



ROYAUME DU MAROC
UNIVERSITE MOHAMMED V DE RABAT
FACULTE DE MEDECINE
ET DE PHARMACIE
RABAT



Année: 2023

Thèse N°: 115

L'impression 3d en chirurgie maxillo-faciale

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement le : / /2023

PAR

Madame Jihad AARAB
Née le 04 Juillet 1996 à Rabat

Pour l'Obtention du Diplôme de
Docteur en Médecine

Mots Clés : Impression 3D, Bio modèle, Chirurgie maxillo-faciale,
Dispositif médical

Membres du Jury :

Monsieur Mohamed Karim EL KHATIB

Professeur de Stomatologie et Chirurgie Maxillo-faciale

Monsieur Lahcen KHALFI

Professeur de Stomatologie et Chirurgie Maxillo-Faciale

Monsieur Jawad HAFIDI

Professeur de Chirurgie Réparatrice et Plastique

Monsieur Jalal HAMAMA

Professeur de Stomatologie et Chirurgie Maxillo-faciale

Monsieur Abdelhafid ACHBOUK

Professeur de Chirurgie Réparatrice et Plastique

Président du jury

Directeur de thèse

Juge

Juge

Juge

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿ قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا عَلَّمْتَنَا إِنَّكَ أَنْتَ
الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ ﴾ ﴿٣٢﴾

[سُورَةُ الْبَقَرَةِ: ٣٢]

صِدْقُ اللَّهِ الْعَظِيمِ



**UNIVERSITE MOHAMMED V
FACULTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE
RABAT**

DOYENS HONORAIRES :

1962 – 1969 : Professeur Abdelmalek FARAJ
1969 – 1974 : Professeur Abdellatif BERBICH
1974 – 1981 : Professeur Bachir LAZRAK
1981 – 1989 : Professeur Taieb CHKILI
1989 – 1997 : Professeur Mohamed Tahar ALAOUI
1997 – 2003 : Professeur Abdelmajid BELMAHI
2003 - 2013 : Professeur Najia HAJJAJ – HASSOUNI

ORGANISATION DÉCANALE :

Doyen

Professeur Mohamed ADNAOUI

Vice-Doyen chargé des Affaires Académiques et estudiantines

Professeur Brahim LEKEHAL

Vice-Doyen chargé de la Recherche et de la Coopération

Professeur Taoufiq DAKKA

Vice-Doyen chargé des Affaires Spécifiques à la Pharmacie

Professeur Younes RAHALI

Secrétaire Général : Mr. Mohamed KARRA

SERVICES ADMINISTRATIFS :

Chef du Service des Affaires Administratives

Mr. Abdellah KHALED

Chef du Service des Affaires Estudiantines, Statistiques et Suivi des Lauréats

Mr. Azzeddine BOULAAJOU

Chef du Service de la Recherche, Coopération, Partenariat et des Stages

Mr. Najib MOUNIR

Chef du service des Finances

Mr. Rachid BENNIS

****Enseignant militaire***

1 - ENSEIGNANTS-CHERCHEURS MEDECINS ET PHARMACIENS

PROFESSEURS DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR :

Décembre 1984

Pr. MAAOUNI Abdelaziz
Pr. MAAZOUZI Ahmed Wajdi
Pr. SETTAF Abdellatif

Médecine interne – Clinique Royale
Anesthésie -Réanimation
Pathologie Chirurgicale

Décembre 1989

Pr. ADNAOUI Mohamed

Médecine interne – Doyen de la FMPR

Janvier et Novembre 1990

Pr. KHARBACH Aïcha
Pr. TAZI Saoud Anas

Gynécologie -Obstétrique
Anesthésie Réanimation

Février Avril Juillet et Décembre 1991

Pr. AZZOUZI Abderrahim
Pr. BAYAHIA Rabéa
Pr. BELKOUCHI Abdelkader
Pr. BENSOU DA Yahia
Pr. BERRAHO Amina
Pr. BEZAD Rachid

Anesthésie Réanimation
Néphrologie
Chirurgie Générale
Pharmacie galénique
Ophtalmologie
Gynécologie Obstétrique Méd. Chef Mat.

