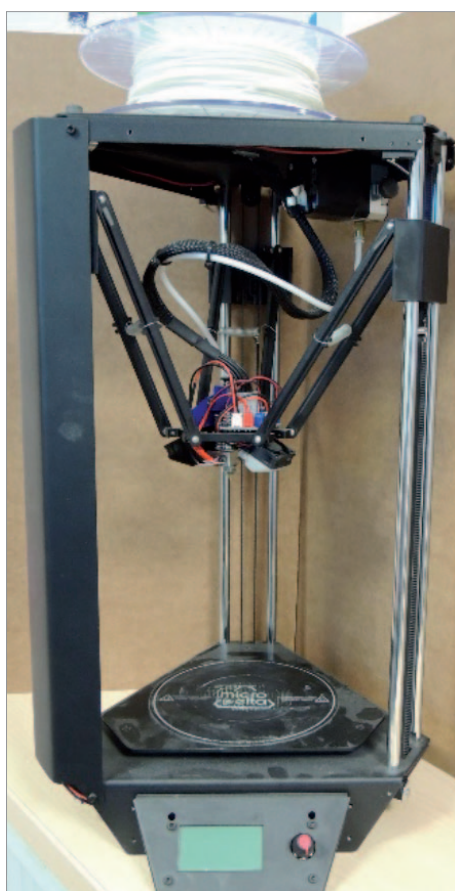


Figure 6. Machine de type delta (Fablab : LabSud, Montpellier).

• **Les machines de type Scara** ont une tête d'impression actionnée par deux bras concentriques. La structure est très inhabituelle par rapport à une imprimante 3D classique (Figure 7).

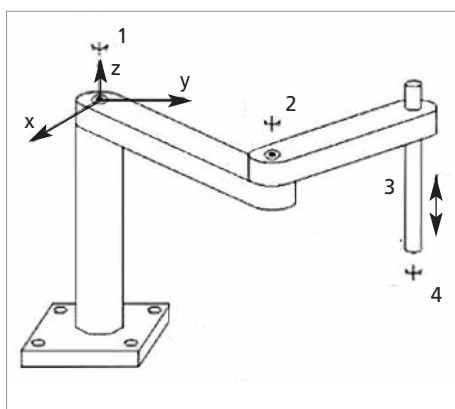


Figure 7. Machine de type Scara.

Les procédés de fabrication 5 axes (les trois translations que l'on a en 3 axes plus 2 axes de rotation, souvent un horizontal et l'autre vertical) permettent de s'affranchir un peu plus de la problématique de supports que l'on rencontre sur certains procédés.

Des logiciels de dessin tridimensionnel, des outils et applications de scannage 3D sont peu à peu développés pour faciliter la création directe du modèle et son importation vers l'imprimante 3D, y compris pour le grand public dont : Fusion 360®, Blender (GNU - PLv2+)®, Sketshup (Freeware)®, OpenSCAD (GNU GPL)®, Autodesk 123D (Freemium)®, Solidworks (Proprietary)®, OnShape®, Tinkercad® et à l'aide de voxels (Volumetric Picture Elements)® ou pixels 3D®.

### 3.b. Matériaux de fabrication

Choisir le bon type de matériau pour imprimer un objet donné est de plus en plus difficile car le marché de l'impression 3D voit apparaître régulièrement des matériaux radicalement nouveaux. Dans l'impression 3D FDM (*Fused Deposition Modeling*®) le PLA et l'ABS sont historiquement les deux polymères les plus utilisés, mais leur dominance initiale était fortuite et il n'y a aucun problème majeur pour que d'autres polymères jouent un rôle clé dans l'avenir de la FDM.

Le prototypage rapide par dépôt de fil FDM (les anglophones parlent de fabrication à filament fondu) consiste à faire fondre un filament de matière synthétique (plastique type ABS ou PLA, comme du dentifrice) à travers une buse (un extrudeur) chauffée à une température variant entre 160° et 400 °C (dans le cadre de la fusion de polymères). Un petit fil de plastique en fusion, d'un diamètre de l'ordre du dixième de millimètre (dans le cadre de la fusion de polymères), en sort. Ce fil est déposé en ligne et vient se coller par re-fusion sur ce qui a été déposé au préalable. Le *Fused Deposition Modeling* est une marque déposée par l'inventeur de la technologie de dépôt de filament en fusion, Stratasys® à la fin des années 1980. En accumulant les couches de plastique, on obtient un objet qui retrouve la température ambiante en quelques minutes (Figures 8 et 9).

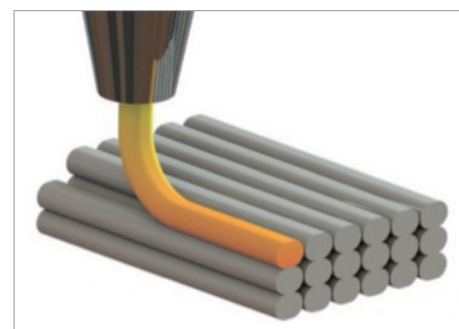


Figure 8. Principe de fabrication additive selon la méthode FDM.



Figure 9. Compléments matériels lors de la phase de fabrication avec l'extrudeur et la buse qui chauffent le fil plastique pour construire la maquette selon la méthode FDM (Fablab : LabSud, Montpellier).

Après préparation de la pièce à traiter, la machine choisie est programmée selon un protocole spécifique qui aboutit à la maquette 3D selon un délai dépendant du volume de la pièce avec, par exemple, pour un pied un temps de fabrication de la maquette définitive de 10 à 12 heures. L'utilisation du logiciel CURA® qui permet de configurer, « slicer » (découper) et générer un G. CODE pour

l'imprimante à partir d'un modèle 3D (le G. Code est un langage par lequel les opérateurs dictent aux machines-outils informatisées comment réaliser un objet) (Figures 10 à 13).

Lorsqu'un objet est créé par couches successives, il devient possible de produire des structures internes complexes, ce qui est

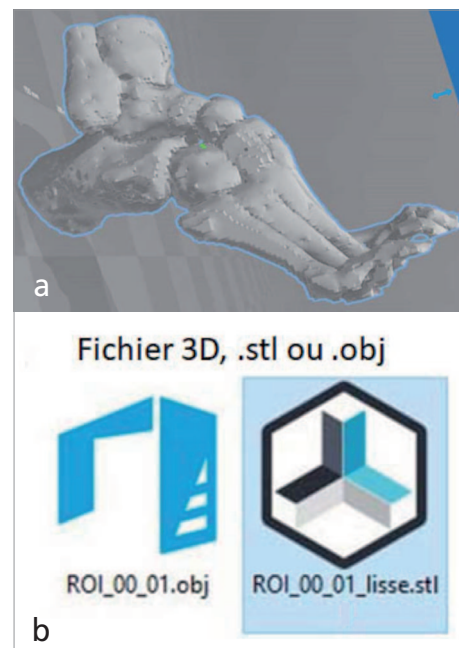


Figure 10. Modalité de fabrication additive avec une machine cartésienne. La pièce est mise au format STL :

a : résultat après lissage du pied destiné à la fabrication de la maquette en impression 3D,

b : traitement de l'image au format STL ou OBJ qui sera traité par « CURA® » qui le transformera en G.CODE pour l'imprimante 3D, [Fablab : LabSud, Montpellier, préparation du modèle avec lissage numérique, réalisation X. Bonnel].

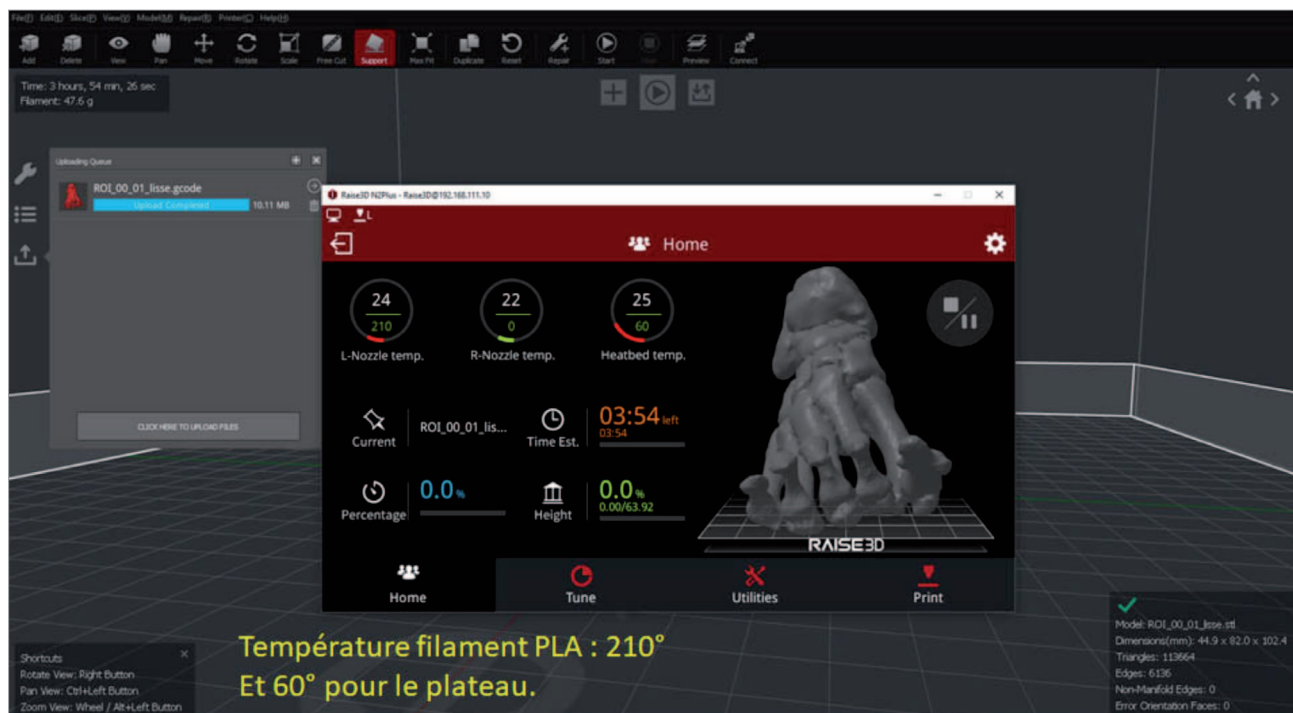


Figure 11. Selon le principe de la technique additive, le filament est porté à la température de 210° à 300° C.

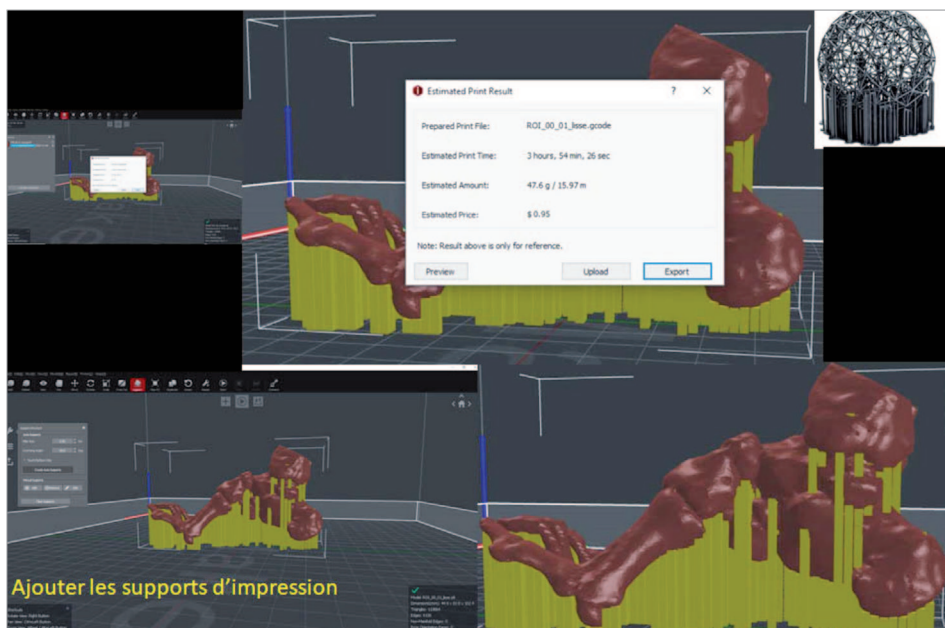


Figure 12. Disposition de la future maquette avec représentation des supports en vert.

impossible par moulage. Les zones qui ne doivent pas supporter de charges peuvent voir leurs cloisons amincies ou même supprimées, et des renforts peuvent être ajoutés dans les parties très sollicitées (Figures 13 et 14).

La fabrication additive augmente la panoplie de matières premières utilisables, par exemple le plastique fondu des machines de type RepRap. Les machines de type RepRap 3D utilisent principalement ce procédé à filament thermoplastique pour les objets que l'on peut fabriquer chez soi, y compris les pièces permettant de fabriquer un second exemplaire de la machine RepRap. Les matières thermoplastiques utilisées se présentent en bobines de filament de 1,75 ou 3 mm de diamètre. Il peut s'agir d'ABS, de PLA (acide polylactique, biodégradable), de PVA (alcool polyvinylique soluble) ou de composites dont certains contiennent des fibres de bois qui peuvent être sablées et peintes ou donner un aspect granuleux en jouant sur la température d'extrusion. La plupart des machines vendues prêtes à l'emploi, comme la Cube®, n'acceptent que des cartouches de filament spéciales. Cette contrainte garantit que le diamètre du filament est régulier et que la matière fond à la température prévue, ce qui réduit les risques d'erreur de fabrication, mais les cartouches sont chères. Les adeptes de l'approche communautaire « open source » autour de la RepRap préfèrent utiliser du filament moins onéreux et des matières non disponibles en cartouches (fluorescentes par exemple). Certaines variantes RepRap so-

phistiquées et leurs descendants commerciaux (comme la MakerBot Replicator®) savent utiliser plusieurs filaments à la fois. Les filaments génériques offrent donc plus de liberté, mais c'est à chacun de vérifier la qualité des lots de chaque fournisseur. Les matériaux sont généralement classés selon 3 catégories : performance mécanique, qualité visuelle et profil d'impression. Le choix du matériau dépend de ce que l'utilisateur veut imprimer :

- **Facilité d'impression** : niveau de facilité d'impression du matériau, adhérence au plateau, vitesse maximale d'impression, fréquence d'échecs d'impression, précision du débit, facilité d'alimentation dans l'imprimante.
- **Qualité visuelle** : rendu de l'objet fini.
- **Contrainte maximale** : la contrainte maximale que l'objet peut subir avant de se rompre en tirant lentement dessus.
- **Elongation à la rupture** : la longueur maximale de l'objet à avoir été étiré avant rupture.
- **Résistance aux chocs** : l'énergie nécessaire pour casser un objet avec un impact soudain.
- **Adhérence entre les couches (isotropie)** : comment les couches du matériau adhèrent entre elles. Ceci est lié à l'isotropie (uniformité dans toutes les directions) ; plus l'adhérence de couche est élevée plus l'objet est isotrope.

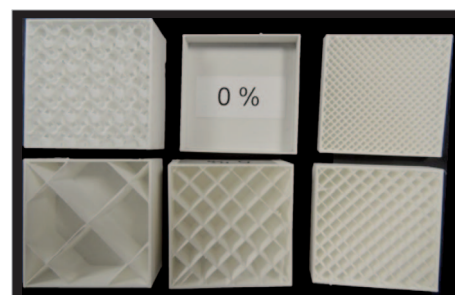


Figure 13. Organisation de la structure interne de la maquette en impression 3D selon plusieurs pourcentages déterminant sa résistance.

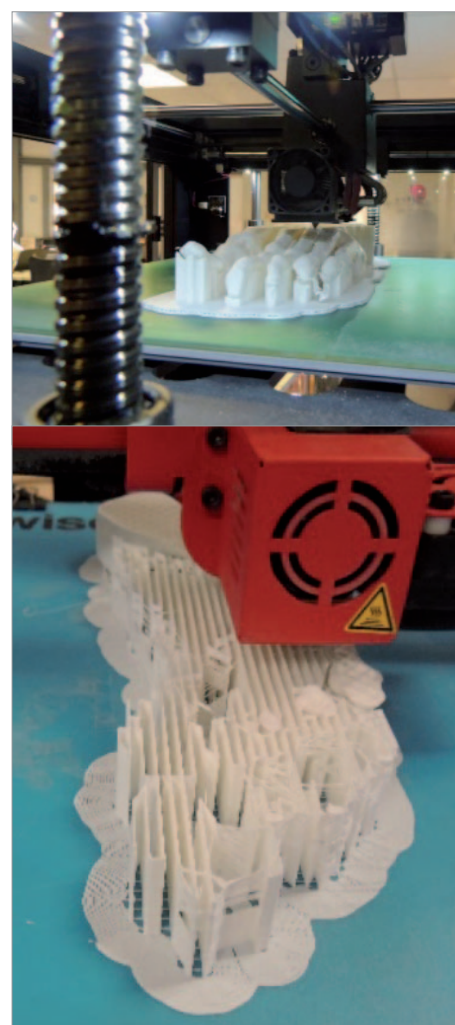


Figure 14. Représentation du plateau de fabrication de la maquette en mode additif, disposition du support de la maquette en cours de réalisation (Fablab : LabSud, Montpellier).

- **Résistance à la chaleur** : la température maximale que l'objet peut supporter avant ramollissement et déformation.

Les différents produits utilisés ont des caractéristiques variées :

- **Le PLA : PolyLactic Acid** (provient du maïs ou de la pomme de terre) : 210/60° C, fragile, facile d'impression, pas de rétraction.
- **L'ABS : Acrylonitrile Butane Styrene** : 240/110° C, solide, rétraction importante, nécessite un refroidissement.
- **Le PET : PolyEthyleneTerephtalate** : 240/90° C, solide, peu de rétraction, qualité alimentaire.
- **L'ASA : Acrilonitrile Styrene Acrilate** : 240/90° C, très solide, peu de rétraction.
- **L'HIPS : High Impact PolyStyrene** : 225/55° C, se dissout dans le limonène-D (substance cristalline amère et blanche trouvée dans les agrumes), utile comme support.

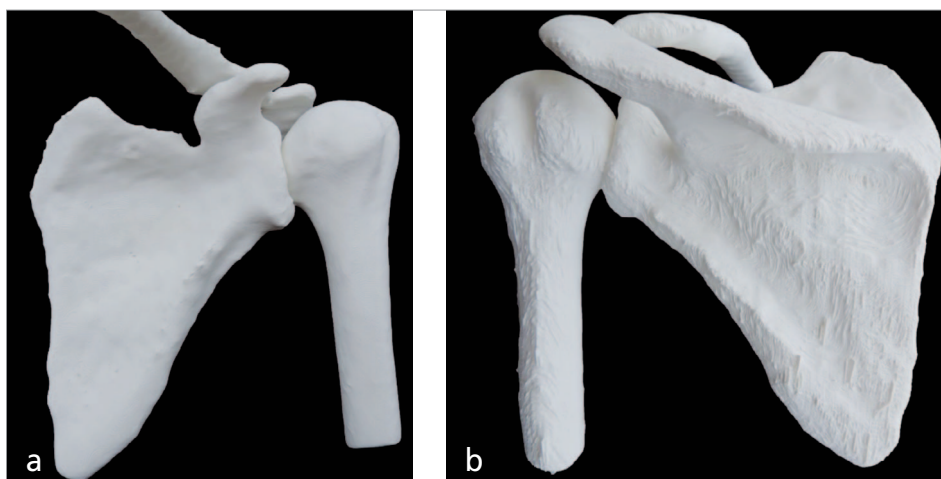


Figure 15. Résultat en impression 3D d'un cas clinique de luxation récidivante de l'épaule. a : vue antérieure, b : vue postérieure avec son encoche prononcée (dossier : Barret, Gauci, Boileau, Nice : CAOS 2019).

La qualité visuelle est testée sans post-traitement significatif. Il existe des moyens pour lisser les impressions 3D et améliorer la qualité visuelle d'un polymère (par exemple la vapeur d'acétone avec l'ABS). La toxicité des polymères d'impression 3D n'est pas très bien connue, c'est un facteur qui pourrait jouer un rôle plus important à l'avenir.

On peut voir des exemples de pièces en impression 3D dans le cadre du Fablab à Montpellier (réalisation X. Bonnel) (Figures 15 à 18).

Figure 16. Fracture de l'extrémité proximale du tibia avec fracture complexe, analyse par : a : tomodensitométrie, b : reconstruction format DICOM, c : format STL, d : maquette impression 3D (Fablab : LabSud, Montpellier).

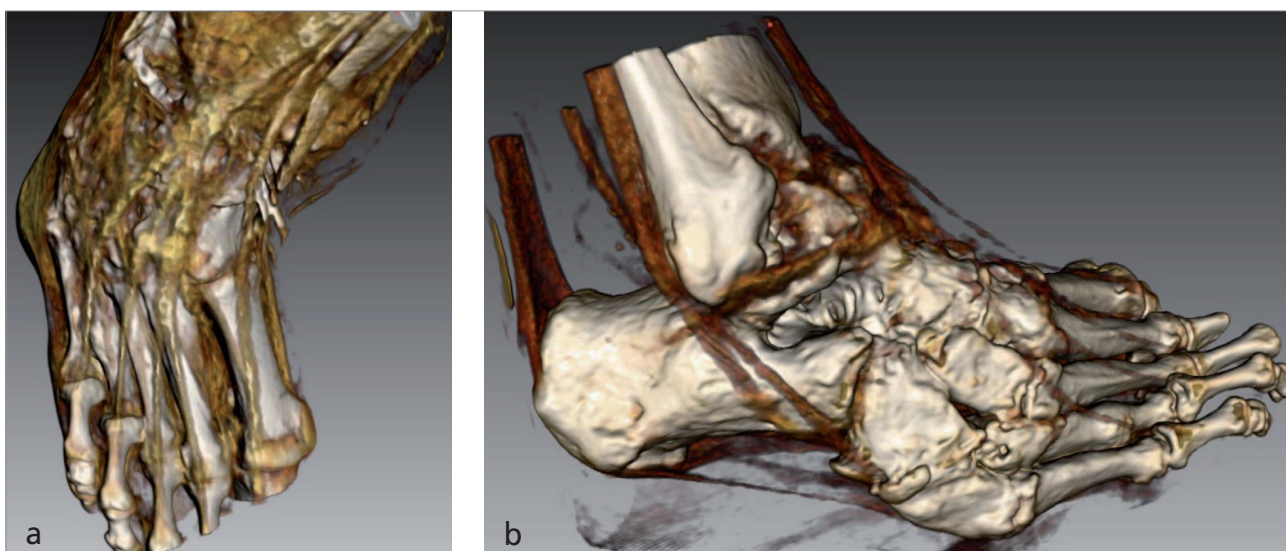
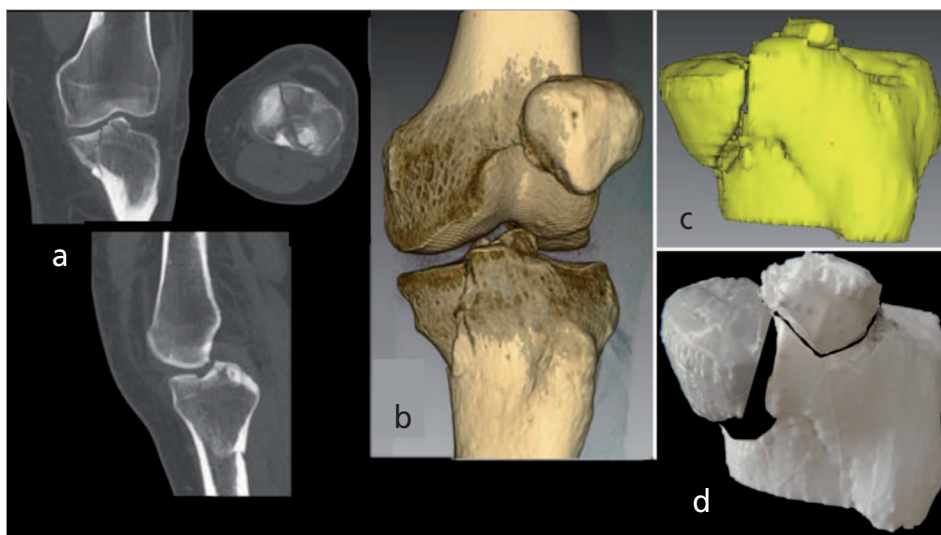


Figure 17. Possibilités d'exploration numérique si tomodensitométrie avec parties molles. a : vue dorsale, b : vue latérale. (dossier D. Mainard, Nancy).

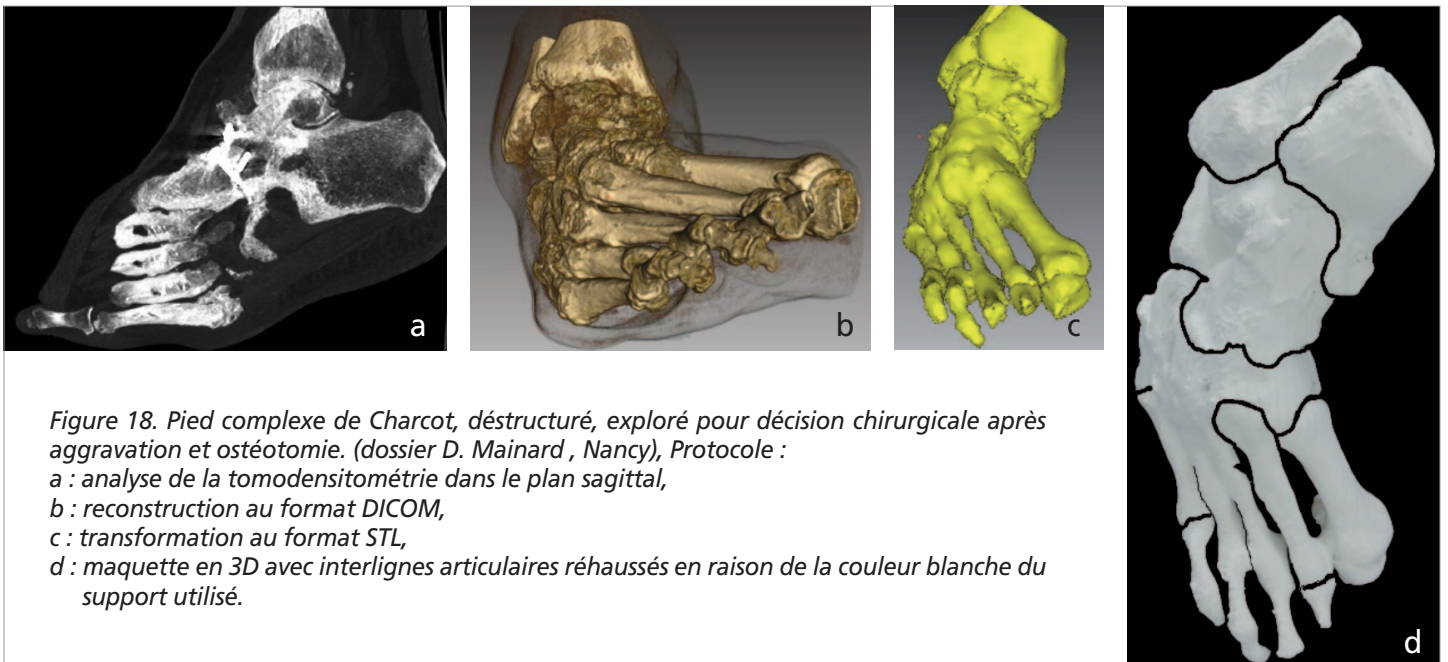


Figure 18. Pied complexe de Charcot, déstructuré, exploré pour décision chirurgicale après aggravation et ostéotomie. (dossier D. Mainard, Nancy), Protocole :  
 a : analyse de la tomodensitométrie dans le plan sagittal,  
 b : reconstruction au format DICOM,  
 c : transformation au format STL,  
 d : maquette en 3D avec interlignes articulaires réhaussés en raison de la couleur blanche du support utilisé.