Orangers Rabat

Pr. CHERRAH Yahia
Pr. CHOKAIRI Omar
Pr. SOULAYMANI Rachida

Pharmacologie
Histologie Embryologie
Pharmacologie- Dir. du Centre National

PV Rabat

Décembre 1992

Pr. AHALLAT Mohamed
Pr. BENSOU DA Adil
Pr. EL OUAHABI Abdessamad
Pr. FELLAT Rokaya
Pr. JIDDANE Mohamed
Pr. ZOUHDI Mimoun

Chirurgie Générale Doyen FMPT
Anesthésie Réanimation
Neurochirurgie
Cardiologie
Anatomie
Microbiologie

Mars 1994

Pr. BENJAAFAR Noureddine
Pr. BEN RAIS Nozha
Pr. CAOUI Malika
Pr. CHRAIBI Abdelmjid

Radiothérapie
Biophysique
Biophysique
Endocrinologie et Maladies Métaboliques

Doyen FMPA

Pr. EL AMRANI Sabah
Pr. ERROUGANI Abdelkader
Pr. ESSAKALI Malika
Pr. ETTAYEBI Fouad
Pr. IFRINE Lahssan
Pr. RHRAB Brahim
Pr. SENOUCI Karima

Gynécologie Obstétrique
Chirurgie Générale– Dir. du CHIS Rabat
Immunologie
Chirurgie Pédiatrique
Chirurgie Générale
Gynécologie –Obstétrique
Dermatologie

Mars 1994

Pr. ABBAR Mohamed*
Pr. BENTAHILA Abdelali

Urologie Inspecteur du SSM
Pédiatrie

**Enseignant militaire*

Pr. BERRADA Mohamed Saleh
Pr. CHERKAOUI Lalla Ouafae
Pr. LAKHDAR Amina
Pr. MOUANE Nezha

Mars 1995

Pr. ABOUQUAL Redouane
Pr. AMRAOUI Mohamed
Pr. BAIDADA Abdelaziz
Pr. BARGACH Samir
Pr. EL MESNAOUI Abbes
Pr. ESSAKALI HOUSSYNI Leila
Pr. IBEN ATTYA ANDALOUSSI Ahmed
Pr. OUAZZANI CHAHDI Bahia
Pr. SEFIANI Abdelaziz
Pr. ZEGGWAGH Amine Ali

Décembre 1996

Pr. BELKACEM Rachid
Pr. BOULANOUAR Abdelkrim
Pr. EL ALAMI EL FARICHA EL Hassan
Pr. GAOUZI Ahmed
Pr. OUZEDDOUN Naima
Pr. ZBIR EL Mehdi*

Rabat

Novembre 1997

Pr. ALAMI Mohamed Hassan
Pr. BIROUK Nazha
Pr. FELLAT Nadia
Pr. KADDOURI Noureddine
Pr. KOUTANI Abdellatif
Pr. LAHLOU Mohamed Khalid
Pr. MAHRAOUI CHAFIQ
Pr. TOUFIQ Jallal
Pr. YOUSFI MALKI Mounia

Novembre 1998

Pr. BENOMAR ALI

Rabat

Pr. BOUGTAB Abdesslam
Pr. ER RIHANI Hassan
Pr. BENKIRANE Majid*

Janvier 2000

Pr. ABID Ahmed*
Pr. AIT OUAMAR Hassan
Pr. BENJELLOUN Dakhama Badr Sououd
Pr. BOURKADI Jamal-Eddine
Pr. CHARIF CHEFCHAOUNI Al Montacer
Pr. ECHARRAB El Mahjoub
Pr. EL FTOUH Mustapha
Pr. EL MOSTARCHID Brahim*

****Enseignant militaire***

Traumatologie – Orthopédie
Ophtalmologie
Gynécologie Obstétrique
Pédiatrie

Réanimation Médicale
Chirurgie Générale
Gynécologie Obstétrique
Gynécologie Obstétrique
Chirurgie Générale
Oto-Rhino-Laryngologie
Urologie
Ophtalmologie
Génétique
Réanimation Médicale

Chirurgie Pédiatrie
Ophtalmologie
Chirurgie Générale
Pédiatrie
Néphrologie
Cardiologie [Dir. HMI Mohammed V](#)

Gynécologie-Obstétrique
Ne Urologie
Cardiologie
Chirurgie Pédiatrique
Urologie
Chirurgie Générale
Pédiatrie
Psychiatrie [Dir. Hôp.Ar-razi Salé](#)
Gynécologie Obstétrique

Neurologie [Doyen de la FMP Abulcassis](#)

Chirurgie Générale
Oncologie Médicale
Hématologie

Pneumo-ptisiologie
Pédiatrie
Pédiatrie
Pneumo-ptisiologie
Chirurgie Générale
Chirurgie Générale
Pneumo-ptisiologie
Neurochirurgie

Pr. TACHINANTE Rajae
Pr. TAZI MEZALEK Zoubida

Anesthésie-Réanimation
Médecine interne

Novembre 2000

Pr. AIDI Saadia
Pr. AJANA Fatima Zohra
Pr. BENAMR Said
Pr. CHERTI Mohammed
Pr. ECH-CHERIF EL KETTANI Selma
Pr. EL HASSANI Amine
Pr. EL KHADER Khalid
Pr. GHARBI Mohamed El Hassan
Pr. MDAGHRI ALAOUI Asmae

Ne Urologie
Gastro-Entérologie
Chirurgie Générale
Cardiologie
Anesthésie-Réanimation
Pédiatrie - [Dir. Hôp. Cheikh Zaid Rabat](#)
Urologie
Endocrinologie et Maladies Métaboliques
Pédiatrie

Décembre 2001

Pr. BALKHI Hicham*
Pr. BENABDELJLIL Maria
Pr. BENAMAR Loubna
Pr. BENAMOR Jouda
Pr. BENELBARHDADI Imane
Pr. BENNANI Rajae
Pr. BENOUACHANE Thami
Pr. BEZZA Ahmed*
Pr. BOUCHIKHI IDRISSE Med Larbi
Pr. BOUMDIN El Hassane*
Pr. CHAT Latifa
Pr. EL HIJRI Ahmed
Pr. EL MAAQILI Moulay Rachid
Pr. EL MADHI Tarik

Anesthésie-Réanimation
Ne Urologie
Néphrologie
Pneumo-physiologie
Gastro-Entérologie
Cardiologie
Pédiatrie
Rhumatologie
Anatomie
Radiologie
Radiologie
Anesthésie-Réanimation
Neuro-chirurgie
Chirurgie-Pédiatrique [Dir. Hôp. Des Enfants Rabat](#)
Chirurgie Générale
Pédiatrie -
Neuro-chirurgie
Chirurgie Générale [Dir. Hôpital Ibn Sina Rabat](#)
Chirurgie Thoracique
Traumatologie Orthopédie
Chirurgie Vasculaire Périphérique **V-D.**
Aff Acad. Est.
Chirurgie Générale
Chirurgie Générale
Urologie
Chirurgie Générale
Chirurgie Vasculaire Périphérique
Pédiatrie

Pr. EL OUNANI Mohamed
Pr. ETTAIR Said
Pr. GAZZAZ Miloudi*
Pr. HRORA Abdelmalek

Pr. KABIRI EL Hassane*
Pr. LAMRANI Moulay Omar
Pr. LEKEHAL Brahim

Pr. MEDARHRI Jalil
Pr. MOHSINE Raouf
Pr. NOUINI Yassine
Pr. SABBABH Farid
Pr. SEFIANI Yasser
Pr. TAOUFIQ BENCHEKROUN Soumia

Décembre 2002

Pr. AMEUR Ahmed*
Pr. AMRI Rachida
Pr. AOURARH Aziz*

Pr. BAMOU Youssef*
Pr. BELMEJDOUB Ghizlene*
Pr. BENZEKRI Laila

Urologie
Cardiologie
Gastro-Entérologie [Dir. HMI Moulaya Ismail-Meknès](#)
Biochimie-Chimie
Endocrinologie et Maladies Métaboliques
Dermatologie

****Enseignant militaire***

Pr. BENZZOUBEIR Nadia
Pr. BERNOUSSI Zakiya
Pr. CHOHO Abdelkrim*
Pr. CHKIRATE Bouchra
Pr. EL ALAMI EL Fellous Sidi Zouhair
Pr. FILALI ADIB Abdelhai
Pr. HAJJI Zakia
Pr. KRIOUILE Yamina
Pr. OUJILAL Abdelilah
Pr. RAISS Mohamed
Pr. THIMOU Amal
Pr. ZENTAR Aziz*