4. Autres méthodologies de fabrication

D'autres technologies, dont celle du frittage laser sélectif, s'éloignent de ce principe en fixant une poudre dans un bac aux seuls endroits où l'objet doit émerger de la poudre. D'autres techniques qui vont apparaître seront encore plus éloignées de l'idée d'un chariot empilant de la matière comme les résines. Selon le procédé, une panoplie de matériaux peut être utilisée : le plastique (ABS), la cire, le métal, le plâtre de Paris, les céramiques, les poudres et les résines.

• **La stéréolithographie** (STL, de 3D Systems®), créée à la fin des années 1980 et qui est devenue un standard, utilise de la lumière ultraviolette pour solidifier le photopolymère liquide contenu dans un réservoir. Les photopolymères sont des liquides qui passent quasi-instantanément à l'état solide sous l'effet de la source de lumière adaptée. Ce sont d'excellents matériaux pour la fabrication additive. La plateforme s'enfonce de l'épaisseur d'une couche sous la surface du liquide et le rayon laser UV balaye la zone pour solidifier les parties pleines de la première couche, puis la plateforme descend d'un cran pour laisser la valeur d'une couche de liquide la submerger. L'utilisation d'un rayon laser en stéréolithographie permet d'atteindre un excellent niveau de détail dans la technique dite de lithographie multiphotonique.

La résine liquide est solidifiée à l'aide d'un laser ultraviolet, en provoquant une photopolymérisation dans un environnement dont

la teneur en oxygène est contrôlée. L'impression CLIP (Continuous Liquid Interface Production) introduite par Carbon3D® s'inspire d'un procédé additif bien connu de la stéréolithographie. Cette technique d'impression serait l'une des plus rapides, réduisant la durée d'impression à quelques minutes au lieu de quelques heures pour un objet de même taille.

• **Le modelage à jets multiples** (MJM) consiste à déposer une couche de résine (plastique type acrylate ou polypropylène) liquide de la même manière qu'une imprimante à jet d'encre avec une épaisseur de 2/100<sup>e</sup> à 4/100<sup>e</sup> de mm.

• **La stéréolithographie apparatus** (SLA) utilise en général une résine spéciale sensible au traitement par rayon laser. À la fin de chaque couche solidifiée, le laser continue à chauffer la résine qui durcit jusqu'à former l'objet complet (Figure 19).

• **La Selective Laser Melting** (SLM) (Fusion Laser) est la technique la plus utilisée pour faire des pièces métalliques qui offre un bon compromis entre précision et dimensions.

• **La Selective Laser Sintering** (SLS). Les deux principaux systèmes à fusion de lit de poudre disponibles aujourd'hui sont les systèmes utilisant le plastique, et les systèmes utilisant les métaux, connus sous le nom de frittage laser direct de métal (FLDM) ou la fusion sélective par laser (SLS). Jusqu'à récemment, ces deux types de systèmes avaient un coût et une complexité prohibitifs, ce qui a limité leur utilisation aux petites quantités

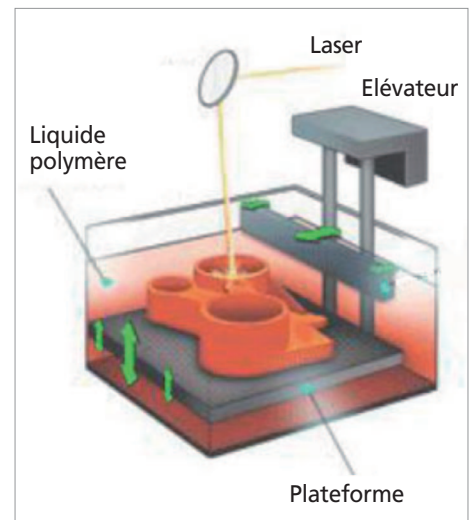


Figure 19. Principe technique de stéréolithographie apparatus (SLA).

de pièces personnalisées ou à valeur élevées, telles que les composants aéronautiques ou les appareils médicaux.

Le frittage sélectif par laser « Selective Laser Sintering » (SLS) est l'une des premières techniques de fabrication additive, développée au milieu des années 1980 par le Dr Carl Deckard et le Dr Joe Beaman à l'université du Texas à Austin. Leur méthode a depuis été adaptée pour fonctionner avec une gamme de matériaux, y compris les plastiques, les métaux, le verre, la céramique et les différentes poudres de matériaux composites. Aujourd'hui, ces technologies sont collectivement classées comme procédés de fabrication additive à fusion de lit de poudre au

cours desquels l'énergie thermique fait fusionner de manière sélective des zones spécifiques d'un lit de poudre.

Elle est similaire à la stéréolithographie, avec utilisation d'une poudre (au lieu d'un photopolymère liquide). Un laser puissant solidifie localement la surface de poudre et l'agglomère aux couches précédentes par frittage. Une nouvelle couche de poudre est ensuite étalée et le processus recommence. L'imprimante préchauffe la poudre à une température légèrement inférieure au point de fusion du matériau brut. Ce préchauffage permet au laser d'augmenter plus facilement la température de zones spécifiques du lit de poudre au fur et à mesure que ce dernier trace la forme du modèle pour solidifier la pièce (Figure 20).

Ainsi, les particules fusionnent mécaniquement pour créer une pièce solide. La poudre non fusionnée sert de support pour la pièce pendant l'impression et élimine le besoin de structures de support dédiées. La plateforme s'abaisse d'une seule couche dans la chambre de fabrication, typiquement entre 50 et 200 microns, puis un réducteur applique une nouvelle couche de poudre par-dessus. Le laser balaye ensuite la section transversale suivante de la pièce. Ce processus se répète pour chaque couche jusqu'à ce que l'impression soit terminée, puis on laisse les pièces finies à l'intérieur de l'imprimante afin qu'elles refroidissent progressivement. Une fois les pièces refroidies, l'opérateur retire la chambre de fabrication de l'imprimante et la transfère à la station de nettoyage, séparant les pièces imprimées et nettoyant l'excès de poudre. Le frittage sélectif par laser ne requiert pas de structures de support parce que la poudre non frittée entoure les pièces durant l'impression. Elle peut produire des géométries complexes qui étaient impossibles par le passé telles que des dispositifs de verrouillage ou des pièces mobiles, des pièces avec composants internes ou des chaînes, et d'autres modèles très complexes. Comme elle devient un procédé de fabrication viable pour un nombre croissant d'applications, elle a le potentiel pour ouvrir de nouvelles perspectives tant en termes de conception que d'ingénierie. Elle permet d'imprimer des pièces complexes en une seule impression qui auraient nécessité, sans cette technologie, l'impression de plusieurs pièces. Cela aide à remédier aux articulations fragiles et réduit également le temps d'assemblage. Le frittage sélectif par laser peut maximiser le potentiel de la conception générative en permettant

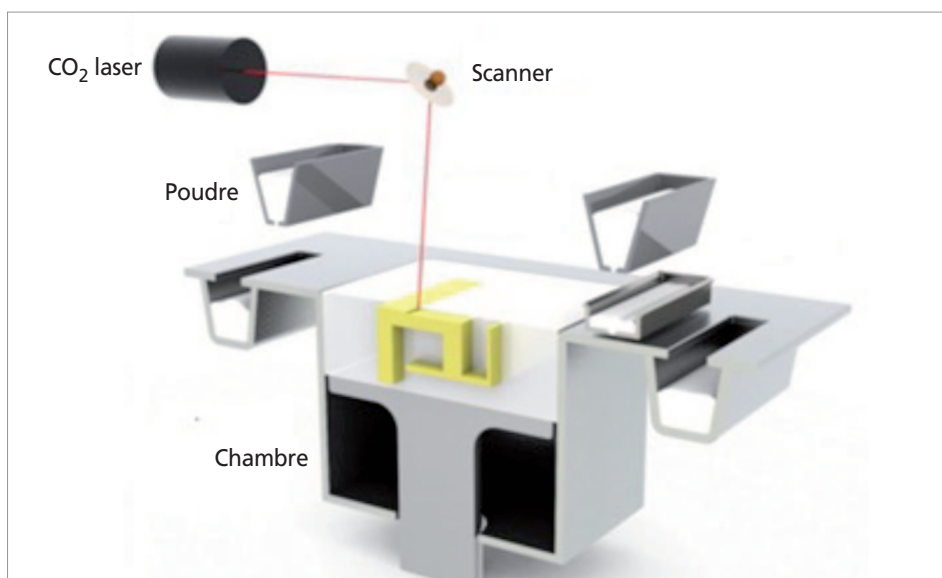


Figure 20. Machine par frittage sélectif par laser « Selective Laser Sintering » (SLS).

des conceptions légères utilisant un maillage qu'il est impossible de réaliser à l'aide des méthodes traditionnelles. La productivité et le rendement sont élevés.

Elle est la technologie de fabrication additive la plus rapide pour des prototypes fonctionnels et durables ainsi que pour des pièces à utilisation finale. Les lasers qui fusionnent la poudre ont une vitesse de balayage plus élevée et sont plus précis que les procédés de dépôt par couche utilisés dans les autres procédés tels que le FDM industriel. Des pièces multiples peuvent être positionnées étroitement durant l'impression pour maximiser l'espace de fabrication disponible dans chaque machine. Les opérateurs utilisent des logiciels ne laissant que des espacements minimaux entre les pièces afin d'atteindre la productivité maximale. Sa grande productivité, coût par pièce compétitif, ainsi que ses matériaux éprouvés font de cette technologie le choix idéal pour une large gamme d'applications, du prototypage fonctionnel à de petits volumes de production industrielle. Les progrès récents des machines, des matériaux et des logiciels ont rendu la SLS accessible à une plus grande gamme d'entreprises et a démocratisé l'utilisation d'outils qui étaient auparavant limités à ses origines. L'évaluation globale de la méthode SLS industrielle est la suivante : Prix à partir de 200 000 € et jusqu'à 1 000 000 €, volume d'impression de 165 x 165 x 320 mm, jusqu'à 550 x 550 x 750 mm, avantages : flux de travail simplifié, grand volume de fabrication, rendement élevé, large gamme de matériaux, mais machines coûteuses, grande empreinte carbone, maintenance importante, opérateur requis.

## 5. Autres procédés

- **La Direct Metal Deposition (DMD)** est un procédé projetant de la poudre métallique fondue en général par un faisceau laser. Les 2 axes supplémentaires ne sont pas forcément courants, mais comme ce procédé est souvent utilisé pour faire du rechargement, les deux derniers axes permettent de s'adapter aux formes complexes.

- **L'Electron Beam Melting (EBM)**. Procédé similaire à la fusion laser (*Selective Laser Melting*) qui utilise un faisceau d'électrons, donnant des pièces de dimensions similaires mais avec quelques changements sur ses propriétés.

## 6. Discussion

L'impression 3D en chirurgie a été développée pour le diagnostic, la planification du traitement et l'aide au positionnement chirurgical per-opératoire particulièrement pour des cas complexes où des images 2D, ainsi que la visualisation virtuelle 3D, sont insuffisantes pour fournir une compréhension complète de la pathologie. Dans le cadre de l'impression 3D plusieurs questions se posent sur son intérêt, ses limites et ses impératifs. Les applications dans la chirurgie pelvienne [2], la neurochirurgie [3], la chirurgie de la colonne vertébrale [4], la chirurgie cardiovasculaire [5] ont démontré une amélioration significative du diagnostic et du traitement en raison de l'évaluation 3D des structures pathologiques, de l'exactitude accrue et de la possibilité de pré planification. La simulation pré-opératoire avec maquette en impression 3D permet de prévoir des complications per-opératoires.

Elle aboutit à réduire le temps chirurgical et, par conséquent, à une utilisation rentable en chirurgie [6].

Kunihiro [7] a expérimenté l'impression 3D pour la planification du traitement des cals vicieux à l'avant-bras. Son but était d'examiner les paramètres CT scan appropriés exigés pour réduire l'exposition aux rayonnements en maintenant l'exactitude des modèles 3D du radius et de l'ulna. Douze squelettes d'avant-bras secs ont été utilisés avec deux paramètres CT scan différents. L'exactitude a été évaluée en mesurant la divergence entre les modèles reconstruits avec des paramètres d'irradiation par CT scan faibles et normaux, l'erreur entre les données anatomiques réelles et le modèle osseux 3D obtenu et la différence entre un modèle osseux 3D construit à partir d'un os sec et un modèle reconstruit avec simulation de tissu mou radio-opaque. L'index de la dose (CTDI) et le produit de longueur de dose (DLP) ont été enregistrés pour évaluer l'exposition aux rayonnements. L'erreur moyenne entre des modèles osseux construits de deux paramètres CT différait de 0,04 mm. La dose d'irradiation pour un examen normal était de 9,3 et 563 mGy/cm et ceux pour la condition de dose de radiation basse de 0,3 et 18 mGy/cm. L'erreur moyenne entre les modèles osseux et les données de balayage de la mesure de contact était 0,45 mm. L'erreur moyenne entre un modèle 3D construit sur os sec et celui avec simulation de tissu mou radio-opaque était 0,06 mm. En conclusion, l'impression 3D a un taux d'irradiation faible soit 1/30<sup>e</sup> de la dose d'irradiation normale.

Pour les mesures de dent-à-dent, la différence moyenne était  $0,1 \pm 0,2$  mm. Pour les mesures osseuses-à-dent, la différence moyenne était  $0,2 \pm 0,3$  mm. L'erreur entre la reconstruction par CT scan et l'impression 3D était de 0,04 mm [7].

Les simulateurs virtuels qui permettent la segmentation et la manipulation de fragments de fracture individuels peuvent aider le chirurgien dans la compréhension de l'anatomie de la fracture et la topographie osseuse et améliorer, par la suite, des réductions peropératoires. Ces outils peuvent aussi être utiles pour former de jeunes chirurgiens. Les systèmes qui automatisent entièrement la segmentation de modèles de fractures sans frais financiers peuvent avoir une utilité clinique [8].

## Facteurs juridiques

L'introduction dans l'arsenal thérapeutique d'une technologie innovante nécessite des facteurs décisionnels dont la qualité, la sécurité et l'efficacité. Pour valider cette méthode, la création de registres s'impose selon des critères déterminés dans le cadre de structures limitées. Les études d'auteurs belges sur la chirurgie maxillo-faciale, la chirurgie cardiovasculaire, la chirurgie crânienne, la chirurgie de la colonne vertébrale et la dentisterie, ne démontrent pas que l'impression 3D présente un rapport coût-efficacité plus favorable. La fabrication par impression 3D fait intervenir toute une série d'acteurs dont il faut déterminer leurs responsabilités : le chirurgien concepteur du projet initial, l'ingénieur informaticien à l'origine du logiciel, les producteurs de l'imprimante, du matériau, du logiciel, de l'implant et de l'hôpital [10].

L'imprimante 3D sort du cadre de la réglementation relative aux dispositifs médicaux, mais elle doit satisfaire à certaines exigences de qualité et de sécurité définies dans la directive européenne. A l'exclusion de logiciels utilisés dans le cadre du processus d'impression 3D qui peuvent être considérés comme des dispositifs médicaux faisant office de moyen diagnostique ou thérapeutique. Dans le cadre du consentement éclairé au patient il n'existe pas de preuves scientifiques suffisamment fiables concernant l'efficacité et la sécurité des dispositifs imprimés en 3D. Pour une application humaine, il faudra définir un cadre juridique d'accès au marché, de responsabilité, de protection des données personnelles, de droits du patient, de traçabilité, de remboursement et de droit de propriété intellectuelle. La notion de remboursement en l'absence de critères d'efficacité n'est pas envisageable.

Dans l'état actuel, la réglementation française [11] concernant les dispositifs médicaux (DM) est complexe. L'impression 3D n'est pas considérée comme un mode de fabrication particulier et obéit, en l'absence actuelle de réglementation spécifique, à la réglementation générale. Les prototypes ou les démonstrateurs qui n'entreront pas au contact du patient ne sont pas des DM et peuvent être réalisés et utilisés sans réglementation particulière. Les modèles servant à l'analyse d'une situation anatomique ou à la planification d'une intervention et qui ne seront pas mis au contact du patient ne sont pas des DM et peuvent être produits et utilisés sans ré-

glementation. Les modèles servant à préformer des plaques et n'entrant pas au contact direct du patient ne sont pas des DM et peuvent être imprimés et utilisés sans restriction, au contraire des plaques elles-mêmes qui sont toutes des DM de classe IIb. Ces plaques étant certifiées pour être modelées par le fabricant, le fait de les préformer avant stérilisation ne modifie pas leur statut. Dans ces situations, il semble cependant utile (mais pas obligatoire) de vérifier la précision des imprimantes utilisées de manière à garantir que les cotes des objets imprimés respectent les besoins chirurgicaux. Tous les objets imprimés entrant en contact avec le patient sont des DM. Les guides de coupe osseuse sont des DM de classe IIa. Les plaques d'ostéosynthèse sur mesure imprimées (par frittage laser par exemple) sont des DM de classe IIb. La personne morale ou physique qui imprime ces DM, fusse-t-elle un établissement de santé, est considérée comme un fabricant de DM au titre réglementaire auquel la réglementation française impose un cahier des charges précis [12, 13].

## 7. Perspectives

Les procédures chirurgicales exigent une connaissance approfondie anatomique et leur rapport topographique. Les visualisations 2D ou 3D sur un écran d'ordinateur peuvent être insuffisantes pour obtenir une compréhension intuitive de détails anatomiques complexes [14]. L'impression 3D offre la possibilité de réaliser des procédures chirurgicales aussi bien que spécifiques dans des cas très complexes pour améliorer les capacités du chirurgien et ses résultats [15, 16]. Des modèles d'impression 3D peuvent participer à la formation intensive de jeunes chirurgiens [17]. Le domaine de la médecine profite aussi de l'impression 3D, avec la création d'un matériau osseux identique [18] ou la création de prothèses et implants (hanches artificielles, appareils dentaires et auditifs personnalisés) [19] et exosquelettes personnalisés [20].

Chris Anderson, écrivain et journaliste américain, auteur de « *Makers : The New Industrial Revolution* » (Crown Business, New York, 2012), voit dans l'avènement de l'impression tridimensionnelle une troisième révolution industrielle. Barack Obama (ancien Président des États-Unis) a indiqué sa volonté, lors de son discours sur l'état de l'Union en février 2013, pour que l'Amérique investisse dans la création de centres d'impression 3D dans le but de dynamiser l'innovation et de



créer des emplois. La fabrication numérique directe est déjà utilisée par la société GE (General Electric) qui produit 24 000 moteurs à réaction par an de cette façon tout en conservant la liberté de modifier ou de retoucher le modèle si un point faible était découvert dans le produit. L'opération se résume à retoucher le fichier de modèle sur ordinateur puis à faire fabriquer les nouvelles pièces. En 2012, le marché mondial de l'impression 3D a atteint 2,2 milliards de dollars avec une croissance annuelle de 30 %.

**Conclusion**

Dans la pathologie osseuse, le recours à des logiciels d'analyse tridimensionnelle pour la caractérisation géométrique est de plus en plus fréquent. Ces systèmes présentent l'énorme avantage de pouvoir autoriser des évaluations fonctionnelles *in vivo* et *in vitro*. La chirurgie assistée par ordinateur n'étant pas encore de pratique courante, l'impression 3D est une étape intermédiaire facilement réalisable pour une meilleure compréhension des déformations et de leur prise en charge chirurgicale. L'impression 3D en chirurgie est à développer pour le diagnostic, la planification du traitement et une nouvelle sorte de navigation chirurgicale per-opératoire particulièrement pour des cas complexes où des images 2D ou la visualisation virtuelle 3D sont insuffisants pour fournir une compréhension complète de la pathologie. Cette méthodologie serait utile pour former des chirurgiens en simulant des procédures chirurgicales répétitives à partir de dossiers très réalistes sans aucun risque sur le patient comme le préconise la HAS (Figure 21). Les radiologues jouent un rôle central dans cette ingénierie de connexion avec l'association proche et la collaboration de radiologues, de cliniciens, d'ingénieurs et de fabricants de matériels. Le travail récent a démontré que le workflow entier peut être intégré dans la routine clinique [21].

**François BONNEL**

**Références**

[1] Elgalal M, Kozakiewicz M, Olszycki M, Walkowiak B, Stefanczyk L, (2009) Custom implant design and surgical pre-planning using rapid prototyping and anatomical models for the repair of orbital floor fractures. *Eur Radiol* 19 (Suppl 1):S397.  
 [2] Guarino J, Tennyson S, McCain G, Bond L, (2007) Rapid prototyping technology for surgeries of the pediatric spine and pelvis: benefits analysis. *J Pediatr Orthop* 27:955-960.

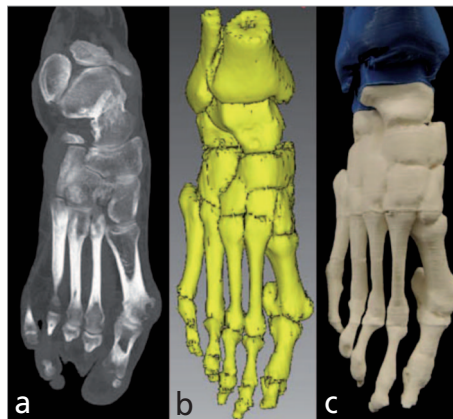


Figure 21. Dossier d'hallux valgus exploré pour métatarsalgie et utilisé dans le cadre d'une formation chirurgicale pour manipulation technique pré opératoire. a : résultat de la tomodensitométrie, b : format STL, c : maquette en impression 3D pour geste chirurgical de correction de l'hallux valgus (Fablab : LabSud, Montpellier).

[3] Wurm G, Tomancok B, Pogady P, Holl K, (2004) Cerebrovascular stereolithographic bio-modeling for aneurysm surgery. *Technical note. J Neurosurg* 100:139-145.  
 [4] Paiva W, Amorim R, Bezerra D, Masini M, (2007) Application of the stereolithography technique in complex spine surgery. *Arq Neuropsiquiatr* 65:443-445.  
 [5] Armillotta A, Bonhoeffer P, Dubini G, Ferragina S, et.al. (2007) Use of rapid prototyping models in the planning of percutaneous pulmonary valved stent implantation. *Proc Inst Mech Eng H* 221:407-416.  
 [6] Hiramatsu H, Yamaguchi H, Nimi S, Ono H, (2004) Rapid prototyping of the larynx for laryngeal frame work surgery. *Nippon Jibiinkoka Gakkai Kaiho* 107:949-955.  
 [7] Kunihiro Oka, Tsuyoshi Murase, Hisao Moritomo et al. Accuracy analysis of three-dimensional bone surface models of the forearm constructed from multidetector computed tomography data. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* 2009 : 5, 452-457.  
 [8] Gateno J, James Xia J, John F. Teichgraeber JF, (2003) A new technique for the creation of a computerized composite skull model. *American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons J Oral Maxillofac Surg* 61:222-227.  
 [9] Citak M, Michael J. Gardner MJ, Kendoff D, (2008) 3D Planning of acetabular fracture reduction. *J Orthop Res* 26:547-552.  
 [10] Vinck I, Vijverman A, Vollebregt E, Broeckx N, Wouters K, Piët M, Bacic N, Vlayen J, Thiry N, Neyt M. Utilisation responsable des dispositifs médicaux à haut risque : l'exemple de l'impression 3D – Résumé. Health Technology Assessment (HTA). Bruxelles : Centre Fédéral d'Expertise des Soins de Santé (KCE). 2018. KCE Reports 297Bs.D/2018/10.273/02.