Janvier 2004

Pr. ABDELLAH El Hassan
Pr. AMRANI Mariam
Pr. BENBOUZID Mohammed Anas
Pr. BENKIRANE Ahmed*
Pr. BOULAADAS Malik

Pr. BOURAZZA Ahmed*
Pr. CHAGAR Belkacem*
Pr. CHERRADI Nadia
Pr. EL FENNI Jamal*
Pr. EL HANCHI ZAKI
Pr. EL KHORASSANI Mohamed
Pr. HACHI Hafid
Pr. JABOUIRIK Fatima
Pr. KHARMAZ Mohamed
Pr. MOUGHIL Said
Pr. OUBAAZ Abdelbarre*
Pr. TARIB Abdelilah*
Pr. TIJAMI Fouad
Pr. ZARZUR Jamila

Janvier 2005

Pr. ABBASSI Abdellah
Pr. AL KANDRY Sif Eddine*
Pr. ALLALI Fadoua
Pr. AMAZOUZI Abdellah
Pr. BAHIRI Rachid
Pr. BARKAT Amina
Pr. BENYASS Aatif*
Pr. DOUDOUH Abderrahim*
Pr. HESSISSEN Leila
Pr. JIDAL Mohamed*
Pr. LAAROUSSI Mohamed
Pr. LYAGOUBI Mohammed
Pr. SBIHI Souad
Pr. ZERAIDI Najia

AVRIL 2006

Pr. ACHEMLAL Lahsen*
Pr. BELMEKKI Abdelkader*

****Enseignant militaire***

Gastro-Entérologie
Anatomie Pathologique
Chirurgie Générale
Pédiatrie
Chirurgie Pédiatrique
Gynécologie Obstétrique
Ophtalmologie
Pédiatrie
Oto-Rhino-Laryngologie
Chirurgie Générale
Pédiatrie
Chirurgie Générale [Dir. de l' ERPPLM](#)

Ophtalmologie
Anatomie Pathologique
Oto-Rhino-Laryngologie
Gastro-Entérologie
Stomatologie et Chirurgie Maxillo-faciale

Ne Urologie
Traumatologie Orthopédie
Anatomie Pathologique
Radiologie
Gynécologie Obstétrique
Pédiatrie
Chirurgie Générale
Pédiatrie
Traumatologie Orthopédie
Chirurgie Cardio-Vasculaire
Ophtalmologie
Pharmacie Clinique
Chirurgie Générale
Cardiologie

Chirurgie réparatrice et plastique
Chirurgie Générale
Rhumatologie
Ophtalmologie
Rhumatologie [Dir. Hôp. Al Ayachi Salé](#)
Pédiatrie
Cardiologie
Biophysique
Pédiatrie
Radiologie
Chirurgie Cardio-vasculaire
Parasitologie
Histo-Embryologie Cytogénétique
Gynécologie Obstétrique

Rhumatologie
Hématologie

Pr. BENCHEIKH Razika
Pr. BOUHAFS Mohamed El Amine
Pr. BOULAHYA Abdellatif*

Pr. CHENGUETI ANSARI Anas
Pr. DOGHMI Nawal
Pr. FELLAT Ibtissam
Pr. FAROUDY Mamoun
Pr. HARMOUCHE Hicham
Pr. IDRIS LAHLOU Amine*
Pr. JROUNDI Laila
Pr. KARMOUNI Tariq
Pr. KILI Amina
Pr. KISRA Hassan
Pr. KISRA Mounir
Pr. LAATIRIS Abdelkader*
Pr. LMIMOUNI Badreddine*
Pr. MANSOURI Hamid*
Pr. OUANASS Abderrazzak
Pr. SAFI Soumaya*
Pr. SOUALHI Mouna
Pr. TELLAL Saida*
Pr. ZAHRAOUI Rachida

Octobre 2007

Pr. ABIDI Khalid
Pr. ACHACHI Leila
Pr. AMHAJJI Larbi*
Pr. AOUFI Sarra
Pr. BAITE Abdelouahed*
Pr. BALOUCH Lhousaine*
Pr. BENZIANE Hamid*
Pr. BOUTIMZINE Nouridine
Pr. CHERKAOUI Naoual*
Pr. EL BEKKALI Youssef*
Pr. EL ABSI Mohamed
Pr. EL MOUSSAOUI Rachid
Pr. EL OMARI Fatima
Pr. GHARIB Noureddine
Pr. HADADI Khalid*
Pr. ICHOU Mohamed*
Pr. ISMAILI Nadia
Pr. KEBDANI Tayeb
Pr. LOUZI Lhoussain*
Pr. MADANI Naoufel
Pr. MARC Karima
Pr. MASRAR Azlarab
Pr. OUZZIF Ez zohra*
Pr. SEFFAR Myriame
Pr. SEKHSOKH Yessine*
Pr. SIFAT Hassan*
Pr. TACHFOUTI Samira
Pr. TAJDINE Mohammed Tariq*
Pr. TANANE Mansour*