[11] Montmartina M., Meyerb C., Euvrardbcd E., Pazartd L. et al.(2015) L'impression 3D à l'hôpital : quelle réglementation en France ? *3D printing in health care facilities: What legislation in France?* 116, 5, 302-307. <https://doi.org/10.1016/j.revsto.2015.04.007>.  
 [12] AFNOR. NF en ISO 13485:2012. Dispositifs médicaux : systèmes de management de la qualité. [www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-13485/dispositifs-medicaux-systemes-management-de-la-qualite-exigences-a-des-fins-reglementaires/article/800941/fa177946](http://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-13485/dispositifs-medicaux-systemes-management-de-la-qualite-exigences-a-des-fins-reglementaires/article/800941/fa177946) [en ligne, parution 09/2012].  
 [13] ANSM. Guide général pour la mise sur le marché de dispositifs médicaux sur mesure. [http://ansm.sante.fr/var/ansm\\_site/storage/original/application/8ffa2bc41c5d915d398280e0e404130d.pdf](http://ansm.sante.fr/var/ansm_site/storage/original/application/8ffa2bc41c5d915d398280e0e404130d.pdf).  
 [14] Kim MS, Hansgen AR, Wink O, Quaipe RA, Carroll JD, (2008) Rapid prototyping : a new tool in understanding and treating structural heart disease. *Circulation* 117:2388-2394.  
 [15] Knox K, Kerber C, Singel S, Bailey M, Imbese S, (2005) Rapid prototyping to create vascular replicas from CT scan data : making tools to teach, rehearse, and choose treatment strategies. *Catheter Cardiovasc Interv* 65:47-53.  
 [16] Sulaiman A, Bousset L, Taconnet F, Serfaty J, (2008) In vitro non-rigid life-size model of aortic arch aneurysm for endovascular prosthesis assessment. *Eur J Cardiothorac Surg* 33:53-57.  
 [17] X. Zhang, Z. Xu et al. Application of three dimensional reconstruction and printing as an elective course for undergraduate medical students: an exploratory trial. *Surgical and Radiologic Anatomy* (2019)41:11931204, <https://doi.org/10.1007/s00276-019-02248-1>.  
 [18] Ciocca L, Mingucci R, Gassino G, Scotti R, (2007) CAD/CAM ear model and virtual construction of the mold. *J Prosthet Dent* 98:339-343.  
 [19] M. Bartikian, A. Ferreira, A. Goncalves Ferreira, L. Neto. (2019) 3D printing anatomical models of head bones. *Surgical and Radiologic Anatomy* 41:1205-1209, <https://doi.org/10.1007/s00276-018-2148-4>.  
 [20] Dai KR, Yan MN, Zhu ZA, SunYH (2007) Computer-aided custom-made hemipelvic prosthesis used in extensive pelvic lesions. *J Arthroplasty* 22:981-986.  
 [21] Berman P, Sosna J, (2009) Advent of 3D printing based on MDCT data. *Eur Radiol* 19(Suppl 1):S397.

Pas de liens d'intérêts.

Remerciements :

- Professeur L. Favard pour la relecture de cette présentation.
- LabSud Montpellier (Fablab) pour l'autorisation de reproduction et la mise à disposition des machines pour la fabrication des maquettes en impression 3D (statut associatif).

# Avenir de l'intelligence artificielle en chirurgie

Par **Thomas GREGORY**<sup>1,2</sup> et **Guillaume DARDENNE**<sup>3,4</sup>

- 1. Hôpital Avicenne, APHP-Université Sorbonne-Paris-Nord, Bobigny
- 2. Equipe projet MOVEO, La Maison des Sciences Numériques, Université Sorbonne-Paris-Nord
- 3. Centre Hospitalier Régional Universitaire de Brest
- 4. Laboratoire de Traitement de l'Information Médicale (LaTIM), INSERM, Brest

## Introduction

Nous vivons depuis 1969 dans l'aire de la 3<sup>e</sup> révolution industrielle, celle du numérique. À l'instar des révolutions précédentes, cette révolution du numérique affecte tous les aspects de la vie quotidienne. Et à l'instar de toute révolution, celle-ci n'évolue pas de façon progressive mais bien de façon exponentielle avec des éléments accélérateurs : l'ordinateur pour tous dans les années 1980, Internet en 2000, le Smartphone en 2007 (Figure 1).

Gregory *et al.* ont proposé une classification des différents aspects que prend cette révolution numérique en santé. Cette classification comprend 6 domaines : la médecine personnalisée (big data et objets connectés), la télémédecine (et ses différents sous-chapitres : télé-consultation, télé-surveillance, télé-expertise, télé-assistance, régulation médicale), la formation par la simulation, le médecin augmenté, le patient augmenté et le patient partenaire (Figure 2).

Le facteur accélérateur est aujourd'hui l'Intelligence Artificielle (IA), et notamment l'apprentissage profond ou *Deep Learning*. Il s'agit d'un facteur accélérateur impactant chacun des 6 domaines, soit directement par le biais d'algorithmes avancés de traitement de données médicales pour apporter un meilleur soin, ou soit indirectement, par

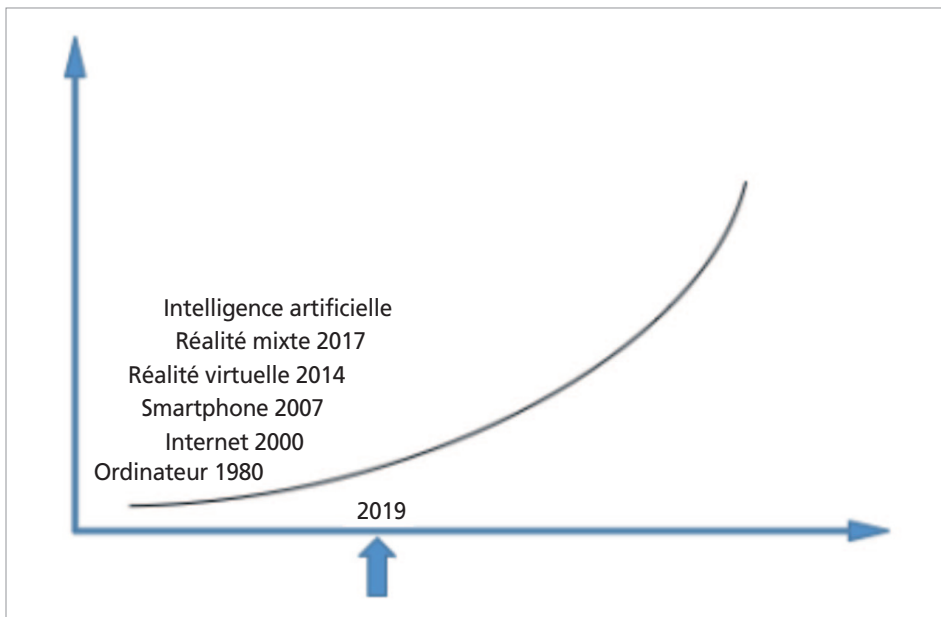


Figure 1. Prise chronologique (années en abscisse) de la révolution du numérique (ordonnée) avec les facteurs accélérateurs.

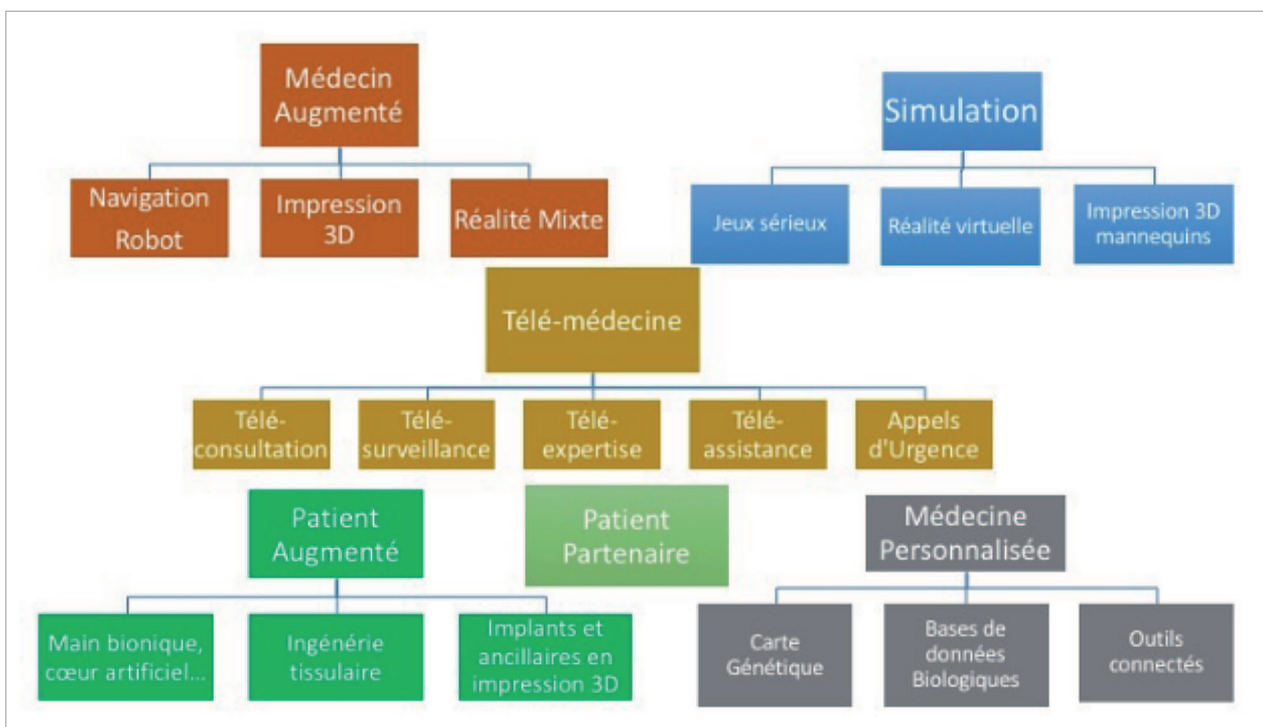


Figure 2. Révolution du numérique en médecine ; Classification de Gregory et Bennani.

l'émergence de systèmes chirurgicaux innovants intégrant de nouveaux capteurs et exploitant donc pleinement les capacités offertes par l'IA.

Cet article a pour objectif de définir l'intelligence artificielle et ses possibles applications futures en chirurgie orthopédique et traumatologique.

### Le chirurgien augmenté

L'assistance informatique chirurgicale porte en elle la promesse d'une chirurgie standardisée où le chirurgien, assisté par la machine, deviendrait plus précis. Grâce à la chirurgie assistée par ordinateur, l'ère du « chirurgien artiste », où les résultats de la chirurgie sont principalement liés à la dextérité du chirurgien, laisserait place à l'ère du « chirurgien numérique » autrement appelé « chirurgien augmenté » pour lequel l'erreur « humaine » serait évitée par l'assistance de la machine. Une publication du *British Medical Journal*, particulièrement alarmiste, soulignait que l'erreur médicale était la troisième cause de mortalité aux Etats-Unis. L'enjeu paraît donc gigantesque. En chirurgie orthopédique, il s'agit de la navigation, du robot, de l'impression 3D et actuellement de l'émergence de la réalité mixte. L'intérêt perçu par les patients est de plus en plus déterminant, la chirurgie assistée par ordinateur, et notamment la robotique, constituent actuellement un enjeu commercial majeur pour les industriels du dispositif médical implantable.

L'adjonction de l'intelligence artificielle à ces systèmes va donc être crucial dans leurs prochaines étapes de développement en permettant, d'une part, l'émergence de nou-

veaux concepts, comme la réalité mixte, et, d'autre part, l'étude de données de masses liées à une chirurgie, un chirurgien et un patient pour aboutir à une stratégie chirurgicale personnalisée, et à un geste précis grâce à un guidage adapté étape après étape.

La réalité mixte est un exemple de dispositif exploitant pleinement l'IA. Ces dispositifs, (comme par exemple le casque HoloLens® développé par Microsoft) utilisent un grand nombre de capteurs qui, grâce à des algorithmes d'intelligence artificielle, permettent à un utilisateur d'interagir naturellement avec son environnement, notamment via la commande vocale ou en effectuant de simples gestes (Figure 3).

Des caméras permettent la capture de données chirurgicales qui, sur de multiples interventions réalisées par de multiples chirurgiens, généreront des données considérables. Par l'analyse de ces données chirurgicales massives, l'intelligence artificielle pourrait ouvrir des perspectives considérables en définissant, notamment, de nouvelles pratiques chirurgicales. Par exemple, prévenir par l'analyse de l'étape chirurgicale en cours le chirurgien de la présence à proximité d'une structure nerveuse à respecter ; ou encore avertir, de manière automatique, un chef de service de toute difficulté rencontrée par un chirurgien junior dans une salle opératoire de son service, bien avant que le chirurgien junior n'ait pris la décision d'appeler un senior pour l'aider.

Ces dispositifs peuvent également être dotés d'un système d'« eye-tracking » qui, comme son nom l'indique, suit les mouvements des

yeux du chirurgien, ou un laser permettant, grâce à une lumière structurée, d'acquérir des images de profondeur pour reconstruire un « maillage » (*mesh* en anglais) afin de modéliser l'environnement, notamment les mains du chirurgien, par l'extraction automatique de points de références situés sur le poignet et la main (Figure 4).

Ces dispositifs portent en eux la possibilité de monitorer les gestes et indirectement les émotions du chirurgien (par le suivi des yeux) pour le guider durant l'intervention vers le geste chirurgical idéal, spécifique à l'intervention mais également au patient, travaux débutés par l'équipe projet MOVEO de LaMSN (La Maison des Sciences Numériques). Des travaux de recherche sont également en cours, notamment au sein du projet « *FollowKnee* » porté par l'équipe brestoise du Pr Stindel, afin de pouvoir, par le biais de ces capteurs et en exploitant l'IA, reconnaître et localiser, sans marqueurs de navigation additionnels, des instruments chirurgicaux (Figure 5). Cette dernière technologie pourrait permettre d'aller progressivement vers une nouvelle génération de navigation.

Il est aujourd'hui difficile d'imaginer tout ce que ces capteurs et ces algorithmes d'IA peuvent apporter dans notre pratique. Et il est probable que nous ne sachions d'ailleurs pas encore les possibilités offertes, mais tous ceux qui travaillent autour de l'IA et des données de masse savent que la promesse est immense. La transmission plus rapide des données grâce à la 5G sera également un accélérateur de cet aspect de massification de données chirurgicales.

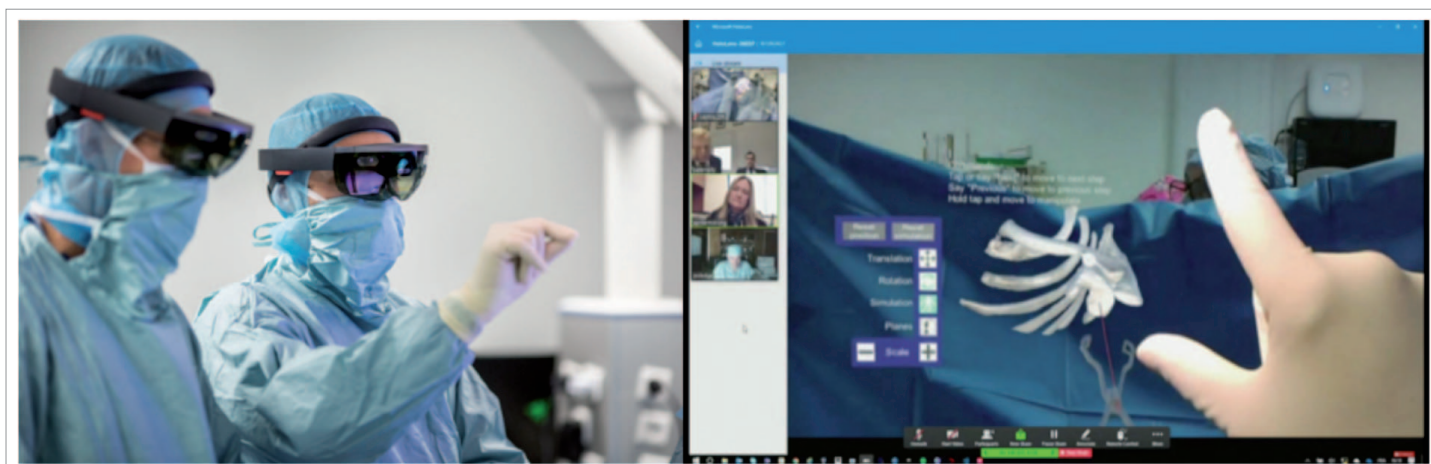


Figure 3. Utilisation du casque de réalité mixte HoloLens® de Microsoft®. Photo de Raphaël de Bengy, exclusivité Hans Lucas. Le chirurgien interagit avec les lunettes-ordinateur en réalisant des gestes devant ces lunettes. Vision per-opératoire du chirurgien à travers les HoloLens1.

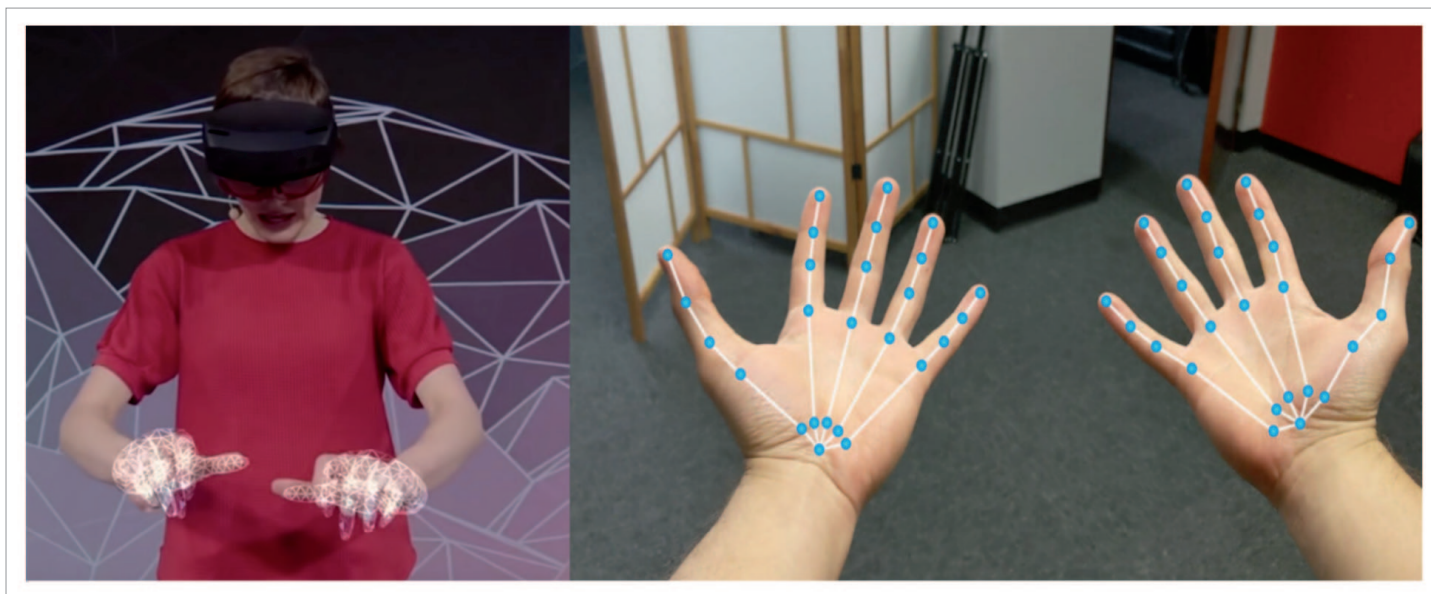


Figure 4. Points de références modélisés en temps réel par les HoloLens2 (Microsoft).



Figure 5. Image d'un instrument positionné sur un fémur (à gauche), résultat par Réalité Augmentée de la détection et localisation sans marqueurs de cet instrument en bleu (milieu), et affichage de plans de coupes ou axes (à droite).

### Le patient augmenté

Le patient augmenté pourrait se définir comme étant un patient ayant des fonctions (motrices ou autres) optimisées, ou dont les insuffisances sont palliées (voire dépassées) par la médecine et les technologies.

Le patient augmenté c'est donc le patient qui se trouve augmenté dans ses capacités grâce aux technologies. Plus simplement, un patient avec une coxarthrose invalidante pour qui la marche est impossible, retrouve quasiment un périmètre de marche illimité après une arthroplastie totale de hanche. Il s'agit là de la révolution de l'après-guerre liée à l'ingénierie, essentiellement mécanique, et la France a été motrice dans cette révolution. Mais le numérique ouvre d'autres pers-

pectives, avec l'avènement des nanobio-technologies, et des capteurs capables de transformer un signal biologique en un signal numérique. Ils peuvent se présenter sous une forme extracorporelle et non invasive, comme par exemple intégrés à des vêtements ou des pansements, ou des prothèses de membre ; ou bien sous une forme intracorporelle, par le biais de microélectrodes pouvant être directement intégrées dans des prothèses articulaires. Les signaux collectés peuvent ensuite être analysés par un médecin, partagés sur un réseau ou enregistrés sur des serveurs distants. Le stockage et le traitement de ces données à grande échelle, ou Big Data, ouvre de nouvelles perspectives de suivi de patients et d'évaluation de thérapies.

### Exemple de la prothèse articulaire connectée

Ces nouvelles technologies ouvrent des perspectives énormes également pour l'industrie prothétique. Certains laboratoires de recherche travaillent sur l'élaboration d'une nouvelle génération d'implants connectés. Par l'intégration de capteurs mécaniques et électrochimiques, ces implants pourraient donner plusieurs informations liées, par exemple, à l'état de la prothèse comme son taux d'usure, son intégration osseuse, ou les contraintes mécaniques auxquelles elle est soumise, et pourraient même détecter de manière précoce toutes complications postopératoires telles qu'une infection ou encore un descellement.

Mais pour arriver à un tel implant, plusieurs défis technologiques et scientifiques doivent être résolus, tels que l'alimentation des composants électroniques, la récupération de manière sécurisée des données issues des capteurs, ou encore l'intégration mécanique de l'ensemble de ces composants électroniques dans un espace aussi réduit qu'une prothèse. Le projet FollowKnee porté par l'équipe du Pr Stindel à Brest est actuellement en train de concevoir une telle prothèse pour le genou : personnalisée, qui s'adapte parfaitement à la morphologie du patient grâce à l'impression 3D et connectée grâce à l'intégration de plusieurs capteurs analysant des paramètres biomécaniques et physiologiques. Tout cela permettrait aux médecins de réaliser un suivi extrêmement précis et personnalisé du patient pour une optimisation de sa prise en charge à tous les niveaux, mais permettrait également aux chercheurs de mieux comprendre certains phénomènes physiologiques et biomécaniques résultant de la pose d'une prothèse (Figure 6).

**Exemple de la prothèse bionique de main**

D'autre part, des prothèses myoélectriques ont été développées pour suppléer à la fonction d'un membre amputé (origine traumatique ou congénitale).

En 2018, l'équipe du Dr Edward de Keating Hart et le Dr Jérôme Pierrart posent la première neuroprothèse (ou prothèse bionique) de bras en France chez une patiente de 37 ans amputée en transhuméral. Cette neuroprothèse repose sur les technologies des prothèses myoélectriques et TMR (*Targeted Muscle Reinnervation*) qui consistent en une réinnervation musculaire ciblée après neurotisation. Ce concept a été développé aux Etats-Unis dans les années 2004-2006 par les Drs Dumanian et Kuiken, compte tenu du nombre important de patients amputés proximale au poignet (> 40 000 en 2017). La base physiologique de la TMR repose sur des études animales qui démontrent que le cerveau continue à envoyer un signal sur les nerfs sectionnés pendant une longue période et que ces nerfs peuvent réinnervé un muscle différent du muscle natif.

Des transferts nerveux sont réalisés, au préalable, pour neurotiser des nerfs fonctionnels sur des unités musculaires spécifiques et fonctionnelles. Après cicatrisation nerveuse, une longue phase de réadaptation est nécessaire pour que le cerveau intègre les nouvelles commandes. La prothèse est ensuite mise en place.

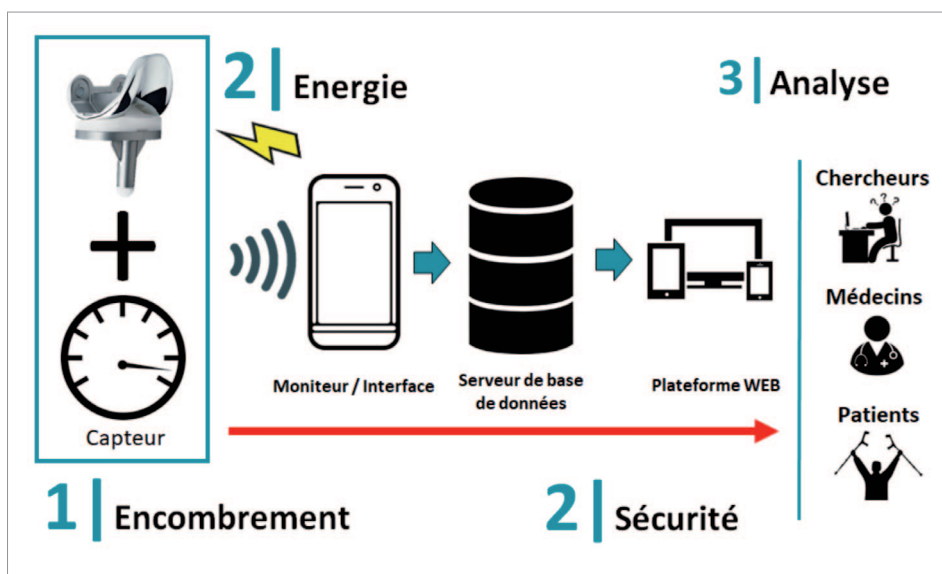


Figure 6. Prothèse connectée et défis scientifiques associés (encombrement, sécurité, énergie, traitement et analyse des données) FollowKnee®.

Le signal EMG est enregistré à la surface de la peau par des électrodes sur les unités neuromusculaires neurotisées qui agissent comme des « amplificateurs biologiques » de signal. Le patient peut contrôler l'intensité et la durée de la contraction musculaire de chaque unité. La neuroprothèse détecte des seuils et des amplitudes électriques (contrôle proportionnel) et permet d'exécuter des mouvements définis en contrôlant la vitesse. Après appareillage et réadaptation, les patients porteurs contrôlent leur prothèse par le cerveau et deviennent autonomes dans les activités de la vie quotidienne.

Actuellement, la prothèse myoélectrique repose principalement sur un signal EMG et la réalisation de mouvements complexes et combinés est difficile. Grâce à l'intelligence artificielle, des algorithmes de reconnaissance de mouvement sont en développement pour anticiper le mouvement désiré et le générer de manière fluide. Cette technologie enregistre les schémas d'activation musculaire et pourrait permettre un contrôle plus intuitif de la prothèse. Le signal EMG décelé actuellement par les capteurs est en effet un signal discontinu, surtout lors de mouvements complexes et combinés. Les algorithmes d'IA pourront donc prédire les parties manquantes du signal pour le transformer en un signal continu, améliorant ainsi la fluidité du mouvement et, peut-être, rendre même, à terme, la prothèse bionique plus performante que la main humaine native.

**Intelligence artificielle, big data et médecine personnalisée**

Après avoir fait ses preuves dans bien d'autres domaines, l'intelligence artificielle pourrait clairement être exploitée dans de nombreuses applications pour la santé. Pouvant revêtir plusieurs formes, l'IA pourrait intéresser tous les acteurs du domaine médical, et particulièrement en chirurgie orthopédique : praticiens, patients, personnel infirmier, laboratoires et concepteurs d'implants, kinésithérapeutes, orthésistes. L'idée est d'aboutir, à terme, à un chirurgien « augmenté », qui soigne un patient « augmenté » et « connecté », en utilisant des données propres à chaque patient, dans le but de proposer une médecine personnalisée. Le recueil de ces données sera possible par le biais de l'informatisation des examens cliniques, mais également par l'utilisation potentielle des données issues de la vie courante et disponibles via des objets connectés dont l'utilisation et la popularisation sont en pleine explosion.

La finalité serait d'adapter les soins de manière globale à chaque patient, en fonction de ses besoins fonctionnels, de ses possibilités physiques, des contraintes mécaniques auxquelles il est soumis, des éventuels mouvements répétitifs qu'il réalise, etc. La personnalisation de ces soins pourra concerner différentes étapes de la prise en charge du patient ; de l'indication opératoire au type d'implant prothétique, en passant par la rééducation, le suivi post-opératoire, les traitements symptomatiques, et bien d'autres

possibilités dont l'horizon sera d'autant plus vaste dès lors que les avancées technologiques entreront en application.

**IA et démarche diagnostique**

L'avènement de l'IA permet ainsi d'envisager l'exploitation de l'ensemble des paramètres du patient avec des algorithmes décisionnels afin de personnaliser au mieux les soins du patient.

Ces algorithmes décisionnels peuvent être une aide à chaque étape de la prise en charge du patient en chirurgie orthopédique, du diagnostic au traitement, en passant par la gestion péri-opératoire.

Concernant la démarche diagnostique, l'analyse des radiographies osseuses par l'IA s'est déjà avérée au moins aussi performante que celle réalisée par un chirurgien orthopédiste sénior. L'IA a également démontré un rôle dans la décision pré-opératoire. Elle permet le développement de classifications, basées sur l'analyse de nombreux paramètres, personnalisant et optimisant la prise en charge chirurgicale du patient.

Une des facettes souvent peu évoquées de l'intérêt de l'IA en chirurgie orthopédique est son intérêt dans le management péri-chirurgical et notamment la prédiction du séjour hospitalier. En effet, des algorithmes sont désormais capables de prédire la durée ainsi que le coût de l'hospitalisation en se basant sur différents paramètres pré-opératoires recueillis auprès des patients.

D'un point de vue plus strictement clinique, l'IA commence déjà à porter ses fruits. L'utilisation de la « Kinect » (Microsoft) permet une analyse plus précise et reproductible d'un examen par un praticien, des mobilités articulaires, notamment de l'épaule, dans tous ses secteurs, de manière bilatérale. Le développement d'algorithmes associés à cette analyse pourra, par exemple, permettre la prédiction du gain d'amplitude avec une prothèse anatomique ou inversée, ou encore donner le feu vert après rééducation d'assouplissement en vue d'une réparation de la coiffe des rotateurs (Figure 7).

**S'aider des données du quotidien**

• **Analyse de la fonction**

Les objets connectés font aujourd'hui partie du quotidien d'une majorité de la population. Une partie de ces objets existants ont déjà pour objectif l'amélioration de la santé de leurs utilisateurs.

L'emploi de ces objets est largement déployé dans le domaine cardiovasculaire (fréquence cardiaque, détection de fibrillation auriculaire, d'arrêt cardiaque, etc.) et également dans le suivi des personnes âgées à domicile (détection de mouvements, de chute, etc.). Ces objets restent encore peu développés pour le domaine de l'orthopédie, mais gardent un énorme potentiel. En effet, aujourd'hui, les capteurs inertiels (*Magnetic and Inertial Measurement Units*) sont utilisés pour détecter des accélérations ou des amplitudes de mouvements. Ils sont placés sur les membres du

patient et peuvent jouer le rôle d'un goniomètre virtuel. En améliorant la précision et la reproductibilité de ces capteurs virtuels, il serait envisageable d'étudier les mouvements articulaires réalisés par les patients dans leur vie quotidienne. Des capteurs inertiels seraient placés dans des objets de la vie quotidienne (montre, T-shirt, etc.) et calculeraient les mouvements répétés effectués par le patient.

La généralisation des objets connectés pourrait permettre de consolider l'analyse clinique de la consultation, où l'examen physique est parfois biaisé par plusieurs éléments (jour particulièrement douloureux ou au contraire peu symptomatique, appréhension, mauvaise compliance du patient voire simulation, etc.).

L'utilisation des données du quotidien pourrait aider le chirurgien à établir un niveau de fonctionnalité de l'articulation ou du membre concerné et, par conséquent, adapter sa prise en charge et personnaliser la solution proposée au patient. Cette personnalisation des soins se ferait alors en fonction de l'impotence mesurée mais également des besoins fonctionnels établis.

Cet usage de données devra bien entendu toujours se faire sous réserve d'un accord individuel pour chaque patient et avec un encadrement strict sur la gestion et la protection des données personnelles.

• **Suivi post-opératoire personnalisé**

Le suivi post-opératoire pourra également passer par ces mêmes analyses et procédés, pour une meilleure appréciation du résultat de l'intervention (à court, moyen et long terme), et du respect des consignes (immobilisation, décharge, rééducation, etc.).

C'est, par exemple, dans la phase post-opératoire immédiate que l'utilisation de l'IA, plus précisément l'apprentissage profond ou *deep learning*, pour la prédictibilité de la transfusion post-arthroplastie a donné des résultats très encourageants.

Les objets connectés ont aussi une place importante dans la rééducation. On peut envisager que la rééducation soit menée en concordance entre le thérapeute et le patient guidé par une aide technologique connectée (smartphone, montre). Cela pourrait notamment s'imposer pour les patients n'ayant pas les moyens d'aller en centre. L'utilisation de capteurs inertiels permettrait par exemple au patient de contrôler le bon positionnement de ses membres pendant les exercices.

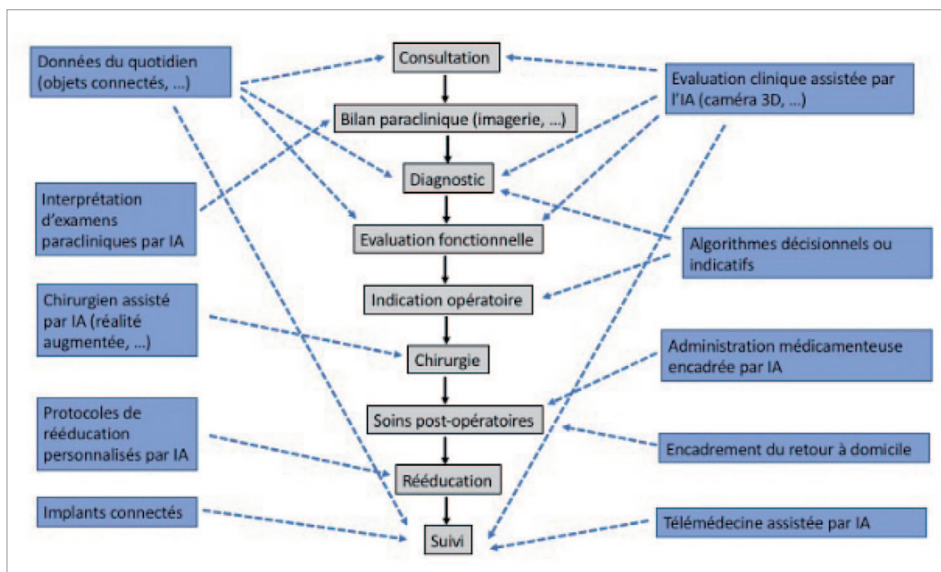


Figure 7. Diagramme illustrant le potentiel des algorithmes d'IA à chaque étape de la prise en charge du patient en chirurgie orthopédique : parcours classique d'un patient en gris, impact potentiel de l'IA à chacune de ces étapes en bleu.

## • Traitement des symptômes

Enfin, l'IA pourra également jouer un rôle dans le traitement symptomatique. Les nouvelles technologies représentent aussi une plus-value dans le suivi de la douleur en post-opératoire. Nous pourrions envisager que le patient, à son domicile, répertorie systématiquement les antalgiques qu'il prend, et qu'il cote sa douleur afin que l'application mobile lui conseille quel antalgique prendre, selon ce qu'il aura déjà pris. Une telle technologie permettrait au patient dont la douleur est le seul motif d'hospitalisation, un retour à domicile plus rapide, avec une meilleure autonomisation de ses soins.

Il existe déjà, par ailleurs, des distributeurs portables informatisés de médicaments antalgiques. Ces distributeurs sont réglés à l'aide d'un algorithme qui permet l'administration sans risque pour le patient. À l'aide

d'un rétro-contrôle, ces algorithmes peuvent être modifiés pour s'adapter à la demande du patient, tout en restant dans un usage sécuritaire.

## Télémédecine et chirurgie orthopédique et traumatologique

Il s'agit d'une pratique médicale qui met en rapport, par l'intermédiaire des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) :

- le patient et un ou des professionnels de santé parmi lesquels au moins un professionnel médical ;
- plusieurs professionnels de santé, parmi lesquels au moins un professionnel médical.

Cinq actes de télémédecine sont définis dans le décret n°2010-1229 du 19 octobre 2010 ainsi que leurs conditions de mise en œuvre (Figure 8).

Tous ces outils ont une application en chirurgie orthopédique et traumatologique. L'IA est particulièrement importante dans le domaine de la télésurveillance. Avec l'avènement des PROs (*Patient Reported Outcomes*) aussi appelés PROMs (*Patient Reported Outcome Measures*) qui consistent pour le patient à renseigner lui-même son suivi médical par l'intermédiaire d'auto-questionnaires, le suivi des patients par des applications dédiées sur smartphone est probablement la perspective de développement de la télémédecine la plus importante en chirurgie orthopédique. On parlera alors d'ePROs ou ePROMs. Il faut saluer ici l'initiative du Collège des Jeunes Orthopédistes sous l'impulsion du Pr N. Reina puis des Dr J. Cognault et P.E. Chammas, pour élaborer une application permettant de renseigner le suivi de patients en chirurgie orthopédique et traumatologique, de donner accès aux chirurgiens

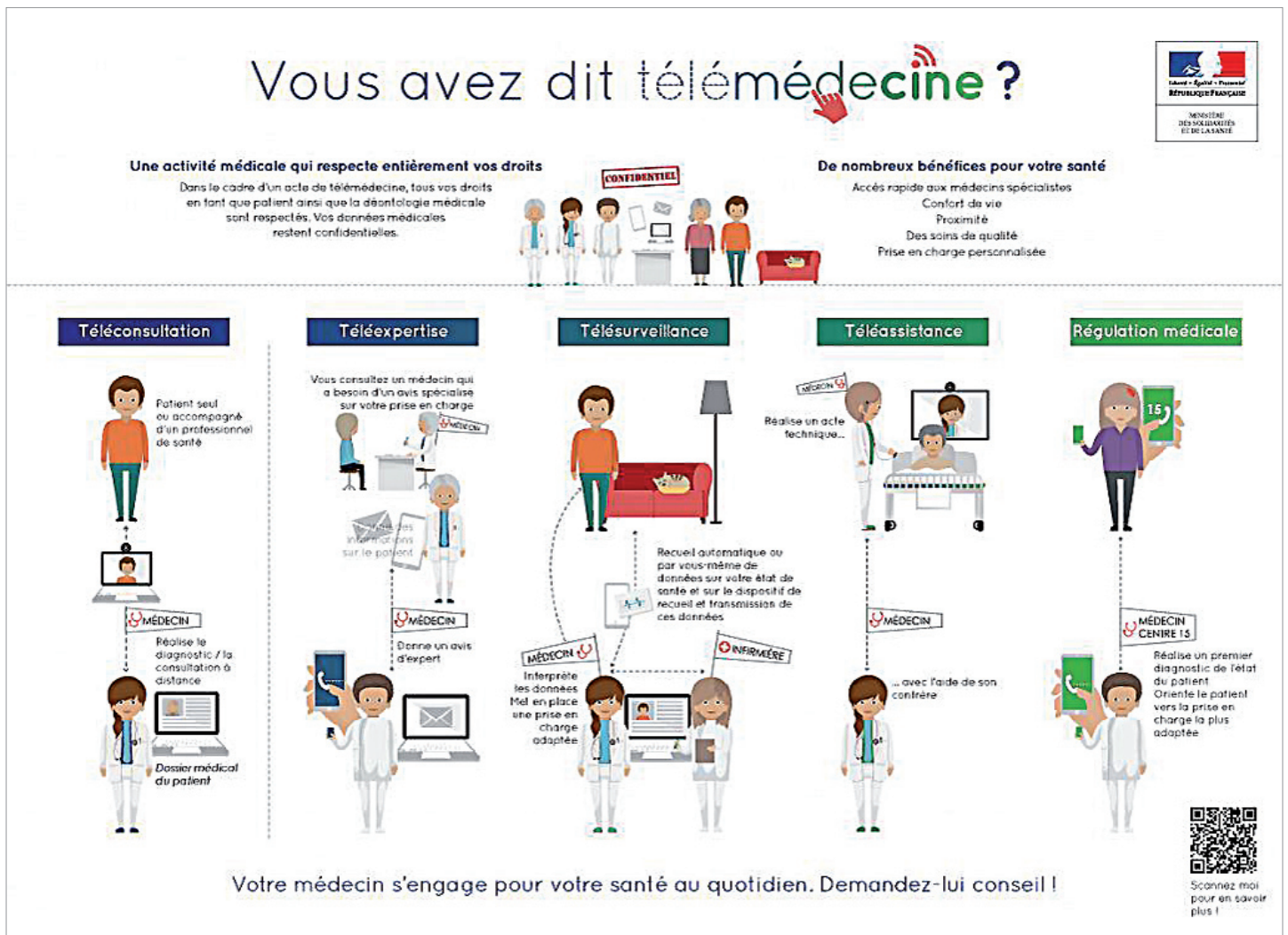


Figure 8. Les 5 actes de télémédecine (<https://solidarites-sante.gouv.fr/soins-et-maladies/prises-en-charge-specialisees/telemedecine/article/la-telemedecine>)

à 64 classifications, et de permettre l'échange de données médicales et de données patients. L'application n'est pas encore fonctionnelle mais son potentiel est gigantesque (Figure 9) (<https://www.cjortho.fr/index.php?static14/app>).

Le suivi des patients par des ePROs sera complété secondairement par des mesures objectives de la fonction (mobilité, vitesse, boiterie, etc.) données par les objets connectés du patient.

## Conclusion

Le virage numérique, défi du XXI<sup>e</sup> siècle, se traduira en chirurgie orthopédique par une accélération du concept de patient partenaire. La conception de la médecine occidentale, héritage de la médecine grecque antique, dans laquelle le médecin est le seul détenteur du savoir, s'est peu à peu transformée, depuis le partage d'informations permis par l'avènement d'Internet, en une médecine dite « MP4 » : personnalisée, préventive, participative et prédictive. Ainsi, le patient partenaire signifie que le patient est au cœur de sa prise en charge en comprenant mieux sa maladie, les alternatives thérapeutiques,

le traitement choisi. Le patient prend donc pleinement part à la gestion de sa maladie, et devient acteur en modifiant son habitus, en mettant à jour régulièrement ses données et en les partageant selon les besoins aux différents soignants associés à son parcours de soin. Cela a tout à fait sa place en chirurgie orthopédique, dont le primum movens est l'aspect fonctionnel. Le patient établit ses besoins fonctionnels et le chirurgien essaie de les améliorer. Il a accès en permanence à l'ensemble de son dossier médical de façon dématérialisée.

Aujourd'hui et plus encore demain, le chirurgien aura à sa disposition de nombreuses données, hétérogènes, multimodales (images ou issues des capteurs), non-synchronisées mais associées au patient et qui, traitées, permettront d'optimiser (1) le diagnostic et le suivi via l'élaboration d'algorithmes innovants de décision exploitant pleinement l'intelligence artificielle, et (2) le geste chirurgical via le développement de nouveaux systèmes de navigation et robotique.

**Thomas GREGORY,  
Guillaume DARDENNE**

## Pour en savoir plus

<https://www.maitrise-orthopedique.com/articles/quest-ce-que-lintelligence-artificielle-et-quel-sera-son-impact-en-sante-et-pourquoi-avoir-cree-linstitut-moveo-au-sein-de-la-maison-des-sciences-numeriques-de-luniversite-paris-13-1268>

<https://www.maitrise-orthopedique.com/articles/la-realite-mixte-lintelligence-artificielle-et-le-chirurgien-augmente-1270>

<https://www.maitrise-orthopedique.com/articles/lintelligence-artificielle-big-data-et-medecine-personnalisee-1276>

<https://www.maitrise-orthopedique.com/articles/telemedecine-medecine-connectee-et-chirurgie-orthopedique-et-traumatologique-etat-des-lieux-en-2019-et-perspectives-1258>

<https://www.maitrise-orthopedique.com/articles/patient-partenaire-et-patient-augmente-1260>

<https://www.maitrise-orthopedique.com/articles/la-simulation-en-chirurgie-orthopedique-a-lheure-du-numerique-1264>

<https://followknee.com/>

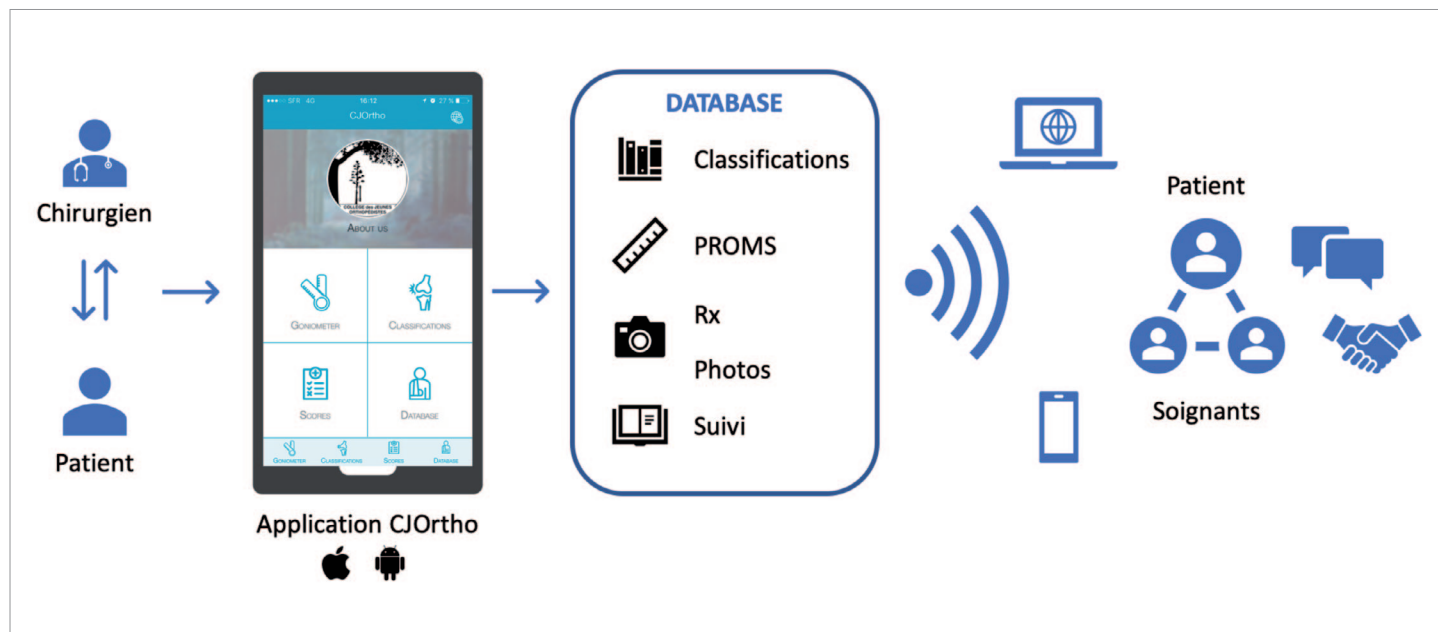


Figure 9. L'application smartphone CJOrtho via sa fonctionnalité de database permet un suivi complet du patient. Le partage des données recueillies avec celui-ci et l'ensemble des soignants illustre le potentiel synergique de la télémédecine dans le parcours de soin.

Rédacteur en chef : Philippe Merloz - Directeur de publication : Alexandre Poignard

Correspondance : SOFCOT - 56 rue Boissonade - 75014 PARIS - France

Tél. : 01 43 22 47 54 - Fax : 01 43 22 46 70 - e-mail : [sofcot@sofcot.fr](mailto:sofcot@sofcot.fr) - [www.sofcot.fr](http://www.sofcot.fr)



# La dissection en anatomie : traditionnelle ou tout numérique ? Un défi !

Par **François BONNEL**, Professeur Emérite d'anatomie, faculté de médecine Montpellier, Membre du Collège Français des Chirurgiens Orthopédistes et Traumatologues. Service Orthopédie, Clinique Beau Soleil, 119 avenue de Lodève, 34070 Montpellier  
Email : profbonnel@free.fr

**D**epuis son origine, l'homme a été subjugué par la volonté de connaître la constitution du corps humain. Depuis l'antiquité, les augures avaient pour pratique de disséquer les animaux et lire l'avenir au travers de leurs organes. Cette volonté de connaissance a eu pour objectif au travers de la dissection du corps humain d'essayer d'approcher l'essentiel de la pensée. Dans le même temps, cette pratique anatomique s'est complétée par la volonté de traitement faisant apparaître une spécialisation vers la chirurgie. Il est donc naturel de considérer que l'anatomie et la chirurgie à ses débuts ont été les moteurs essentiels de

l'enseignement et de la connaissance du corps humain dans un but thérapeutique.

Pendant des millénaires, la dissection était interdite : « *le corps humain est intouchable et sacré si l'homme à sa mort veut ressusciter ou gagner le monde qui lui est promis, il doit conserver une enveloppe charnelle intacte* ». Le médecin fut donc dans l'obligation, pour transgresser cet interdit, de se réfugier dans la dissection animale source de descriptions et opinions erronées. Disséquer fut aussi, par la suite, très règlementé par l'église pour éviter certains abus comme la « décarnisation » mise en œuvre pour rapa-

trier le squelette des chevaliers morts aux croisades et qui tendait à se généraliser (Bulle de Boniface VIII en 1299) ou pour éviter que les clercs se détournent trop des ordres pour pratiquer une médecine invasive (Concile de Latran, 1138). L'évocation historique du passé prestigieux de Montpellier dans la dissection en anatomie permettra de se questionner sur son avenir face aux techniques numériques.

## La traditionnelle dissection anatomique

En 1315, Henri de Mondeville (1260-1320) fit à Montpellier la première dissection en France non autorisée (Figure 1). Et en 1340, Guy de Chauliac déclarait « *c'est une gageure de vouloir soigner le corps, si on ne connaît pas la structure des organes, leurs rapports, et leur topographie* ». En 1363, il persistait avec « *tout artisan est tenu de cognoistre le sujet sur lequel il travaille, autrement il erre en ouvrant et tels sont les mauvais cuisiniers ni ne tranchent selon les jointures, mais hérissent cassent et déchirent* ». Les problèmes rencontrés à cette époque sur les difficultés d'obtention des cadavres amenèrent le Duc d'Anjou, gouverneur du Languedoc, le 10 octobre 1376 « *à obliger les officiers de justice de fournir chaque année le cadavre d'un supplicé à l'Université de médecine, conformément à l'article des statuts de 1340* ». Le 11 juin 1377, Charles Le Mauvais, Roi de Navarre, donnait à l'école de médecine le privilège d'obtenir annuellement le cadavre d'un supplicé.

Les 22 octobre 1401, l'école de médecine prononçait des réquisitions pour avoir le corps d'un pendu. Les dissections étaient désormais de rigueur, tout au moins en hiver, car il fallait trouver un supplicé et aussi que ce soit en période de froid. Montpellier précéda dans ce domaine l'Université de Paris qui n'aura semblable privilège qu'en 1498.



Figure 1. Peinture représentant le déroulement de la première dissection anatomique par Henri de Mondeville (1315).

En 1526, en complément de l'enseignement théorique, il était procédé à des dissections publiques avec un certain rituel à raison d'une par an.

On confiait le soin et la démonstration à un des meilleurs maîtres de l'École, avec une rétribution d'un écu ; le surplus de la recette était affecté aux frais matériels de l'opération et de ses suites. Les frais pour l'assistance à une démonstration anatomique s'élevaient à 12 deniers pour les étudiants et 15 deniers pour les étrangers. Rondelet (1507-1566) faisait sur le cadavre des démonstrations publiques auxquelles assistaient les gens du monde. Son amour pour l'anatomie allait jusqu'à la passion. Il supplia son ami et collègue malade, le Professeur Fontanon, de se laisser disséquer après sa mort et, sur son cadavre, découvrit la substance mamelonnée du rein ; il étudia devant ses élèves le placenta commun de ses deux jumeaux décédés à la naissance et fit même une leçon publique sur le cadavre de son fils.

Le 18 janvier 1527, le bruit s'étant répandu vers la nuit que le prévôt des maréchaux allait procéder à une exécution capitale, que le procureur de l'Université tint vite conseil avec les étudiants et décida de réclamer le futur pendu pour en faire une anatomie à la manière de celle que possédaient les chirurgiens.

André Vésale (1514-1564), Professeur de Padoue, ancien étudiant à Montpellier, dans son ouvrage « *De Humani Corporis Fabrica Libri Septem* » basé sur l'observation humaine, lui donna ses lettres de noblesse en affirmant que l'anatomie de l'homme ne pouvait se construire qu'à partir de la dissection minutieuse de son corps et non de celui des animaux.

Grace à la dissection, Jean Pecquet (1622-1674), étudiant à Rouen puis à Montpellier en 1647, met en évidence les canaux lactés thoraciques (citernes). Il rapporte le témoignage de Gassendi au sujet d'un condamné à mort, pendu après un bon repas, dont les chylifères mésentériques étaient gonflés et laissaient écouler leur contenu laiteux après section.