****Enseignant militaire***

O.R.L
Chirurgie - Pédiatrique
Chirurgie Cardio – Vasculaire. *Dir. Hôp. Ibn Sina Marr.*
Gynécologie Obstétrique
Cardiologie
Cardiologie
Anesthésie Réanimation
Médecine interne
Microbiologie
Radiologie
Urologie
Pédiatrie
Psychiatrie
Chirurgie – Pédiatrique
Pharmacie Galénique
Parasitologie
Radiothérapie
Psychiatrie
Endocrinologie
Pneumo – Phtisiologie
Biochimie
Pneumo – Phtisiologie

Réanimation médicale
Pneumo phtisiologie
Traumatologie orthopédie
Parasitologie
Anesthésie réanimation
Biochimie-Chimie
Pharmacie Clinique
Ophtalmologie
Pharmacie galénique
Chirurgie cardio-vasculaire
Chirurgie Générale
Anesthésie réanimation
Psychiatrie
Chirurgie plastique et réparatrice
Radiothérapie
Oncologie Médicale
Dermatologie
Radiothérapie
Microbiologie
Réanimation médicale
Pneumo phtisiologie
Hématologie biologique
Biochimie-Chimie
Microbiologie
Microbiologie
Radiothérapie
Ophtalmologie
Chirurgie Générale
Traumatologie-Orthopédie

Pr. TLIGUI Houssain
Pr. TOUATI Zakia

Mars 2009

Pr. ABOUZAHIR Ali*
Pr. AGADR Aomar*
Pr. AIT ALI Abdelmounaim*
Pr. AKHADDAR Ali*
Pr. ALLALI Nazik
Pr. AMINE Bouchra
Pr. ARKHA Yassir

Rabat

Pr. BELYAMANI Lahcen*
Pr. BJIJOU Younes
Pr. BOUHSAIN Sanae*
Pr. BOUI Mohammed*
Pr. BOUNAIM Ahmed*
Pr. BOUSSOUGA Mostapha*
Pr. CHTATA Hassan Toufik*
Pr. DOGHMI Kamal*
Pr. EL MALKI Hadj Omar
Pr. EL OUENNASS Mostapha*
Pr. ENNIBI Khalid*
Pr. FATHI Khalid
Pr. HASSIKOU Hasna*
Pr. KABBAJ Nawal
Pr. KABIRI Meryem
Pr. KARBOUBI Lamyia
Pr. LAMSAOURI Jamal*
Pr. MARMADE Lahcen
Pr. MESKINI Toufik
Pr. MSSROURI Rahal
Pr. NASSAR Ittimade
Pr. OUKERRAJ Latifa
Pr. RHORFI Ismail Abderrahmani*

Mars 2010

Pr. Karim FILALI *

Octobre 2010

Pr. ALILOU Mustapha
Pr. AMEZIANE Taoufiq*
Pr. BELAGUID Abdelaziz
Pr. CHADLI Mariama*
Pr. CHEMSI Mohamed*
Pr. DAMI Abdellah*
Pr. DENDANE Mohammed Anouar
Pr. EL HAFIDI Naima
Pr. EL KHARRAS Abdennasser*
Pr. EL MAZOUZ Samir
Pr. EL SAYEGH Hachem
Pr. ERRABIH Ikram
Pr. LAMALMI Najat

****Enseignant militaire***

Parasitologie
Cardiologie

Médecine interne
Pédiatrie
Chirurgie Générale
Neuro-chirurgie
Radiologie
Rhumatologie
Neuro-chirurgie [Dir. Hôp. Spécialités](#)