Sous le consulat de Napoléon Bonaparte, dans la Loi du 14 frimaire an 5, par décret, ordonnait la création de trois facultés (Paris, Montpellier, Strasbourg). Ainsi, au 18<sup>e</sup> siècle dans toutes les écoles et facultés d'Europe, l'anatomie sera enseignée d'après la dissection

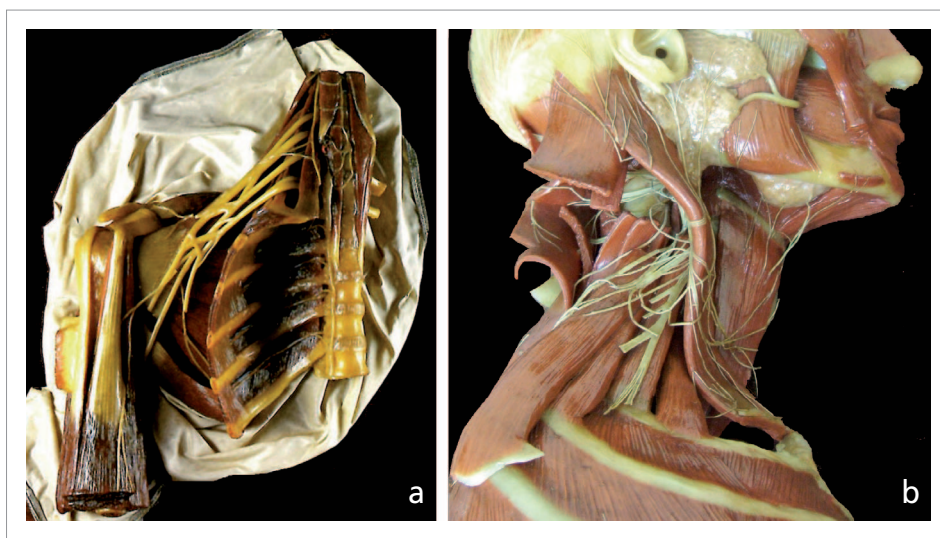


Figure 2. Pièces en cire de la Specola de Florence.

a : Vue de la région cervicale avec les branches nerveuses du plexus cervical.

b : Vue de la région cervicale avec les branches nerveuses du plexus cervical après avoir récliné le muscle sterno-cleido-mastoïdien (conservatoire d'anatomie, Montpellier).

et fera partie du programme obligatoire des études médicales et chirurgicales.

Certains médecins s'individualisaient tel Claude Jacques Mathieu Delpech (1777-1832), père de l'orthopédie de renommée mondiale, créateur de l'orthopédie moderne, qui mettait au point la ténotomie du tendon d'Achille, préconisait le premier la rééducation fonctionnelle dans les maladies osseuses « lois de la croissance » et fut le spécialiste des « pieds bots » et de l'orthomorphie pour la scoliose. Parallèlement, des initiatives personnelles vont immortaliser des situations anatomiques par de véritables chefs d'œuvres artistiques avec les cires de Fontana de Florence (Figure 2). D'autres réalisations techniques allaient faire état de réalisations matérielles pour l'enseignement de l'anatomie avec pour modèle la dissection anatomique (Figure 3 : Laumonier, Figure 4 : Auzoux, Figure 5 : Nicolas, Figure 6 : Tramond) préfigurant l'impression 3D.

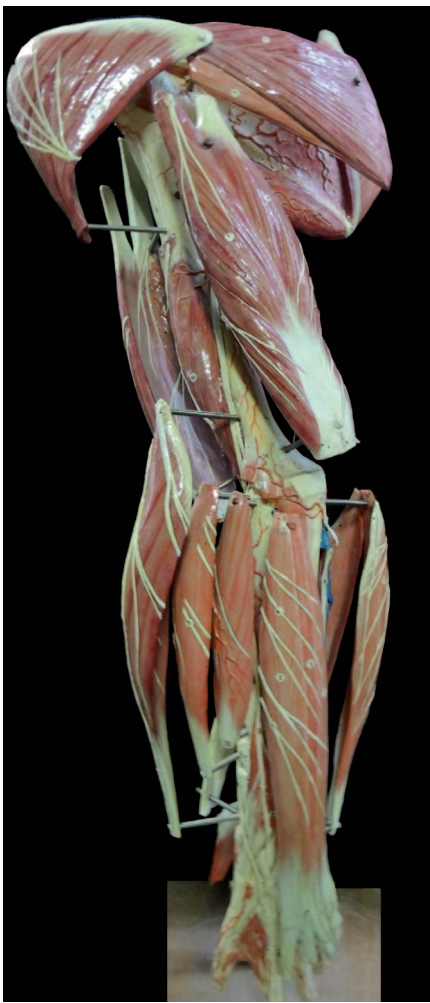
L'article 6 du décret, considérant l'importance de l'anatomie dans le déroulement des études médicales, créait un « Conservatoire » le 26 frimaire an III (26 décembre 1794). Le 4 brumaire an VII (1798), l'École de Montpellier adoptait à l'unanimité que « nul élève ne peut être admis aux examens définitifs qu'il n'ait présenté une pièce anatomique naturelle ou artificielle, pour être déposée au Conservatoire ».

En 1868, devant la grande difficulté à se procurer des cadavres, on fit faire appel aux



Figure 3. Pièce en cire de la vue antérieure de la cuisse par B. Delmas (sous la direction de Laumonier de Rouen) avec la mise en évidence des éléments vasculaires artères, veines, lymphatiques. (Conservatoire d'anatomie, Montpellier).

prisons de Montpellier, de Nîmes et d'Aniane, aux détenus du Fort Brescou et même aux bagnards de Toulon pour en obtenir.



Le 28 novembre 1811, la création de l'école pratique d'Anatomie et de Chirurgie permettait à dix étudiants en anatomie et dix en chirurgie de s'initier aux dissections et aux rudiments de chirurgie quatre heures par jour, de 10 heures à 14 heures, du mois de novembre au mois d'avril avec un stage de deux années !

Dans les comptes rendus des travaux de la faculté de médecine de Montpellier au 1<sup>er</sup> novembre 1874, le Professeur Boyer s'offusquait de certaine assertion concernant l'anatomie « On répète encore depuis 50 ans que l'anatomie est fort négligée parmi nous, qu'on ne peut l'apprendre faute de matière anatomique, de sujet de dissection. Ce reproche réfuté chaque année par des faits, des chiffres, par les succès de nos élèves devenus d'excellents anatomistes, des chirurgiens de premier ordre, est reproduit banalement par des hommes qui devraient être convaincus de leur erreur. La moyenne des sujets livrés à l'amphithéâtre est de 95 par an, ce n'est pas du luxe mais cela peut suffire quand on l'emploie bien et qu'on fait usage des moyens bien connus de conservation. Toute proportion gardée on n'a pas mieux à Paris. Nous cherchons d'ailleurs à augmenter nos ressources en intéressant à notre prospérité les administrations

qui pourraient venir à notre aide. Le goût de l'anatomie se répand ici de plus en plus. »

Cet investissement dans la formation en anatomie a permis à Montpellier de 1890 à

Figure 4. Pièce anatomique en papier mâché par Auzoux avec vue antérieure d'un bras (face antérieure), (Conservatoire d'anatomie, Montpellier).



Figure 6. Genou en cire, collection Tramond : notez la précision anatomique des artères et des nerfs. (Conservatoire d'anatomie, Montpellier).

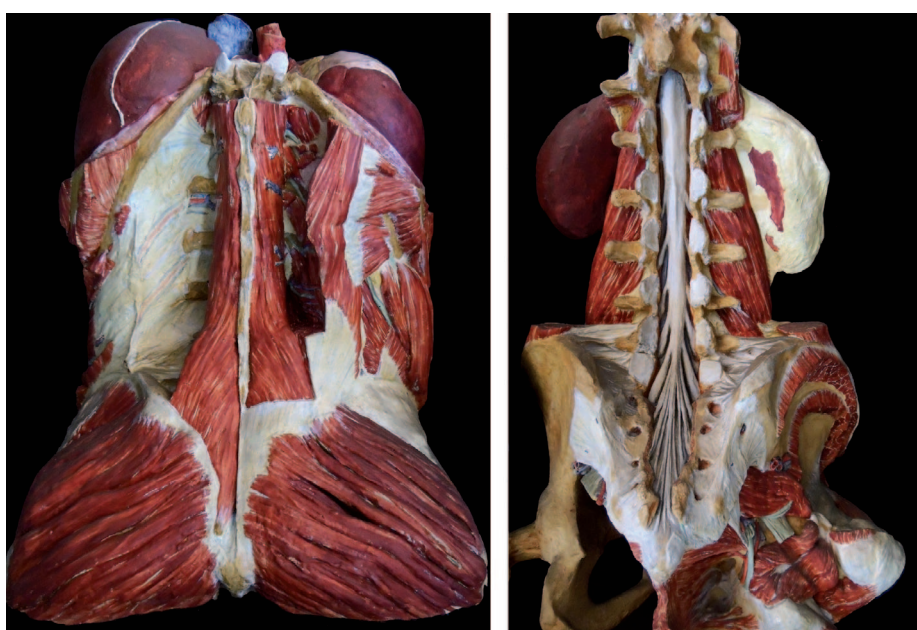


Figure 5. Pièces en plâtre de la collection Nicolas-Augier-Roux : plans successifs de dissections de la région thoraco-lombaire jusqu'à la moelle épinière (Conservatoire d'anatomie, Montpellier).

1930 de faire état d'un « âge d'or » qui se traduira par la promotion, la formation et l'accueil d'anatomistes de valeur avec : J. Cruveilhier (Limoges, Montpellier, Paris), V. Paulet (Paris, Lyon, Montpellier), P. Gilis (Montpellier), H. Rouvière (Montpellier, Paris), G.E. Jayle (Montpellier, Marseille), V. Chalot (Montpellier, Toulouse), F. Calas (Montpellier, Grenoble), A. Delmas (Montpellier, Paris). Cette période basée sur les dissections sera aussi pour tous les autres laboratoires anatomiques français très prolifique avec de très éminents anatomistes.

## L'émergence du numérique en anatomie

En octobre 2019, Bahar Gholipour, ([www.ScientificAmerican.com](http://www.ScientificAmerican.com)) dans un éditorial intitulé « *Disappearing Bodies : simulations will replace cadaver dissection in some medical schools* » remet en question l'intérêt de la dissection sur le cadavre. ScientificAmerican.com est un magazine de vulgarisation scientifique américain à parution mensuelle existant depuis le 28 août 1845, ce qui en fait la plus ancienne revue des États-Unis parue de façon continue. Il appartient au groupe Springer Nature.

En 2019, quelques universités américaines proposent aux étudiants l'apprentissage de l'anatomie sans cadavre. L'utilisation des nouvelles technologies est privilégiée avec les représentations anatomiques en 3D, l'anatomie virtuelle, avec reproduction des organes à partir d'examens par ultrasons ou de tomodensitométrie. Ils reprochent à la dissection la longueur de sa réalisation et la difficulté d'abord de certaines structures nécessitant la destruction de certains éléments. Selon la qualité de la préparation, les organes embaumés ont perdu la coloration du sujet vivant (James Young, enseignant à la Clinique Lener, Collège de médecine de Cleveland). Il fait état de sa situation d'étudiant en 1970 et observe une profonde déconnection entre l'enseignement de l'anatomie qui lui a été donné et son expérience clinique en cardiologie. À son avis, la réalité augmentée avec l'usage de logiciels spécifiques et un traitement d'image autorisent une dissection virtuelle de grande qualité.

Son opinion est relayée par le doyen Mark Schuster de l'école de Médecine de Passadena en Californie. Il en est de même pour Darren Hoffman professeur d'anatomie de l'université d'Iowa au collège Carver, avec l'exemple sur l'examen d'un patient avec une pathologie de la cheville. À ces considérations fonda-

mentales, le coût d'investissement pour un laboratoire d'anatomie spacieux paraît être un facteur dissuasif complémentaire. Au facteur émotionnel de l'étudiant vis-à-vis du cadavre, il préconise un contact précoce de l'étudiant en médecine avec un patient. Dans sa conclusion, Young prédit que la transition sera longue mais inéluctable avec l'abandon de la dissection sur cadavre.

## La dissection en anatomie : une opportunité pour le futur ?

Le professeur d'anatomie est institutionnellement le seul qualifié avec le médecin légiste pour décider et conduire dans des conditions éthiques irréprochables la dissection d'un sujet de laboratoire. Il conviendra à l'avenir de doter les structures universitaires des moyens numériques modernes avec des outils de visualisation intégrés permettant de tirer parti de l'imagerie médicale en coupe. Deux niveaux dans l'apprentissage de l'anatomie sont à distinguer.

Pour la formation du futur médecin, l'anatomie descriptive reste essentielle et les moyens de transmission sont laissés à la discrétion de l'enseignant qui doit faire preuve de pédagogie pour l'exercice médical futur. Qui n'a pas en mémoire la phrase de G. Paturet, professeur d'anatomie à Clermont-Ferrand en 1955, à J. Dubouset (Paris) étudiant « *Lorsqu'un enfant se présente au monde en vous tendant la main, ne lui serrez jamais la main car il vous tend la main pour vous réclamer une rente* », étirement du plexus brachial. Ou la phrase de Farabeuf à propos des mouvements de l'articulation subtalaire qui « *roule, tangue, vire* ».

Dans tous les cas, la salle de travaux pratiques avec le cadavre est pour l'étudiant un expérience émotionnelle indispensable qui fait de la dissection une approche fondamentale de l'anatomie (Figures 7 et 8).

Pour F. Duparc (Rouen), l'enseignement de l'anatomie est riche de son passé, la continuité avec le futur (immédiat) est réelle, seuls les supports de présentation évoluent, sans exclure les précédents avec la table de dissection virtuelle 3D avec la souris, à côté d'une cire et du tableau noir avec la craie. Rien ne remplace rien. Un autre élément important est la connexion, non comme une finalité mais pour un partage plus large, plus rapide, et disponible en permanence, de la connaissance. L'épreuve de dissection, sans pousser la technique à l'extrême, mérite un exercice utile pouvant faire naître des vocations.

Pour Ch. Fontaine (Lille), en théorie il y a encore une place pour la dissection, encore faut-il que l'on puisse disposer de corps dans l'avenir. Or, la mauvaise publicité récente faite aux dons du corps risque de porter un coup à la bonne volonté des donateurs. D'autre part, une partie des corps disponible va être détournée pour la simulation sur « cadavre pseudo-vivants » dans les facultés équipées du SimLife® [jeu vidéo de simulation publié par Maxis en 1992]. Il faudra garder la dissection conventionnelle pour les étudiants de 2<sup>e</sup>-3<sup>e</sup> année, là où cela se pratique encore, et pour les sujets de recherche où la dissection ne peut pas être valablement remplacée par les méthodes numériques. Une certaine fatalité est en train de s'instaurer mais nous fait prendre conscience des enjeux dans l'avenir.

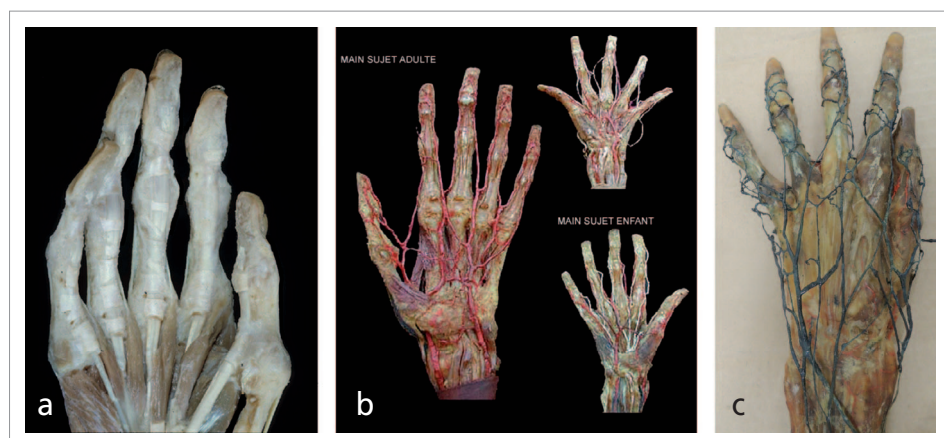
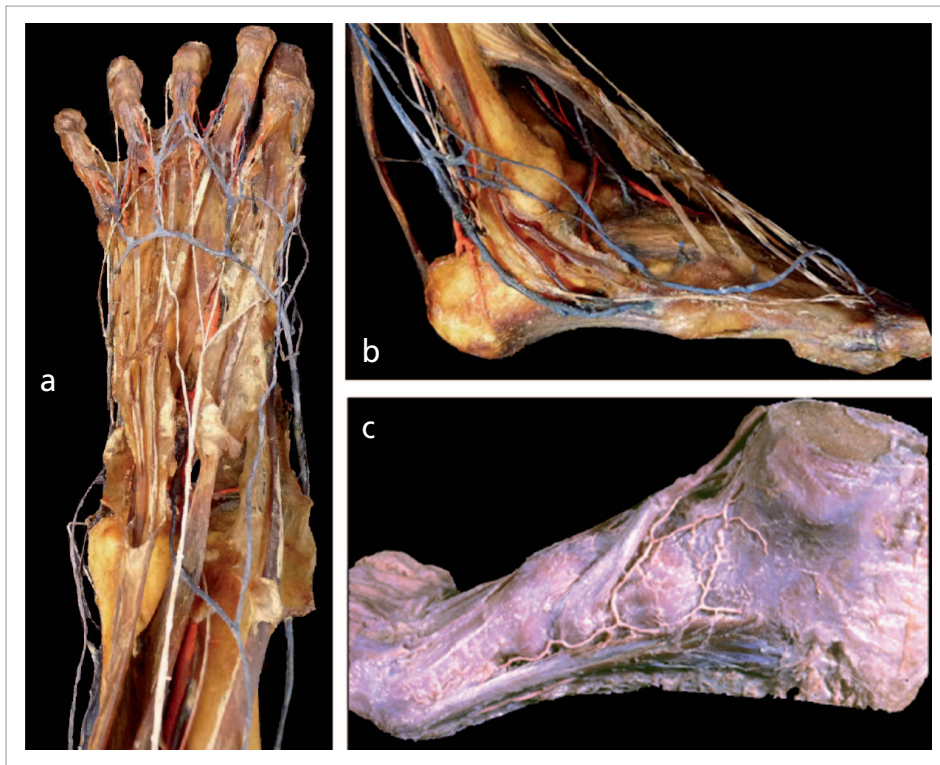


Figure 7. Dissections anatomiques de la main :  
 a : Mise en évidence des poulies digitales palmaires des tendons fléchisseurs.  
 b : Organisation vasculaire artérielle chez l'adulte et de l'enfant.  
 c : Vascularisation des veines de la face dorsale de la main et des doigts.



**Figure 8. Dissections anatomiques du pied :**  
*a : Vue dorsale du pied avec tous les éléments tendineux, artériels, veineux et nerveux.*  
*b : Vue latérale du pied avec tous les éléments tendineux, artériels, veineux et nerveux.*  
*c : Vue latérale du pied avec les éléments artériels après injection.*

La dissection, élément clé de l'apprentissage de l'anatomie, est moins pratiquée car les modalités des dons de corps sont rendues difficiles en termes de disponibilité et de coût. La photogrammétrie de dissections anatomiques est un moyen de pallier ce problème en permettant l'accès à de nombreuses dissections virtuelles pour les étudiants (V. Delmas, Paris). Il en est de même avec d'autres technologies comme le scanner 3D surfacique, qu'il soit à laser ou à lumière structurée, ou encore les caméras à détection de profondeur utilisant l'infrarouge. À Montpellier, un grand écran tactile cohabite avec les tables du laboratoire d'anatomie et présente un clone interactif hyperréaliste d'une dissection numérisée en surfacique que le moniteur peut manipuler en 3D, afficher plan par plan à l'aide d'un « slider » (G. Captier, G. Subsol - 2017). L'apprentissage de l'anatomie par un logiciel dédié que nous avons initié à Montpellier depuis 1988 (Myrian, Intrasure®) dans la formation de l'étudiant est une adaptation indispensable que ce dernier va rencontrer dans son accession aux stages hospitaliers (Figures 9 à 11).

Pour les praticiens chevronnés, l'intérêt de la dissection d'un sujet anatomique sous



**Figure 11. Images anatomiques d'un pied après examen tomographique.** Le traitement numérique par le logiciel d'analyse d'images (Myrian®, Intrasure SAS) permet de visualiser les différents constituants, de la superficie à la profondeur, avec les tendons, les muscles et les veines et, en toile de fond, le squelette du pied.

l'égide de l'anatomiste et du clinicien concerné doit devenir une obligation avec l'appoint des technologies numériques. La chirurgie de l'appareil locomoteur, des parties molles (nerfs, muscles, peau) est entièrement du



**Figure 9. Organisation en situation de l'enseignement de l'anatomie aux étudiants par méthode numérique.**



**Figure 10. Reconstruction numérique après tomographie du pelvis et de l'articulation coxo-fémorale avec ses rapports vasculaires.**

domaine de la salle de dissection. Pour les os et les articulations, la pratique chirurgicale est plus nuancée si l'on se réfère à la notion de « jamais la première fois » avec l'impression 3D (Fablab, LABSud, Montpellier) qui permet

la préparation d'une technique chirurgicale avec possibilité de gestes répétés sur des modèles pathologiques synthétiques représentatifs, tirés de la vraie vie (Figures 12 à 15). Le développement d'une telle technique représente un équipement d'urgence maté-

rielle à octroyer aux laboratoires d'anatomie. Nous devons nous rapprocher des ingénieurs pour profiter de leur savoir-faire et reproduire par l'impression 3D toutes les structures anatomiques (Figures 16 et 17).



Figure 12. Maquette 3D (Fablab Montpellier) d'une scoliose historique cervico-thoraco-lombaire (Conservatoire d'anatomie, préparation par Delpéch).

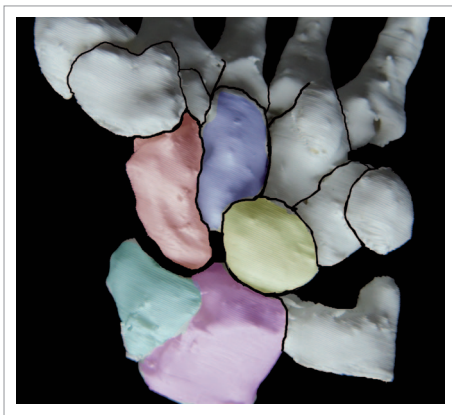


Figure 13. Cas clinique (Dr O. Marres, Nîmes) avec disjonction scapho-lunarienne et fracture de la styloïde radiale ; réalisation pré-opératoire d'une maquette en impression 3D (Fablab Montpellier).

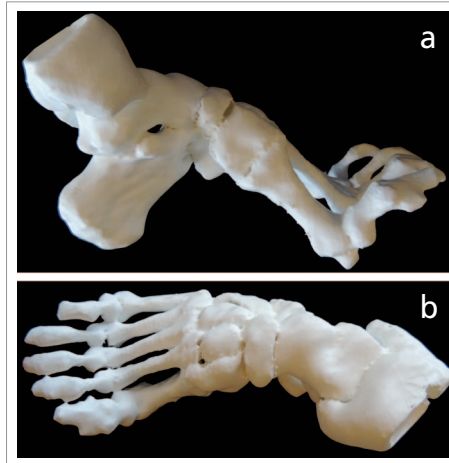


Figure 14. Résultats d'une maquette en impression 3D d'un pied creux (Fablab Montpellier) avant correction chirurgicale. a : vue latérale, b : vue par sa face dorsale.

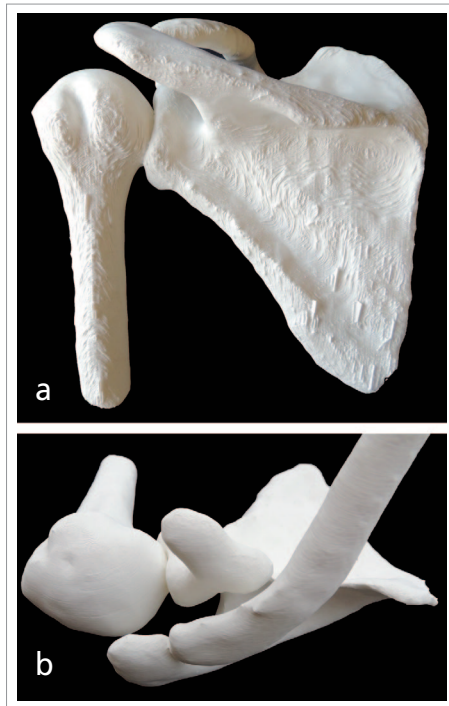


Figure 15. Cas clinique d'une scapula et de l'humérus avec maquette en impression 3D (Fablab Montpellier). a : vue postérieure avec l'encoche de Malgaigne, b : vue supérieure sur une luxation récidivante de l'épaule (communication SOFCOT, CAOS 2019, H. Barret, M. Gauci, P. Boileau, Nice).

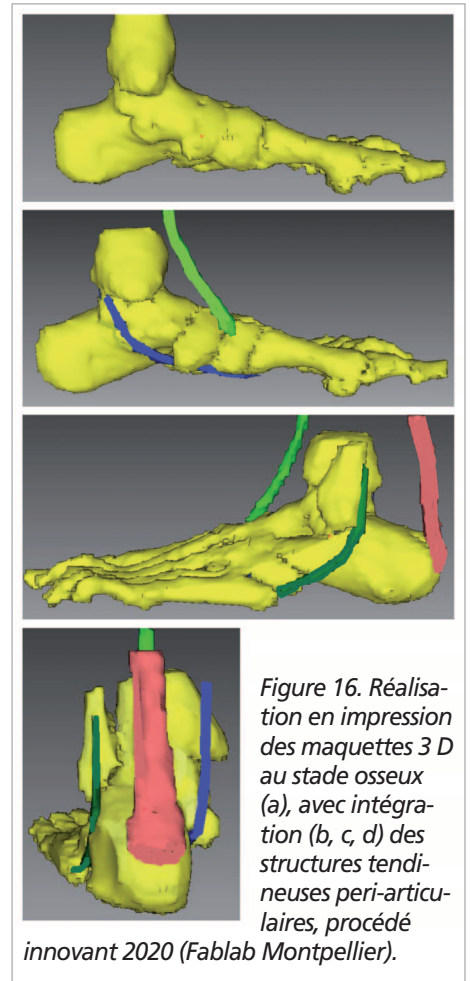


Figure 16. Réalisation en impression des maquettes 3D au stade osseux (a), avec intégration (b, c, d) des structures tendineuses peri-articulaires, procédé innovant 2020 (Fablab Montpellier).

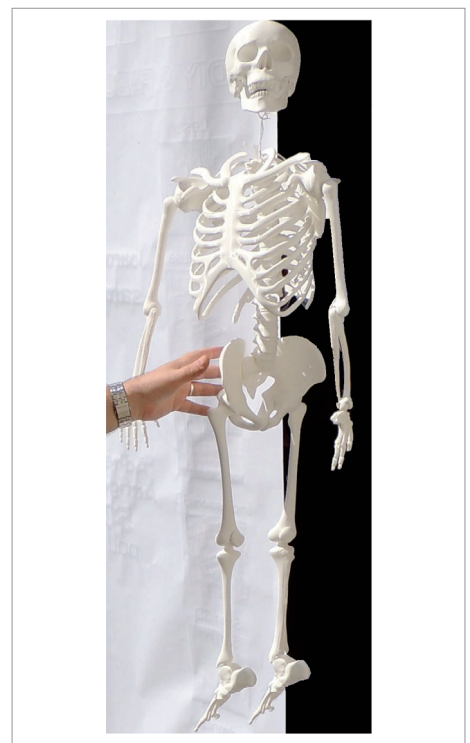


Figure 17. Impression 3D d'un squelette en totalité, réalisation Fablab, Montpellier (X. Bonnel).

Une ère nouvelle est offerte dans le cadre des laboratoires d'anatomie pour la formation des chirurgiens orthopédistes avec la vulgarisation de la « SimLife® » (« cadavre pseudo-vivant ») pour les explorations endoscopiques articulaires ou périarticulaires proches de la réalité.

La culture anatomique acquise par la consultation des travaux anciens est en péril et aggravée par l'usage non maîtrisé des moteurs de recherche antérieurs à 1930 selon les cas. En effet, les publications anatomiques en français sont très peu consultées avant cette période de même en Angleterre avec Wood ou en Allemagne avec le « *Handbuch Der Anatomie Und Mechanik Der Gelenke von Rudolf Fick* » et celui de Karl von Bardeleben « *Gelenk und Muskeln*, R. Fick, Fritz Frohse, Max Fränkel, 1910 ». Et pourtant comme le mentionnait Vauvenargues (1746) « *tout a été déjà dit, il faut le redire* ».

Une étude menée auprès des étudiants en chirurgie de l'Université de l'Iowa montrait que YouTube® constituait la principale source d'information vidéo pour se préparer à une intervention. Une autre étude se révèle plus inquiétante. Portant sur près de 70 000 vidéos d'immobilisation du poignet après une fracture distale du radius, elle conclut que seules seize d'entre elles ont les qualités requises pour être utilisées à des fins de formation. Là encore, la nécessité de réaliser un tri dans ces contenus et de les faire certifier par des professionnels est soulignée. D'après les travaux menés par l'équipe de Matthew Farag, l'algorithme de YouTube® mettrait régulièrement en avant des vidéos d'actes chirurgicaux mal pratiqués, pouvant se révéler dangereux pour le patient.

À l'inverse, les moyens numériques tirant partie de l'imagerie médicale en coupe (dont la tomodensitométrie) à partir d'un grand nombre d'exams colligés lors de pratiques cliniques sont un complément indispensable pour la mise en évidence des variations morphologiques. L'apport de l'intelligence artificielle, en plein développement, est intéressant tout en ayant à l'esprit qu'il reste à bien domestiquer son potentiel.

On peut aussi citer la démarche initiée par le neurochirurgien Maxime Ros (2015) qui intervient avec un masque de réalité virtuelle stéréoscopique immersif au service de l'apprentissage des habiletés chirurgicales. Une vidéo stéréoscopique est initialement captée lors d'une intervention par un expert en

conditions réelles avec le point de vue de l'opérateur. L'apprenant peut ensuite revoir autant de fois qu'il veut la séance en immersion 3D, avec en plus des compléments pédagogiques qui séquentent, expliquent et illustrent le geste. Cette pédagogie par l'image animée est applicable aussi bien à l'éducation de l'étudiant en formation initiale qu'à la préparation de rares gestes techniques complexes par des chirurgiens patentés.

La complémentarité entre la dissection anatomique de la substance blanche du cerveau par Klingner (1888-1963), Maldonado (2010)

(Figure 18 a), le neuroradiologue avec l'IRM fonctionnelle, la reconstruction tractographique du faisceau arqué par Catani (2005) (Figure 18 b) et le neurochirurgien dans le cadre de la chirurgie des tumeurs cérébrales chez les patients éveillés est un exemple pratique. En effet, des corrélations entre l'anatomie apprise grâce aux dissections et aux investigations électro-physiologiques peropératoires débouchent sur une préservation optimisée des circuits fonctionnels et donc de la qualité de vie des patients après intervention cérébrale (H. Duffau, 2019). Les

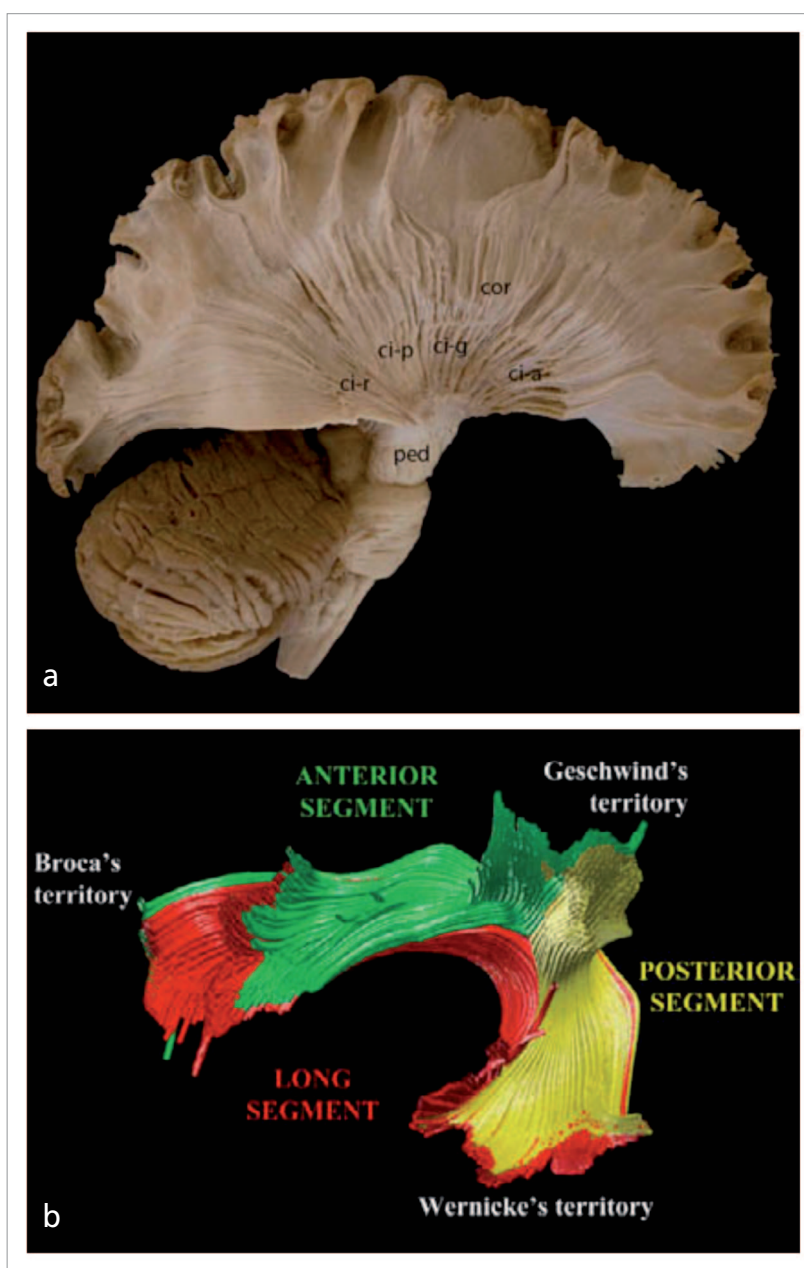


Figure 18. Complémentarité entre : a : la dissection des fibres blanches du cerveau et, b : la reconstruction tractographique du faisceau arqué par Catani (2005) en utilisant une technique de tenseur de diffusion, régions d'intérêt.

moyens technologiques numériques actuels en pleine évolution nous permettent d'intégrer sur le squelette osseux des tissus mous (tendons, muscles) dans le cadre de l'impression 3D.

Des travaux futuristes (Figure 19) réalisés par des chercheurs de l'équipe du Professeur Tal Dvir (*University's School of Molecular Cell Biology and Biotechnology / Sagol Center for Regenerative Biotechnology*), à l'Université de Tel Aviv (<https://www.businessinsider.co.za/Israeli-scientists-print-first-3D-heart-586902>) ont conduit à démontrer comment ils ont été en mesure d'imprimer en 3D le premier cœur vascularisé conçu au monde à l'aide des cellules graisseuses et des matériaux biologiques. Dans ce processus, des matériaux servent de bioencres, substances faites de sucres et de protéines qui peuvent être utilisés pour l'impression 3D de modèles de tissus complexes. « *The hope is that within 10 years, there will be organ printers in the finest hospitals around the world, and these procedures will be conducted routinely* ».

## Conclusion

La rétrospective sur l'enseignement de l'anatomie à Montpellier sur huit siècles a montré les exigences pédagogiques et l'intérêt porté à cette discipline fondamentale par tous les responsables universitaires dans la formation des médecins. C'est une science vivante qui ne délivre ses secrets que par la dissection doublée d'une observation et d'une réflexion exacerbées pour comprendre le fonctionnement complexe des tissus selon le principe de la tenségrité (M. Maestro). [NDLR : *La tenségrité est, en architecture, la faculté*

*d'une structure à se stabiliser par le jeu des forces de tension et de compression qui s'y répartissent et s'y équilibrent*]. La connaissance du corps est encore à ses débuts et doit nous rendre humble, en évitant de proposer des méthodes thérapeutiques en cours d'analyse avec des conclusions « une évaluation à plus long terme sera nécessaire ! ».

L'arrivée des nouvelles technologies offre de nombreuses possibilités afin de compléter et de renforcer les outils traditionnels utilisés pour l'enseignement de l'anatomie. Cela permet de travailler avec des enseignants de diverses spécialités. Chacun apportant ses compétences et ses connaissances (V. Delmas).

Les progrès de la technologie numérique ouvrent un champ d'exploration du corps humain avec l'impression 3D qui permettra à l'anatomiste de les mettre au service du patient sous une autre forme. Un défi est lancé aux générations futures pour faire en sorte que cet enseignement de l'anatomie de l'homme vivant avec tous ses mystères soit aussi performant. Elles auront l'entière responsabilité pour assurer la meilleure formation des futurs chirurgiens orthopédistes comme les maîtres qui les ont précédées. Sauront-elles lui donner la place essentielle dans l'enseignement et faire prospérer un patrimoine incomparable ?

« *L'anatomie est le lampadaire de la physiologie de l'homme debout, seule l'anatomie permet d'y voir clair dans la biomécanique* ».

**François BONNEL**

## Références

- F. Duparc, B. Grignon, D. Kachlik. Editorial: History in anatomy education. *Surgical and Radiologic Anatomy* (2019) 41:1101–1102. <https://doi.org/10.1007/s00276-019-02335-3>
- F. Bonnel, Th. Lavabre–Bertrand, Ch. Bonnel. The teaching of anatomy in Montpellier University during VIII centuries (1220–2020). *Surgical and Radiologic Anatomy* (2019) 41:1119–1128. <https://doi.org/10.1007/s00276-019-02289-6>
- M. Bartikian, A. Ferreira, A. Goncalves–Ferreira, L.L. Neto. 3D printing anatomical models of head bones. *Surgical and Radiologic Anatomy* (2019) 41:1205–1209. <https://doi.org/10.1007/s00276-018-2148-4>
- X. Zhang, Z. Xu. Application of three–dimensional reconstruction and printing as an elective course for undergraduate medical students: an exploratory trial. *Surgical and Radiologic Anatomy* (2019) 41:1193–1204. <https://doi.org/10.1007/s00276-019-02248-1>

Un groupe de travail « Don du corps et covid-19 » vient d'être constitué au sein du Collège des Professeurs d'Anatomie avec :

- Doyen Patrick BAQUÉ (Nice)
- Doyen Marc BRAUN (Nancy) [missionné par la Conférence des Doyens, et le président du CNU d'Anatomie 42.01]
- Pr Guillaume CAPTIER (Montpellier)
- Pr Philippe CHAFFANJON (Grenoble)
- Pr Christophe DESTRIEUX (Tours)
- Pr Fabrice DUPARC (Rouen) [membre du CNU d'Anatomie 42.01]
- Pr Marc LABROUSSE (Reims)
- Pr Patrick MERTENS (Lyon)
- Pr Stéphane PLOTEAU (Nantes)

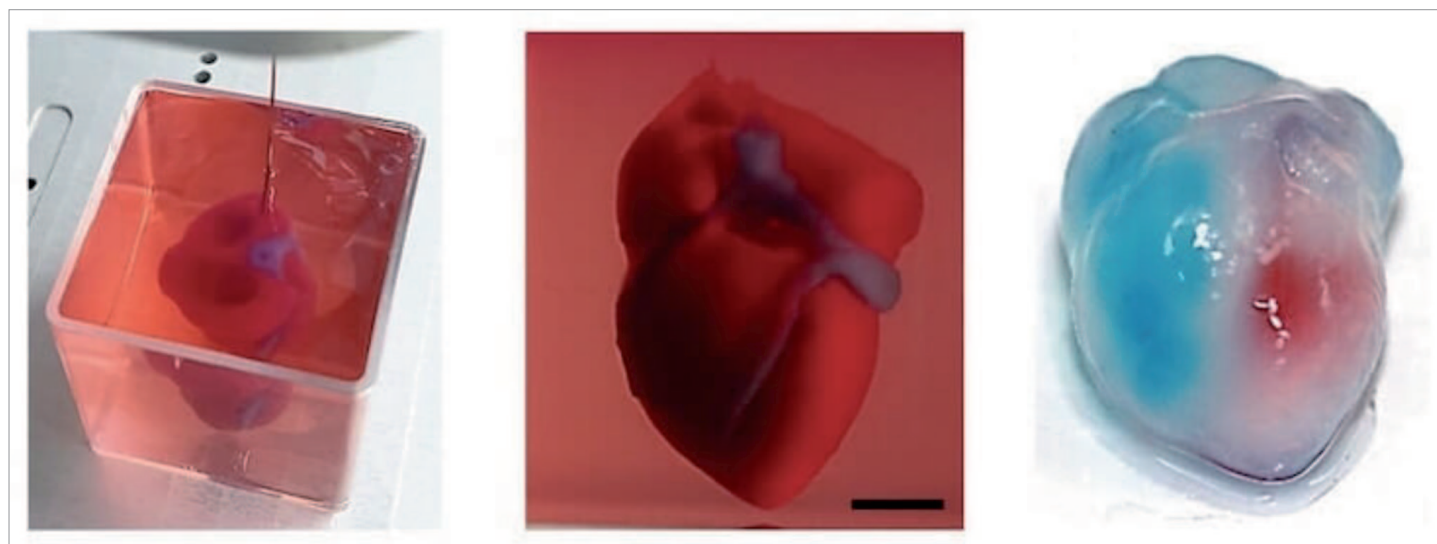


Figure 19. Impression en 3D du premier cœur vascularisé conçu au monde à l'aide des cellules graisseuses et des matériaux biologiques chez le lapin.



## BOURSE SOFCOT

Compte rendu de voyage :  
six mois à New YorkHSS HOSPITAL FOR  
SPECIAL SURGERY

## Hospital for Special Surgery (HSS), New York, USA

Par François LOISEL, Besançon, Boursier SOFCOT session juin 2018

**P**raticien hospitalier au CHU de Besançon, j'ai eu l'opportunité de scinder mon année de mobilité et de partir 6 mois dans la Ville qui ne dort jamais : New-York !

C'est à l'Hospital for Special Surgery (HSS) que les Drs Scott Wolfe et Steve K. Lee m'ont accueilli dans leur service du 1<sup>er</sup> avril au 30 septembre 2019.

Il s'agit d'un service de chirurgie de la main, du membre supérieur et nerfs périphériques, dont le bâtiment principal est localisé entre la 71<sup>e</sup> et la 72<sup>e</sup> rue entre York Avenue et l'East River (Figure 1).

L'HSS est une des plus anciennes institutions aux USA, dédiée au traitement des pathologies articulaires et osseuses (rhumatologie et chirurgie orthopédique) fondée en 1863 par James Knight. Son fonctionnement correspond à celui d'une structure privée mais possède des liens étroits avec l'université Weill Cornell Medical School (formation, recherche) ainsi que le Presbyterian Hospital (notamment pour les urgences) et le Memorial Sloan-Kettering Cancer Center.

Outre les étudiants en médecine, le service est animé par 10 chirurgiens, 4 fellows (= chefs de cliniques) et 3 à 4 residents (= internes, qui changent toutes les 6 à 8 semaines). Les fonctions et responsabilités des fellows ne sont pas homogènes dans tout le pays. Dans le service que j'ai visité, ils accompagnent, dans toutes les activités hospitalières, le binôme de chirurgiens qui leur est attribué tous les trois mois. Ils n'ont pas de vacation opératoire, n'opèrent pas seul, et n'ont pas de plage de consultation (seulement une consultation de post-urgence en relation avec l'hôpital). Bien entendu, au



Figure 1. L'Hospital for Special Surgery au bord de l'East River.

bloc opératoire, les chirurgiens seniors les autorisent à pratiquer des étapes des interventions sous leur surveillance. Ce décalage dans la prise de responsabilité est à mettre en balance avec la notoriété de cette institution qui leur permet, à l'issue de leur année de fellowship, de ne pas avoir de difficultés à trouver une poste n'importe où dans le pays.

Durant ces 6 mois, j'avais le statut de « research fellow » qui me permettait, en plus des travaux de recherche que je devais mener, d'assister aux interventions chirurgicales et aux consultations.

#### Organisation de la consultation

Le patient est examiné une première fois par l'interne, le chef de clinique ou le « PA » (physician assistant), qui fait ensuite un compte rendu oral au chirurgien et commence à écrire le courrier de compte rendu (Figure 2).

Le chirurgien senior examine à nouveau le malade avec l'étudiant et discute, si nécessaire, des différences retrouvées. L'étudiant bénéficie donc en temps réel d'une « correction » de son examen clinique qui est la base de notre pratique médicale. Chaque chirurgien travaille donc avec un « physician assistant » en plus du fellow et du resident. Ce « PA » a globalement le même rôle que l'interne ou le chef de clinique en consultation mais aussi un rôle d'aide opératoire au bloc, et de secrétaire spécialisé pendant le reste de la semaine : c'est lui qui va rappeler les malades en ambulatoire pour vérifier qu'il n'y a pas de complications, répondre aux appels des patients qui ont des questions, etc. Il a également une plage de consultation où il va généralement superviser les premiers pansements des interventions « légères » (canal carpien, doigts à ressaut, etc.) et rendre compte au chirurgien en cas de problèmes.



### Le bloc opératoire

Concernant le bloc opératoire (Figure 3), l'organisation est également globalement similaire. Pour rendre compte du niveau d'optimisation et de la lutte contre les pertes, les tenues de bloc sont distribuées par des machines (Figure 4), et chacun à un crédit de 3 tenues en rotation au maximum.

Le temps de la « check-list » est sacralisé et le chirurgien termine habituellement par la recommandation : « *If you see something, say something !* ».

De grands panneaux sont mis en place, différents en début et en fin d'intervention, pour que chacun puisse voir les éléments de cette étape de vérification ultime (Figure 5).

Comme il s'agit d'un service de chirurgie de la main, la très grande majorité des patients

sont opérés en ambulatoire. Quelques lits d'hospitalisation sont réservés aux gestes un peu plus lourds (plexus brachial, infections, arthroplastie du coude, etc.). À noter également que les patients sous ALR, sont sous PSE de propofol durant toute l'intervention. L'anesthésiste à qui j'en ai demandé la raison m'a répondu que la population New-Yorkaise (surtout celle du centre-ville, relativement riche et aisée) souhaitait dormir pendant l'intervention, n'entendre et ne se souvenir de rien... qu'elle était à l'image de certains personnages des films de Woody Allen : un peu névrosée ! Et que de toute manière, cela arrangeait aussi les chirurgiens qui « *ne souhaitent pas particulièrement répondre à leurs questions existentielles et être dérangé pendant le geste !* » (sic).

Durant ces six mois d'observation, j'ai pu me familiariser avec certaines techniques

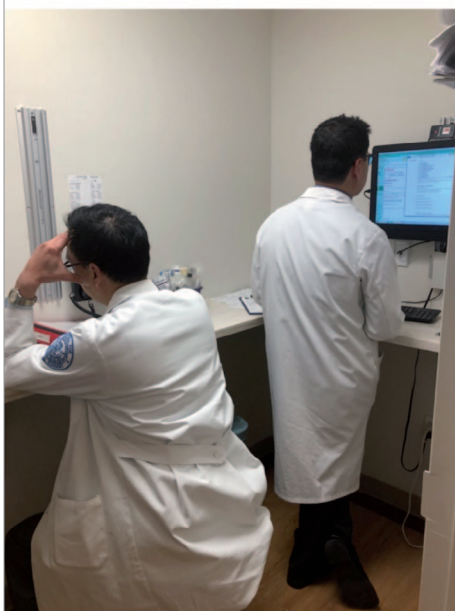


Figure 2. En haut, une des pièces de consultation au 4<sup>e</sup> étage du « Professional Building » à deux rues du bâtiment principal de l'HSS. En bas, le petit local où les étudiants tapent leur compte rendu en temps réel et présentent au chirurgien la situation du patient.



Figure 4. Exemple de machine « ScrubX », qui permet de délivrer sa tenue de bloc après vérification du numéro d'identification et du mot de passe.

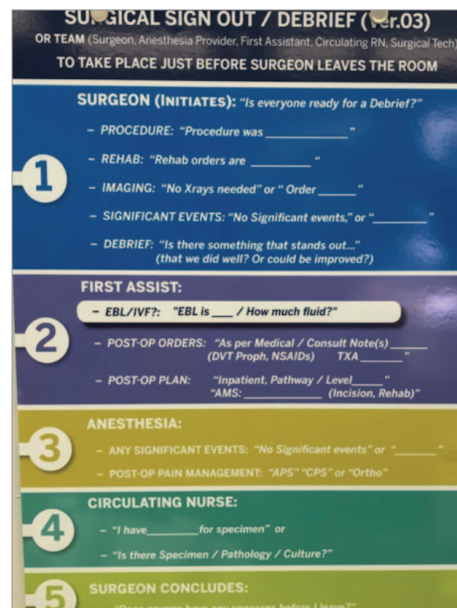


Figure 5. Panneau représentant la dernière phase de la check-list, affiché pendant la phase de pansement par l'infirmière de salle.



Figure 3. Vue panoramique d'un bloc opératoire.

originales comme la reconstruction du complexe ligamentaire scapho-lunaire par la technique ANAFAB avec le Dr Wolfe (*anatomic front and back reconstruction* décrite par M. Sandow en Australie, Figure 6).

Bien entendu, l'enrichissement intellectuel ne porte pas toujours sur « la révolution » d'une nouvelle technique, mais dans les variantes et « trucs et astuces » de gestes bien connus. J'ai pu noter, par exemple, la technique locale de suture de l'appareil fléchisseur dont les études descriptives et biomécanique ont été publiées par le Dr S.K. Lee (Figure 7). J'ai également pu assister à de multiples techniques de neurotisation au membre supérieur. Il y a quelques années, pour parfaire sa formation sur le traitement des lésions du plexus brachial, le Dr S.K. Lee a réalisé un voyage d'étude auprès notamment

des Pr C. Oberlin à Paris, Susan E Mackinnon à Washington et Somsak Leechavengvongs à Bangkok. Pour restaurer la flexion du coude, il privilégie le transfert de fascicules du nerf ulnaire et du nerf médian vers les branches motrices du nerf musculocutané à destinée du biceps et du brachial antérieur.

Pour restaurer la fonction de l'épaule, il réalise classiquement le transfert du nerf spinal accessoire vers le nerf supra-scapulaire et la branche du nerf radial à destinée de la longue portion du triceps vers la branche antérieure du nerf axillaire.

Dans certains cas particuliers (compression chronique du nerf ulnaire au coude, avec déficit moteur et hypotrophie thénar majeure), il réalise une neurotisation du nerf interosseux antérieur (à destinée du muscle carré pronateur) vers les branches motrices du nerf ulnaire.

### Une semaine « type »

La semaine commence le lundi matin à 7h00 par un staff de recherche bibliographique pour les fellows et résidents. Il est supervisé par les Drs Athanasian, Lee ou Osei, à tour de rôle. Le thème change chaque semaine allant des compressions nerveuses à l'avant-bras, jusqu'à l'arthrose du poignet en passant par les arthroplasties de l'IPP et des papiers sur l'éthique en chirurgie. Il s'agit d'un mélange d'articles « historiques » avec des travaux plus récents que les étudiants présentent en 5-10 minutes après avoir fait une présentation du CV des auteurs principaux. À l'issue de la présentation, les étudiants résumant ce que ce travail peut leur apporter dans leur pratique quotidienne. Le chirurgien senior, responsable de la session, conclut et souligne les points essentiels.

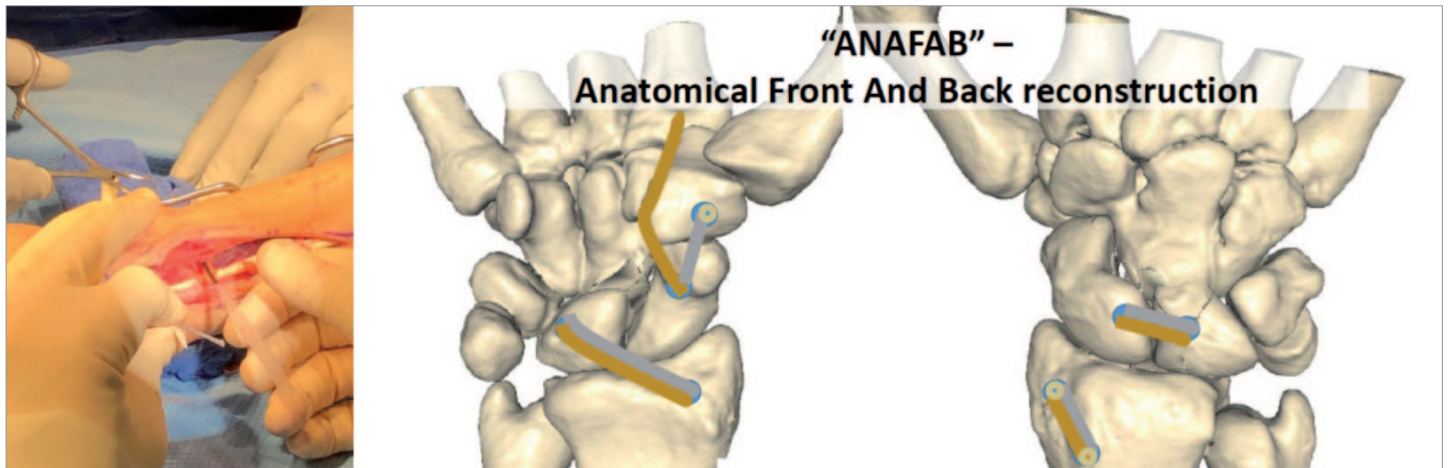


Figure 6. À gauche, passage du greffon au sein du tunnel scaphoïdien. À droite, représentation schématisique de cette ligamentoplastie anatomique reconstruisant à l'aide d'un héli FCR (Flexor Carpi Radialis), le ligament STT (Scapho Trapezio Trapezoid), le ligament scapholunaire dorsal et le ligament radiolunaire long (Selon M. Sandow).

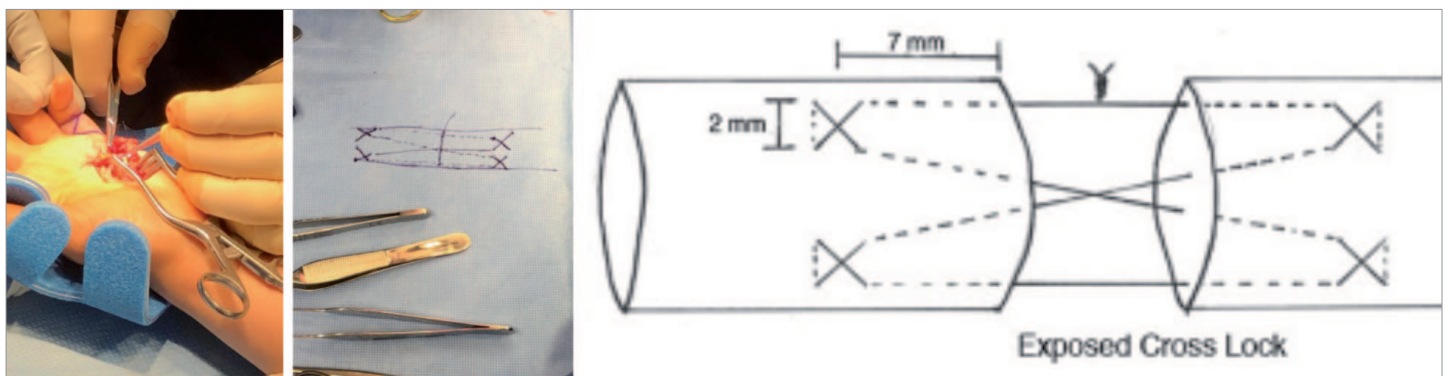


Figure 7. À gauche, réalisation d'une suture d'un tendon FCP du 5<sup>e</sup> rayon en zone 3, selon la technique du « cross-locked cruciate-interlocking horizontal mattress (CLC-IHM) ». Au milieu, dessin du Dr S. Wolfe, au bloc, pour expliquer les principes de la suture au fellow. À droite, schéma issu de l'article originel (A. Croog, R. Goldstein, P. Nasser, et S. K. Lee, « Comparative biomechanical performances of locked cruciate four-strand flexor tendon repairs in an ex vivo porcine model », *J Hand Surg Am*, vol. 32, n° 2, p. 225-232, févr. 2007).

Tous les mercredis matin, à 6h30, les étudiants participent à une séance de dissection au 8<sup>e</sup> étage du bâtiment principal, le « BioSkills Education Laboratory » (Figure 8).



Figure 8. Séance de dissection en compagnie du Dr R. Hotchkiss : les différentes voies d'abord du coude.

Sous la supervision d'un chirurgien senior, ils vont s'entraîner sur des voies d'abord, des techniques opératoires et la pose de matériel d'ostéosynthèse grâce au concours des industriels. À noter que les étudiants en médecine qui passent dans le service sont évalués parfois pendant cette session par le Dr Fufa Duretti sur la réalisation de la libération à ciel ouvert du nerf médian au canal carpien selon les critères de l'université du Minnesota.

Le jeudi matin, à 7h00, c'est la « grande messe » qui regroupe tout le service ainsi que l'ensemble de l'équipe de rééducation. Le chef de service commence par demander aux fellows si des patients ont présenté des complications durant la semaine écoulée. En cas de réponse positive, une présentation du cas clinique est réalisée et le chirurgien senior argumente ses choix, donne ses explications et répond aux questions de ses collègues : le but est de profiter de l'expérience de chacun et d'éviter de reproduire des erreurs s'il y en a eu. Ensuite, un cours est réalisé par un des membres de l'équipe, chirurgien ou kinésithérapeute (Figure 9). Parfois c'est un médecin invité qui fait une présentation, comme cela a été le cas avec le Dr Edward Akelman de « Providence » (state of Rhode Island), qui nous a parlé de l'utili-

sation des collagénases dans la maladie de Dupuytren, ou bien le Dr Bauback Safa de la « Buncke clinic » (CPMC Davies Campus, San Francisco, Hand and Microsurgery) pour nous parler de son expérience et des perspectives d'avenir en microchirurgie.

### La recherche

Après avoir réalisé mon master 2 de biomécanique aux Arts et Métiers de Paris sur le thème de l'étude de la cinématique scapho-lunaire, je voulais poursuivre dans cette thématique. C'est pour cette raison que j'avais choisi de rejoindre cette équipe New-Yorkaise qui a une très grande expérience dans ce domaine. Le Dr Wolfe s'intéresse en effet depuis longtemps aux stabilisateurs, improprement qualifiés de secondaires, dans le poignet. Notre étude avait pour but de comparer deux voies d'abord du poignet, celle de Berger, classique (*fiber splitting capsulotomy*), détachant les insertions du DRC (*dorsal radio carpal ligament*) et DIC (*dorsal inter carpal ligament*) du lunatum, et une nouvelle voie d'abord plus conservatrice appelée « window » qui conserve ces insertions. En suivant une méthode et un banc d'essai validés, j'ai testé 24 poignets de cadavre et comparé l'évolution des angles RLA (*radio-lunate angle*), SLA (*scapholunate angle*), le diastasis scapho-lunaire et la translation dorsale du scaphoïde sur des clichés radiographiques en fonction des différentes voies

d'abord dans un contexte de section du ligament scapho-lunaire (Figure 10). Les résultats préliminaires, présentés au dernier congrès WRIST à Lyon, montrent l'intérêt de conserver autant que possible les insertions ligamentaires du lunatum.

Ce travail biomécanique rentre dans le cadre très large d'un projet de recherche portant sur l'étude des ligaments à la face postérieure du poignet (supervisé par Lauren Wessel). Outre ce travail biomécanique, une autre étude portait sur l'étude descriptive et histologique des insertions ligamentaires des ligaments DRC et DIC. Une troisième étude cherchait à savoir si on pouvait caractériser et différencier ces ligaments à l'aide de l'IRM en coupe ultrafine. Nos différentes dissections complémentaires ont mis en évidence les différentes portions du DIC et en particulier sa partie profonde appelée ligament scaphotriquétral dorsal (dST).

En marge de ce travail biomécanique, j'ai également participé à un travail de synthèse d'une série multicentrique internationale de cas d'instabilité carpienne non dissociative (*carpal instability non-dissociative with ventral intercalated segment instability : CIND-VISI* et *carpal instability non-dissociative with dorsal intercalated segment instability : CIND-DISI*) dans un contexte de fracture non déplacée du scaphoïde. Cette série, pour laquelle un article est en cours de rédaction,



Figure 9. Salle de réunion du 8<sup>e</sup> étage, lors de la traditionnelle réunion du jeudi matin. Ici le Dr S.K. Lee présente aux fellows ses travaux biomécaniques sur la suture des tendons fléchisseurs.

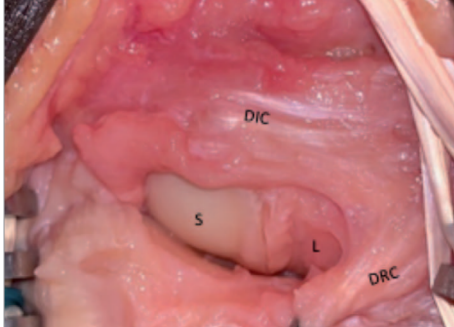
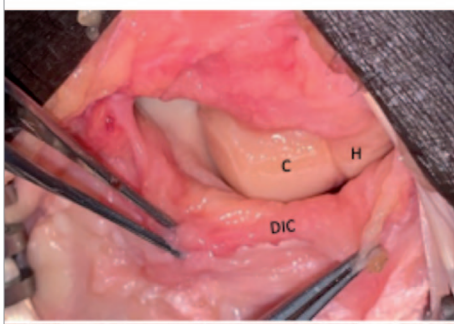
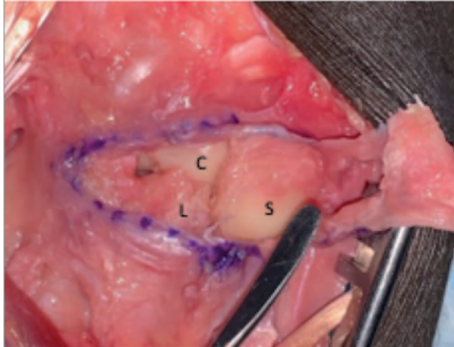
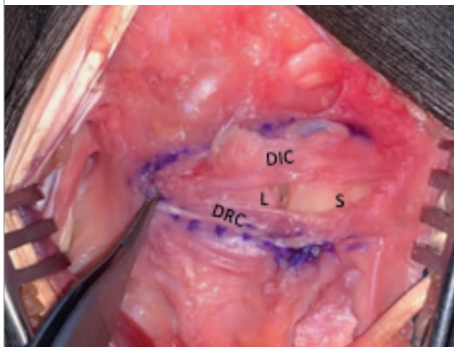
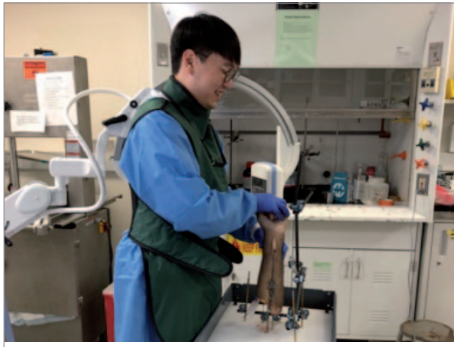


Figure 10. David Jinseong, étudiant en médecine au Mont Sinai, qui m'a aidé sur ce travail biomécanique. Au milieu, la voie d'abord FSC et, en bas, la voie d'abord window approach.

permet d'exposer la théorie du Dr Wolfe des lignes d'amarrage du lunatum (« *morning lines* ») en exposant les ligaments responsables du DISI et du VISI dans ce cadre nosologique très spécifique.

**La vie à New-York**

La grande chance et la richesse de cette expérience résident non seulement dans les échanges professionnels, amicaux, mais également dans la rencontre d'une culture et d'une ville tout à fait fantastiques (Figure 11). Pendant 6 mois, j'ai eu l'impression de vivre dans un « village mondial », où l'on se sent très vite « comme à la maison ». Parcourir la

ville en vélo, courir à Central Park, visiter tous les hauts lieux culturels (Metropolitan Museum, Guggenheim, Ellis Island, etc.), (Figure 12), aller au théâtre à Broadway, dans les clubs de jazz à Harlem, supporter l'équipe de Baseball des « Mets » dans le Queens (dont le Dr Wolfe est un fan inconditionnel depuis son plus jeune âge), (Figure 13), aller à la plage le week-end, à Cooney Island ou Far Rockaway (et même surfer !)... ne sont qu'une infime partie des moments qui vont laisser des souvenirs impérissables.

**Et ensuite...**

De retour en France, j'ai poursuivi, depuis début octobre, la deuxième partie de cette mobilité en commençant un travail de thèse de sciences à l'institut de biomécanique humaine Georges Charpak à Paris. Le thème du travail concerne la construction et la validation de modèles géométriques de la main et du poignet afin de pouvoir étudier la cinématique *in vivo*. Cette deuxième partie du programme s'annonce tout aussi enrichissante et productive !



Figure 11. Vue de Manhattan depuis l'Empire State Building (en haut), et en allant vers Liberty Island (en bas).



Figure 12. A gauche, un exemplaire original de la bible de Gutenberg à la Pierpont Morgan Library & Museum. A droite, « Les sources de la Loue » de Gustave Courbet, au Metropolitan Museum (petit clin d'œil Franc-Comtois !).

Pour conclure, cette courte expérience à l'étranger a été extrêmement enrichissante, d'un point de vue professionnel, c'est certain, mais plus encore sur le plan humain. Cette aventure n'aurait pas pu voir le jour sans le soutien financier important de la SOFCOT et je remercie l'ensemble des membres pour avoir permis cela.

Je ne veux pas oublier non plus toutes les personnes qui m'ont aidé dans ce projet : en premier lieu, Laurent Obert, mon mentor, et toute l'équipe de Besançon qui a dû travailler un peu plus en mon absence. Scott Wolfe et Steve K. Lee pour leur accueil. Marion Burnier, sans qui je ne serais pas parti à New-York. Nicolas Reina, Matthieu Ollivier et Sébastien Parratte pour leurs précieux conseils au début du projet. Mes parents et beaux-parents pour s'être occupé de leurs petits enfants à maintes reprises pendant mon absence. Et, finalement, mon épouse et mes trois enfants qui ont vaillamment supporté l'éloignement de quelques mois mais qui ont également profité de ce dépaysement en me rejoignant en cours de route...

## François LOISEL



Figure 14. Après une séance de dissection : Scott Wolfe, Lauren Wessel, David Jinseong



Figure 13. De gauche à droite, Richard Ahn (fellow), Missy et Scott Wolfe, au CityField, le stade des « Mets » !

## Production scientifique en cours

### • Travail biomécanique

*Is the dorsal fiber splitting approach to the wrist safe? A kinematic analysis and introduction of the window approach*

François Loisel, Kyle Morse, David Jinseong, Kathleen Meyers, Lauren Wessel, Scott Wolfe

Target Journal: JBJS

En cours de rédaction

### • Revue de la littérature et étude d'une série de cas cliniques

*Traumatic non-dissociative carpal instability: a case series*

François Loisel, Steven Orr, Andrew J. Leo, Greg Couzens, Mark Ross, Scott Wolfe

Target Journal : Journal of Hand Surgery (am)

En cours de soumission

### • Premier article du travail de thèse

*Three-dimensional reconstruction of hand from biplanar radiographs: evaluation of accuracy and reliability*

François Loisel, Stan Durand, Sébastien Aubry, Xavier Bonnet, Philippe Rouch, Wafa Skalli

Target Journal: Journal of Hand Surgery (am)

En cours de soumission

NB : Si je peux aider un collègue qui désire réaliser ce type de projet, je serai très heureux de répondre à ses questions, n'hésitez pas à me contacter : [francois.loisel@gmail.com](mailto:francois.loisel@gmail.com)



Figure 15. Quelques photos des personnes qui ont compté pendant ce séjour, Justin Dufresne le technicien du laboratoire d'anatomie à gauche ; l'équipe du Dr S. K. Lee et lui-même au centre ; Sravan Dhulipala, un fellow venant d'Atlanta, à droite.

## BOURSE SOFCOT

## Fellowship clinique en oncologie orthopédique à Toronto

Mount Sinai Hospital, Toronto, Canada

Par Jean-Camille MATTEI, Marseille, Boursier SOFCOT session juin 2017

Le cursus hospitalo-universitaire nécessite la réalisation d'une année dite de « mobilité » à l'étranger, si possible dans un pays anglophone dont la langue est désormais devenue incontournable tant dans la transmission écrite de nos connaissances et recherches que dans leur exposition à l'oral lors des congrès internationaux, à l'origine de nombreuses collaborations.

Mes Maîtres marseillais, les Professeurs Curvale et Rochwerger sont historiquement liés à un service prenant en charge les tumeurs de l'appareil musculo-squelettique. C'est rapidement au cours de mon cursus d'internat que cette chirurgie, solidement ancrée dans une approche pluridisciplinaire du patient, m'a séduit. Les connaissances en anatomie qu'elle nécessite, associées à une approche intellectuelle hors du cadre traditionnel de l'orthopédie, que mon précédent cursus d'ingénieur a probablement stimulé, ne sont pas étrangères à mon attrait pour cette sur-spécialisation. Mon Master 2 d'Ecole d'Ingénieur Agro Paris, basé sur l'étude épigénétique du cholestérol, est aussi à l'origine d'une grande curiosité vis-à-vis de la biologie et de la génétique des sarcomes, auxquelles ma thèse de science était dédiée. Enfin, la grande humanité de l'approche de ces patients par les différents intervenants que j'ai pu rencontrer, dont nos amis du Groupe Sarcome Français, n'a fait que confirmer l'idée que je me faisais de ma future pratique clinique, au sein de la spécialité et de notre service. Cette dernière ne pouvait par ailleurs pas se concevoir en dehors d'une activité de recherche, axée sur cette pathologie encore très mal comprise.

C'est donc assez naturellement qu'un fellowship clinique a été décidé dans la mesure où la formation à la chirurgie tumorale en orthopédie ne pouvait se concevoir dans le



cadre d'un fellowship de recherche, sans contact avec le patient et sans pratiquer une chirurgie particulièrement exigeante et longue à maîtriser, pour peu qu'on puisse la maîtriser un jour...

## Le projet

Initialement prévu à Londres, le projet s'est progressivement cristallisé autour de l'équipe des Professeurs Jay Wunder et Peter Ferguson au Mount Sinai Hospital de Toronto (du 1<sup>er</sup> juillet 2018 au 30 juin 2019). Ce lieu de post-doctorat m'avait en effet été vivement conseillé par un de mes maîtres durant mon semestre d'inter-CHU à l'hôpital Cochin à Paris, le Professeur Biau, qui y avait réalisé son propre Fellowship en 2006. Son approche était assez claire : « Tu dois aller là-bas ».

Il s'agit d'un fellowship basé uniquement sur les tumeurs de l'appareil locomoteur et extrêmement demandé, dont la candidature doit s'effectuer plus de 3 ans en amont. Tout avait donc commencé à Berlin en 2014 lors du CTOS (le congrès international de la

recherche translationnelle sur les sarcomes) où j'avais réalisé mon entretien avec Jay Wunder, grâce au Professeur David Biau qui nous avait mis en contact en soutenant ma candidature (le système nord-américain fonctionne énormément sur lettres de recommandation). Ce dernier a conservé des liens d'amitié et de coopération forts avec le Canada. C'est désormais aussi mon cas.

Passèrent ensuite 4 années après acceptation de ma candidature avant de faire les valises. Mais le voyage était conditionné par « quelques » pirouettes logistiques et administratives. Ces dernières doivent en effet être débutées un an en avance, avec un système de reconnaissance des diplômes, de vérification de casier judiciaire (canadien et à récupérer avant d'entrer sur leur sol...), transmission des données « automatisées » à leur équivalent du Conseil de l'Ordre (qui ne répond que par mail...avec une latence certaine). Les aspects professionnel et émigratoire devaient être gérés simultanément face à un ministère canadien très exigeant quant aux critères de sélection. En effet, l'ensemble du dossier est basé sur la tournure de la lettre d'acceptation du service médical canadien dont on sera amené à dépendre.

Le professeur Biau m'avait enfin dit pour me « rassurer » qu'il ne fallait pas que je m'en fasse dans la mesure où lui aussi « avait pensé jusqu'au dernier moment qu'il ne partirait jamais » ...

A posteriori, la procédure n'est pas si compliquée mais elle est particulièrement longue et anxiogène. Je me tiens par conséquent à la disposition de mes confrères cherchant à réaliser leur fellowship au Canada pour les épauler dans ces démarches, sachant qu'il faut mener en parallèle la recherche de logement dans une ville fonctionnant à flux tendu sur son parc locatif hors de prix.

L'aide de la SOFCOT a donc été déterminante dans la réalisation de ce projet et je tiens, à nouveau, à chaleureusement remercier ici ses membres de m'avoir soutenu et accompagné dans sa logistique.

En conclusion, le jeu en vaut largement la chandelle puisqu'il s'agit d'un des rares fellowship anglosaxons où l'on est considéré comme chirurgien à part entière avec le droit de prescrire, examiner et opérer les patients (avec obtention d'un numéro d'enregistrement au conseil de l'ordre au même titre que tout médecin canadien).

## Toronto

Toronto, mégapole de 6 millions d'habitants, est le poumon économique du Canada, nichée sur les rives du lac Ontario, un des 5 lacs majeurs d'Amérique du Nord, chers à nos cours de géographie d'il y a quelques années. L'arrivée en avion est impressionnante : la ville s'étend à perte de vue, car majoritairement composée de maisons individuelles, datant d'une époque où, pour peupler le Canada, les Anglais donnaient littéralement des terres pour y attirer les colons. C'est par conséquent une ville très verte puisque chaque maison a son backyard et son frontyard typiques. La pollution y est quasi absente, le Canada étant presque exclusivement fourni en énergie hydraulique.

La ville est un trésor d'activités en tout genre, qui ne se laisse cependant pas aussi facilement découvrir que Montréal et bien entendu Québec : il faut la visiter avec un connaisseur, sinon il est facile de passer complètement à côté de son histoire, ses secrets et sa beauté, dans la mesure où du fait de son développement exponentiel, cette dernière n'a pas hésité à se délester de nombreux trésors architecturaux et historiques au profit de gratteciel (bien que la plupart aient été conçus par des architectes de renom, comme Mies Van Der Rohe). Pour donner une idée du développement de la ville : lors de l'exode irlandais du milieu des années 1800, Toronto a accueilli 40 000 réfugiés alors qu'elle ne comptait que 5 000 habitants !

Au niveau culturel, Toronto, ville de Glenn Gould, est un incontournable international de musique classique avec deux salles comptant parmi les plus belles acoustiques mondiales, une programmation théâtrale extrêmement riche et un ballet mondialement reconnu, tous soutenus par un mécénat très actif (tout comme dans la santé).



*Vue prise du ferry en se rendant vers les îles de Toronto.*

Au niveau sportif, le canadien est à mi-chemin entre l'européen et l'américain, suivant particulièrement hockey sur glace, baseball et basketball sans bouder le football/soccer avec une équipe torontoise assez réputée en Amérique du Nord. J'ai eu la chance de voir gagner le championnat NBA par les Raptors, seule équipe canadienne de basketball, d'autant que Toronto n'avait plus gagné un seul titre dans ses sports majeurs depuis 1993, autant dire que j'ai pu profiter d'une ville au paroxysme de sa joie et de sa fierté. Autant que la France qui avait gagné la coupe du monde quelques jours après mon arrivée. J'ai ainsi eu droit à un joli palmarès international sur mon Fellowship.

Le reste des activités comprend surtout les sorties en plein air : randonnées en kayak dans les parcs nationaux, marches, traîneaux à chien (dont l'entreprise que nous avions réservée était tenue... par un marseillais), motoneige, ski (plutôt à l'ouest près de Vancouver)... La ville regorge, par ailleurs, comme toute « capitale » d'un potentiel illimité de musées, restaurants et commerces.

La question qui m'est souvent posée est celle du froid. Il y a en effet une ville sous-terrainne, des alertes météo fréquentes et des températures ressenties qui sont descendues sous les - 45°C mais celles-ci sont globalement bien supportées avec un bon vêtement technique permettant à tout le monde de pratiquer tout de même le hockey ou patin à glace sur les multiples patinoires installées par la ville, comme s'il faisait 10 degrés. Le plus dur étant de s'armer de patience : le froid commence en novembre



*Une des nombreuses patinoires du centre-ville, ici sur le parvis de la mairie.*

et nous avons connu une tempête de neige mi-avril... L'été reste en contraste extrêmement radieux et la ville se transforme en station balnéaire dévoilant ses îles, très agréables, à quelques minutes de ferry ainsi que ses multiples parcours de golf, véritable institution canadienne.



## Système de santé

Celui-ci est globalement très généreux (à pondérer par la taxation sur les revenus au Canada et le coût des études, très élevés) et ressemble à notre système français avec une prise en charge complète pour les soins courants. Le système privé est quasi inexistant et se réduit principalement à la dentisterie, l'esthétique, la chirurgie ophtalmologique « de confort » et certains actes de dermatologie. Les assurances complémentaires ne sont donc surtout utilisées que dans ces disciplines. À noter que certaines spécificités existent, par exemple un kinésithérapeute à domicile n'est pas remboursé ; de même pour certains médicaments, faisant ici intervenir les mutuelles. Fait intéressant : les canadiens n'utilisent quasiment pas les ambulances (hors urgences).

Le Canada est aussi très généreux avec ses étudiants internationaux puisque j'ai pu bénéficier d'une couverture santé fédérale à 100 % pour un équivalent de 100 euros pour deux mois puis gratuitement jusqu'à la fin du fellowship. Les assurances professionnelles ne pratiquent malheureusement pas les mêmes tarifs...

Les chirurgiens sont payés à l'acte (et donc dans le public) et les orthopédistes oncologues avaient obtenu d'être payés au ¼ d'heure passé au bloc du fait de chirurgies longues, non adaptées au système à l'acte. Les consultations de première fois sont assez bien rémunérées mais toutes les consultations ultérieures ne sont pas payées au chirurgien, s'intégrant dans un forfait de soins. Tout est pris en charge par le service de santé fédéral ou provincial et le chirurgien est uniquement payé par ce dernier, sans dépassement d'honoraire possible.

Les délais d'attente sont assez longs, sans toutefois atteindre les extrêmes du Royaume-Uni : les arthroplasties classiques nécessitent en moyenne 6 mois d'attente. L'organisation en chirurgie tumorale musculosquelettique favorise bien entendu les cas de sarcomes avérés, les chirurgies pour tumeurs bénignes pouvant attendre parfois deux ans ! Il s'agit du revers de la médaille d'un système centralisé et rodé depuis plus de dix ans dans la prise en charge des tumeurs de l'appareil locomoteur : personne ne prenant en charge les tumeurs bénignes en dehors des centres référents, les délais de traitement peuvent être très longs.

Les étudiants en médecine accèdent, suivant les provinces, soit directement en médecine après le lycée (comme en Ontario et Toronto), soit après quelques années dans un cursus de leur choix, leur permettant d'engranger de l'expérience, des publications (déjà !) et des diplômes qui conditionneront leur entrée en médecine. Une fois dans le cursus, la suite est une habile cuisine entre notes aux examens, lettres de recommandations (cruciales et vraiment pas de complaisance), entretiens et listes de publications permettant, après un matching, d'intégrer la spécialité médicale ou chirurgicale (si possible) désirée. En effet, l'étudiant classe ses choix parmi plusieurs facultés d'Amérique du Nord (le système réuni USA et Canada) et, de leur côté, tous les jurys d'université classent les étudiants selon une évaluation globale de leur cursus, permettant d'affecter tous les étudiants dans un internat en fin de procédure. Par la suite, les internes suivent un cursus chirurgical comparable au nôtre (5 ans) avec des rotations de 1 à 4 mois bien plus variées qu'en France (radiologie, médecine interne, réanimation sont par exemple obligatoires en chirurgie). Bien mieux payés qu'en France, ils travaillent cependant encore plus (90 heures minimum par semaine en chirurgie) et la problématique des repos de garde commençait à poindre au moment de mon départ. En fin de parcours (et après un examen final type DESC extrêmement rigoureux), il n'y a pas de nécessité d'assistantat. Cependant, des fellowships post-internat d'un à deux ans sont de plus en plus demandés pour trouver un poste dans un secteur qui freine actuellement les recrutements... afin de tenter de diminuer le coût de la santé (certains pays se reconnaîtront ici...).



*Exemple de prise en charge pluridisciplinaire, ici avec les urologues*

## Fonctionnement de l'unité

Celle-ci est encadrée par le Professeur Jay Wunder pour la part clinique et de recherche. Le côté universitaire étant dédié au Professeur Peter Ferguson, chairman d'Orthopédie à l'Université de Toronto, classée dans le top 20 international. Deux chirurgiens gèrent donc un bassin de population d'environ 12 millions d'habitants au niveau des tumeurs de l'appareil musculosquelettique et y sont entièrement dédiés, sans aucune autre activité dans les autres champs de l'orthopédie.

L'unité possède un fonctionnement assez classique avec un étage dédié aux consultations (qui s'effectuent aussi dans l'hôpital d'à côté, le Princess Margaret, où les consultations sont communes avec les oncologues et les radiothérapeutes, améliorant l'efficacité de la prise en charge des patients atteints de sarcomes) et à la recherche.

L'unité d'hospitalisation est commune à toute l'orthopédie et fonctionne comme en France en CHU, les internes au centre de l'organisation, avec visites seniorisées régulières, les seniors et internes ne gérant cependant que leur propres patients. L'interne y est globalement plus autonome qu'en France du fait de la formation médicale variée évoquée précédemment et la nécessité d'avis spécialisés est moins fréquente que chez nous, apportant une certaine fluidité à la prise en charge. Ceci au prix d'un volume horaire plus important pour l'interne, qui commence sa visite très tôt (5h45-6h), avant les cours quotidiens (7h15), suivis des blocs ou des consultations.

Nous étions 3 co-fellows à nous partager le travail en rotations équitables, agenda qui comportait par chirurgien 3 journées de blocs et 2 journées de consultations avec une journée de recherche clinique prévue pour chaque fellow. Pour le bloc, il n'était pas rare de nous habiller à deux ou trois fellows sur des cas complexes assez fréquents : le canadien, bûcheron costaud, tarde habituellement à consulter, d'une part du fait de sa tendance à relativiser mais aussi du fait de l'éloignement (parfois 600 km pour rejoindre un centre référent) et de la longueur des prises de rendez-vous (médecin généraliste, avis spécialisé, puis IRM...).

L'activité est très importante, avec 2 à 3 cas de sarcome par jour malgré un accès au bloc très régulé. En effet, l'organisation des blocs (avec une heure limite du programmé

à 16 heures) est complexe mais globalement assez bien répartie entre les spécialités orthopédiques. Seul vrai problème organisationnel : les cas non programmés de sarcomes (infections surtout) sont assez difficiles à opérer en « urgence », l'hôpital étant un centre référent international en grossesses complexes, les blocs en soirée étaient souvent dédiés aux autres spécialités. Il était donc très fréquent de faire des lavages de prothèses (parfois avec dépose et pose de spacer...) entre 22h et 2 heures du matin. Mais aucune activité de garde ne nous incombait, rendant le système assez équilibré.

En ce qui concerne la recherche, l'unité a la chance de pouvoir compter sur un mécénat et des dons de patients conséquents permettant de financer l'ensemble des activités de recherche. L'approche est scindée en trois :

- Une unité de biomécanique avec une équipe d'une dizaine de personnes dépendante du service d'orthopédie (pas uniquement tumorale) et se situant dans un bâtiment immense en face du Mount Sinai abritant divers services de recherche associant public-privé (équipe avec laquelle a été par exemple développé un système de navigation en chirurgie tumorale).
- D'autre part, la recherche purement clinique, encadrée par un ingénieur de recherche, le Dr Griffin, rompue à l'exploration, la mise à jour de la base de données et à la réalisation des statistiques, où il a été possible d'étudier certaines situations cliniques précises comme l'évolution métastatique

osseuse des sarcomes, peu décrite. Trois ARC (dont le Dr Griffin) sont donc entièrement dédiés aux sarcomes. La base de données prospective est entretenue depuis 1980, permettant une analyse de sous-types rares de sarcomes mais aussi des plus communs avec des tailles d'échantillon conséquentes.

- Enfin, le Pr Wunder est à la tête d'un laboratoire de recherche translationnelle avec une des banques les plus importantes de tissus tumoraux de sarcomes au niveau international permettant de multiplier les études visant à élucider les mécanismes biologiques régissant le développement des sarcomes, leur sensibilité aux traitements et au développement de nouvelles molécules, avec 5 personnes à temps plein dont le Dr Gokgoz a la charge. Mon PhD en oncologie biologique m'a permis de développer un partenariat unique avec la réunion d'échantillons canadiens et ceux du groupe sarcome français visant à étudier les mécanismes de dédifférenciation des liposarcomes dont les résultats sont attendus dans l'année. La qualité de l'encadrement de recherche m'a permis de présenter mes travaux dans 5 meetings internationaux dont le CTOS, prestigieux congrès entièrement dédié au sarcome où la sélection des études chirurgicales est drastique.

L'ensemble des axes de recherche autour du sarcome est donc encadré par la même personne (le Pr Wunder), rendant les interactions extrêmement simples et stimulantes (l'ensemble étant géré par un réel passionné de la recherche translationnelle).

## Conclusion

L'expérience vécue à Toronto a dépassé toutes mes attentes et je remercie le Professeur Biau de m'avoir poussé vers le Canada. Tout y était facilité dans la prise en charge du patient et j'espère pouvoir modifier certaines de mes pratiques actuelles, bien que l'organisation ne soit pas transposable en totalité en France. Les équipes de recherche, le personnel soignant et les Pr Wunder et Ferguson sont rompus à l'accueil, l'encadrement et l'accompagnement des fellows avec un sens de la pédagogie exceptionnel ce qui a rendu l'éloignement beaucoup plus facile à supporter.

Cette année m'a enfin permis de lier des amitiés très fortes avec l'équipe et mes co-fellows et je suis extrêmement reconnaissant d'avoir eu la chance de connaître une entente si parfaite dans un cadre professionnel.

À nouveau, je tiens à remercier la SOFCOT ainsi que mes chefs de service, les Professeurs Curvale et Rochwerger de m'avoir soutenu dans ce projet, qui a radicalement changé ma façon d'appréhender cette pathologie. Il nous a permis de développer une coopération transatlantique fascinante avec plus de 10 projets en cours de finalisation que ce soit avec notre unité marseillaise qu'avec le Groupe Sarcome Français.

**Jean-Camille MATTEI**

[jean-camille.mattei@ap-hm.fr](mailto:jean-camille.mattei@ap-hm.fr)



Le bâtiment de recherche dans l'ancien Toronto General Hospital et une partie du laboratoire de biomécanique.

## Travaux

Prix de la chaire d'orthopédie de l'Université de Toronto pour notre travail sur les envahissements ganglionnaires sarcomateux

• **Distal extremities sarcomas: are they so different from other limb localizations?**

Jean-Camille Mattei, Veronique Brouste, Philippe Terrier, Sylvie Bonvalot, Axel Leceste, Eberhard Stoeckle, Antoine Italiano, Dominique Ranchere-Vince, Pierre Meeus, Marick Lae, Philippe Rosset, Alexandre Rochwerger, Jean Michel Coindre, Sebastien Salas

Journal of Surgical Oncology, 2019

• **Are we heading to the future of musculoskeletal tumor imaging with ultra-high field 7T MRI?**

Jean-Camille Mattei, Arthur Varoquaux, Alexandre Foure, Arnaud Le Troter, Alexandre Rochwerger, Sébastien Salas, Sandrine Guis, Corinne Bouvier, Maxime Guye, Christophe Chagnaud and David Bendahan

Clinical oncology and research, 2019

• **Fixed-hinge cemented modular implants: an effective reconstruction technique following primary distal femoral bone tumor resection. A 136-case multi-center series**

Mattei J.C., Chapat B., Ferembach B., Le Nail L.R., Crenn V., Bizzozero P., Venton G., Kerzoncuf M., Loundnou A., Backstein D., Alshaygy I., Griffin A., Wunder J., Biau D., Gouin F., Rosset P., Rochwerger A.

Orthopaedics and Traumatology: Surgery and Research, 2019

• **Partial two-staged revision for infected tumor prostheses of the knee**

J.C. Mattei, I. Mansour A., J. Visgaus, A. Griffin, P. Ferguson, J. Wunder

Soumis dans JBJS

• **Bone metastases in sarcoma: is there any place for curative surgery?**

J.C. Mattei, I. Alshaygy, G. Basile, A. Griffin, P. Ferguson, J. Wunder

Soumis dans JBJS

• **Outcomes after vascular reconstruction after sarcoma resection**

J.C. Mattei, Julia Visgaus, Curtis Wood, I. Alshaygy, G. Basile, A. Griffin, Thomas Lindsay, J. Wunder, P. Ferguson

Soumis dans Journal of Surgical Oncology

• **Is regular follow-up required after margin negative resection of dermatofibrosarcoma protuberans?**

I. Alshaygy, J.C. Mattei, G. Basile, A. Griffin, P. Ferguson, J. Wunder

Soumis dans Cancer

• **Revision rates for megaprotheses: a updated review of the literature and meta-analysis**

Jean-Camille Mattei, Arnaud Felden, Philippe Anract, David Biau

Soumis dans Cancer

• **Post radiation pathologic femur fractures in soft tissue sarcomas: is endoprosthetic reconstruction is a good option?**

Ibrahim Alshaygy, Jean-Camille Mattei, Georges Basile, Anthony Griffin, Peter Ferguson, Jay Wunder

Soumis dans JBJS

• **Lymph node metastasis from extremity soft tissue sarcomas**

G. Basile, J.C. Mattei, I. Alshaygy, A. Griffin, P. Ferguson, J. Wunder

Reviewing par Pr Wunder & Ferguson

• **Navigated extremity sarcoma resection: accuracy and reproductibility using a novel fluoroscopy based registration technique for joint sparing bone cuts**

Ibrahim S. Alshaygy, Jean-Camille Mattei, Georges Basile, Anthony Griffin, Xun Lin, Peter Ferguson, Jay Wunder

Reviewing par Pr Wunder & Ferguson

• **Myxoid liposarcoma: prospective study on 153 cases: what is the best work-up scheme?**

Julia Visgaus, J.C. Mattei, I. Alshaygy, G. Basile, A. Griffin, J. Wunder, P. Ferguson

Reviewing par Pr Wunder & Ferguson

• **Genetics and epigenetics of dedifferentiated liposarcoma**

Étude en cours, en lien avec le groupe sarcome français et Toronto dont le recrutement vient de se terminer et visant à expliquer les raisons de la dédifférenciation de ces tumeurs et détecter des cibles thérapeutiques contre ce sous-type agressif de liposarcomes.



Les Dr Wunder et Ferguson, le Dr Griffin, mes co-fellows et moi... et leurs épouses, congrès de l'AAOS 2019

## BOURSE SOFCOT

## Bourse de recherche sur les sarcomes à Montréal

Université McGill, Montréal, Canada

Par **Antoine CHALOPIN**, Nantes, Boursier SOFCOT session juin 2018

Il n'est pas toujours évident de savoir où réaliser une année de mobilité à l'étranger. J'ai, par chance, bénéficié des connaissances et du réseau professionnel du Professeur Jean Dubouset et mon choix a été de postuler à l'université McGill pour travailler aux côtés du Dr Robert Turcotte. J'ai eu l'immense privilège de saisir cette opportunité et de voir mon dossier accepté grâce aux soutiens du Professeur François Gouin et du Professeur Antoine Hamel et bien évidemment de celui de la SOFCOT. J'ai donc rencontré le Dr Robert Turcotte lors du congrès de la SOFCOT 2017 et nous avons pu élaborer le projet et les objectifs de cette année de fellowship alliant une dimension clinique et de recherche dans le domaine des sarcomes adultes et pédiatriques. Une fois les formalités administratives, parfois très exigeantes, complétées, je me suis donc expatrié en famille le 1<sup>er</sup> janvier 2019 à Montréal et pour une année pleine.

## Université McGill

L'université McGill est l'un des établissements d'enseignement supérieur les plus prestigieux du Canada. Cette université est réputée pour l'excellence de ses programmes d'enseignement et de recherche. Plusieurs grands médecins sont issus de McGill dont Sir William Osler (1849-1919) ou encore Wilder Penfield (1891-1976). Si la Faculté de médecine est compétitive sur la scène internationale, il en va de même de nombreux autres volets des programmes d'enseignement et de recherche à McGill.

## Activité clinique

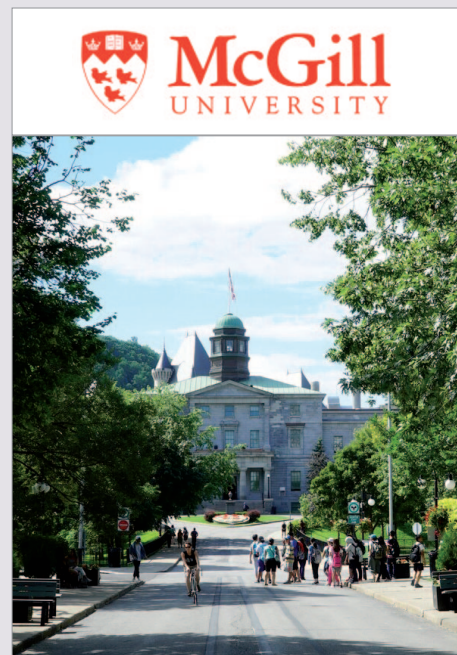
J'ai débuté mon fellowship aux côtés du Dr Robert Turcotte, directeur médical du programme sur les sarcomes du Centre Universitaire de Santé McGill (CUSM). Il a effectué un fellowship à la Mayo Clinic (Rochester,

Minnesota, USA) en 1989 mais également à l'hôpital Cochin à Paris en 1988, dont il garde un très bon souvenir. Il utilise le *French Paradox* depuis 30 ans. Il a débuté sa carrière à l'hôpital Maisonneuve, francophone avant de devenir, il y a peu, le chef de service du département d'orthopédie de McGill. Son expertise dans les sarcomes est reconnue dans tout le Canada et au-delà.

J'ai intégré son équipe au Centre du Cancer des Cèdres. L'équipe comprend un chirurgien, un oncologue médical, des radio-oncologues et des infirmières dont une infirmière pivot chargée de faire le lien entre le patient et les différents intervenants de l'équipe. Les consultations ont lieu le lundi et le jeudi sur le site Glen inauguré en 2015. Je voyais les patients seul puis accompagné du Dr Turcotte. L'organisation de la consultation était parfaitement adaptée au suivi des patients à long terme mais aussi aux nouveaux patients. Les examens tels que les scanners ou les IRM étaient facilement accessibles en journée. Un assistant de recherche colligeait également les scores de qualité de vie (TESS ou MSTs) directement enregistrés dans la base de



Site Glen du Centre Universitaire de Santé McGill



données des sarcomes. Les consultations de pédiatrie se déroulaient sur le même site un jeudi après-midi par mois. Un « tumor board » était organisé tous les vendredi matin à 7h30 avec toute l'équipe en collaboration avec d'autres hôpitaux de la province.

Voici le lien d'un petit film tourné à l'occasion d'une levée de fonds décrivant le fonctionnement de l'équipe sarcome de McGill (<https://vimeo.com/337606453>). Ce mode de financement, également présent aux États-Unis, est très développé et courant. L'utilisation de ces fonds est parfaitement encadrée et contribue activement à l'aboutissement de nombreux projets de recherche.

Les journées de blocs opératoires étaient le mardi et certains mercredis en fonction des vacances accordées au Dr Turcotte. Le bloc opératoire était situé à l'hôpital général de Montréal dans le centre-ville. Le programme commençait à 7h30 avec le time-out entre le chirurgien, l'anesthésiste et l'infirmière. Cette check-list est le préalable obligatoire à l'entrée du patient en salle et au début de l'induction. L'organisation en salle était assez

semblable à celle que je connaissais en France. Toutefois, il est important de savoir que les chirurgiens sont rémunérés à l'acte comme dans notre système libéral. Il existe donc un système de code pour chaque intervention ([http://www.ramq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/professionnels/manuels/150-facturation-specialistes/017\\_g\\_musculo\\_squel\\_acte\\_spec.pdf](http://www.ramq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/professionnels/manuels/150-facturation-specialistes/017_g_musculo_squel_acte_spec.pdf)).

Les chirurgiens sont ensuite rémunérés tous les 15 jours par la RAMQ (équivalent de la CPAM). Les contraintes de fonctionnement sont semblables à celles auxquelles nous sommes également confrontés en France, en particulier les problèmes de lits... Il n'est pas rare de devoir annuler des interventions faute de place ! Les chirurgiens doivent également tenir compte des budgets alloués aux dispositifs médicaux tels que les prothèses, limitant ainsi le nombre d'interventions et augmentant le délai d'attente. En chirurgie oncologique, il est aussi parfois obligatoire de soumettre un dossier à l'organisme « Health Canada » pour valider l'utilisation de dispositifs sur mesure tels que des prothèses d'allongement ou des implants sur mesure.

Nous étions également amenés à prendre en charge des patients du nord du Québec (parfois à 9 heures de route de Montréal) ou d'autres provinces du Canada, compliquant l'élaboration des programmes opératoires ! Il y avait aussi des journées opératoires dédiées à l'ambulatoire sur deux autres sites de Montréal.

Les programmes étaient variés et composés de sarcomes des tissus mous, de sarcomes osseux et de tumeurs bénignes. J'ai énormément appris aux côtés du Dr Turcotte sur l'exigence chirurgicale de la résection tumorale mais également sur le versant de la reconstruction. Son expérience est impressionnante et l'auto-critique est permanente. Ce concept de « feed-back » est omniprésent et son rôle pédagogique me semble majeur. Ces temps de discussion avec le Dr Turcotte, les fellows et les résidents ont été particulièrement enrichissants ; pourquoi choisir cette voie d'abord, ce type d'implant, comment aurions-nous pu mieux faire (positionnement, cimentation des implants, marges...) ? Nous avons régulièrement des bibliographies ou des révisions d'articles à faire.

Concernant les résidents, ils changeaient tous les mois selon un système de rotation bien encadré. Tous les jeudis matin se tenait



Hôpital Général de Montréal

un « Grand Rounds » avec une conférence magistrale de 7h à 8h suivi de cours pour les résidents qui étaient absents des activités cliniques toute la matinée, les « fellows » se chargeant de les remplacer pendant leur absence.

Chirurgien orthopédiste pédiatre de formation, j'ai été particulièrement marqué par la prise en charge des enfants au sein de l'hôpital pédiatrique. Un de mes dossiers les plus marquants a été celui d'une jeune fille de 13 ans originaire des Philippines, récemment immigrée au Québec, opérée il y a trois ans dans son pays d'un ostéosarcome du fémur distal pour lequel une arthrodèse temporaire réalisée à l'aide d'un spacer armé sur clou avait été réalisée dans l'attente d'une rémission complète avant d'envisager la pose d'un implant... J'ai donc été chargé par le Dr Turcotte de commander un implant de croissance sur mesure et nous avons procédé à l'intervention en vue de lui redonner de la flexion du genou et de la longueur. Voici les images pré- et post-opératoires.

### Activité de recherche

En 2016, un fonds de recherche de quatre millions de dollars a été alloué pour la recherche sur les sarcomes. Ce nouveau fonds devait contribuer à aider des chercheurs, à mieux comprendre les sarcomes, la raison et les mécanismes de sa propagation ainsi que les manières d'améliorer les soins et les traitements des patients. Ce département de recherche est dirigé par le Dr Livia Garzia, détentrice d'un doctorat en sciences de la vie de l'université Open de Cambridge, au Royaume-Uni. Elle a travaillé au SickKids de Toronto entre 2008 et 2016.

En plus de mon activité, j'ai donc pu intégrer son équipe de recherche. En partenariat avec un chirurgien orthopédiste japonais réalisant un post-doctorat, le Dr Takeaki Ishii, j'ai travaillé sur l'intérêt du CD47 dans les sarcomes osseux. Cette immunothérapie a déjà montré des résultats encourageants dans les tumeurs cérébrales pédiatriques. J'ai donc commencé des expérimentations *in vitro* afin de m'assurer que les lignées cellulaires de sarcomes d'Ewing disponibles au laboratoire exprimaient le CD47, le tout grâce à la cytométrie en flux. Une fois confirmé, j'ai donc pu débiter les expérimentations *in vivo* sur la souris après injection para-tibiale des différentes lignées cellulaires et traitement par un anticorps anti-CD47. Les résultats sont toujours en cours d'interprétation. J'ai pu bénéficier d'un plateau technique très innovant et extrêmement bien organisé.

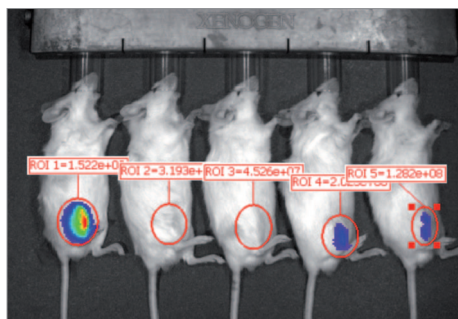


Radiographies pré- et post-opératoires

Nous avons une réunion hebdomadaire avec le Dr Garzia pour discuter des avancées des différents projets. J'ai été impressionné par l'aspect translationnel de l'activité du laboratoire. Des prélèvements sanguins et des échantillons de tous les sarcomes opérés dans le service étaient transmis au laboratoire pour être analysés, répertoriés et congelés en vue d'être utilisés dans les projets en



Atrium du centre de recherche



Bioluminescence pour s'assurer du développement de la tumeur



Paillasse

cours ou futurs ou permettre d'élaborer des thérapies ciblées propres à chaque tumeur, en fonction de son profil génétique. Cette expérience au sein du laboratoire me conforte dans l'idée de poursuivre mes travaux de recherche portant sur les cellules tumorales circulantes d'ostéosarcome et de poursuivre une collaboration future avec l'unité de recherche du Dr Garzia après mon retour.

## Expérience personnelle à Montréal

Cette année a aussi été l'occasion pour moi de découvrir Montréal et le Québec avec ma femme et nos deux enfants. Nous avons eu l'immense joie de voir naître notre troisième enfant ici ! Nous avons la chance de vivre dans une maison typiquement montréalaise où la nature reste omniprésente. Nous avons pu explorer quelques recoins du Québec, grand comme trois fois la France, en hiver comme en été. Nous avons vraiment été bien accueillis et nul doute que la bienveillance des québécois tout comme leur accent nous manqueront !

## Remerciements

Je remercie la SOFCOT et la SOFOP de m'avoir permis de réaliser cette année de mobilité grâce à leur contribution financière.

Je remercie particulièrement le Docteur Robert Turcotte pour son accueil et pour la confiance qu'il m'a accordé. J'ai énormément appris à ses côtés, grâce à son expérience et son expertise uniques dans le domaine des sarcomes.

Je remercie, enfin, le Professeur Jean Dubouset de m'avoir permis de saisir cette opportunité ainsi que le Professeur Antoine Hamel de m'avoir libéré de mes obligations hospitalières durant cette année.

Je recommande vivement ce fellowship pour les années à venir à d'autres candidats.

**Antoine CHALOPIN**  
[toniochalopin@yahoo.fr](mailto:toniochalopin@yahoo.fr)

## Travaux en cours

• *Soumission d'abstract pour le Congrès de l'Association Canadienne d'Orthopédie (ACO) à Halifax en juin 2020*

*Outcomes following endoprosthetic replacement with cemented stems for proximal tibia tumor*  
Chalopin A, Turcotte R.

• *Soumission d'abstract pour le Congrès de l'European MusculoSkeletal Oncology Society (EMSOS) à Graz en Autriche en mai 2020*

*Outcomes following endoprosthetic replacement with cemented stems for proximal tibia tumor*  
Chalopin A, Tayara B, Nooh A, Turcotte R.

• *Articles en cours*

*Outcomes following endoprosthetic replacement with cemented stems for proximal tibia tumor*  
Chalopin A, Tayara B, Nooh A, Turcotte R

*Immune micro environment regulation of metastatic dissemination and therapeutic response in high-risk pediatric and young adults Ewing Sarcoma*  
Chalopin A, Ishii T, Turcotte R, Garzia L



Le Dr Robert Turcotte et moi-même



Notre maison