Anesthésie Réanimation
Anatomie
Biochimie-Chimie
Dermatologie
Chirurgie Générale
Traumatologie-Orthopédie
Chirurgie Vasculaire Périphérique
Hématologie clinique
Chirurgie Générale
Microbiologie
Médecine interne
Gynécologie obstétrique
Rhumatologie
Gastro-entérologie
Pédiatrie
Pédiatrie
Chimie Thérapeutique
Chirurgie Cardio-vasculaire
Pédiatrie
Chirurgie Générale
Radiologie
Cardiologie
Pneumo-Phtisiologie

Anesthésie réanimation [Directeur de l'Ecole Royale du Service de Santé Militaire](#)

Anesthésie réanimation
Médecine interne
Physiologie
Microbiologie
Médecine Aéronautique
Biochimie- Chimie
Chirurgie Pédiatrique
Pédiatrie
Radiologie
Chirurgie Plastique et Réparatrice
Urologie
Gastro-Entérologie
Anatomie Pathologique

Pr. MOSADIK Ahlam
Pr. MOUJAHID Mountassir*
Pr. ZOUAIDIA Fouad

Anesthésie Réanimation
Chirurgie Générale
Anatomie Pathologique

Decembre 2010

Pr. ZNATI Kaoutar

Anatomie Pathologique

Mai 2012

Pr. AMRANI Abdelouahed
Pr. ABOUELALAA Khalil*
Pr. BENCHEBBA Driss*
Pr. DRISSI Mohamed*
Pr. EL ALAOU MHAMDI Mouna
Pr. EL OUAZZANI Hanane*
Pr. ER-RAJI Mounir Chirurgie
Pr. JAHID Ahmed

Chirurgie Pédiatrique
Anesthésie Réanimation
Traumatologie-Orthopédie
Anesthésie Réanimation
Chirurgie Générale
Pneumophtisiologie
Pédiatrique
Anatomie Pathologique

Février 2013

Pr. AHID Samir
Pr. AIT EL CADI Mina
Pr. AMRANI HANCHI Laila
Pr. AMOR Mourad
Pr. AWAB Almahdi
Pr. BELAYACHI Jihane
Pr. BELKHADIR Zakaria Houssain
Pr. BENCHEKROUN Laila
Pr. BENKIRANE Souad
Pr. BENSghir Mustapha*
Pr. BENYAHIA Mohammed*
Pr. BOUATIA Mustapha
Pr. BOUABID Ahmed Salim*
Pr. BOUTARBOUCH Mahjoub
Pr. CHAIB Ali*
Pr. DENDANE Tarek
Pr. DINI Nouzha*
Pr. ECH-CHERIF EL KETTANI Mohamed Ali
Pr. ECH-CHERIF EL KETTANI Najwa
Pr. ELFATEMI NIZARE
Pr. EL GUERROUJ Hasnae
Pr. EL HARTI Jaouad
Pr. EL JAOUDI Rachid*
Pr. EL KABABRI Maria
Pr. EL KHANNOUSSI Basma
Pr. EL KHLOUFI Samir
Pr. EL KORAICHI Alae
Pr. EN-NOUALI Hassane*
Pr. ERREGUIG Laila
Pr. FIKRI Meryem
Pr. GHFIR Imade
Pr. IMANE Zineb
Pr. IRAQI Hind
Pr. KABBAJ Hakima
Pr. KADIRI Mohamed*
Pr. LATIB Rachida

Pharmacologie *Doyen FP de l'UM6SS*
Toxicologie
Gastro-Entérologie
Anesthésie-Réanimation
Anesthésie-Réanimation
Réanimation Médicale
Anesthésie-Réanimation
Biochimie-Chimie
Hématologie
Anesthésie Réanimation
Néphrologie
Chimie Analytique et Bromatologie
Traumatologie orthopédie
Anatomie
Cardiologie
Réanimation Médicale
Pédiatrie
Anesthésie Réanimation
Radiologie
Neuro-chirurgie
Médecine Nucléaire
Chimie Thérapeutique
Toxicologie
Pédiatrie
Anatomie Pathologique
Anatomie
Anesthésie Réanimation
Radiologie
Physiologie
Radiologie
Médecine Nucléaire
Pédiatrie
Endocrinologie et maladies métaboliques
Microbiologie
Psychiatrie
Radiologie

****Enseignant militaire***

Pr. MAAMAR Mouna Fatima Zahra
Pr. MEDDAH Bouchra
Pr. MELHAOUI Adyl
Pr. MRABTI Hind
Pr. NEJJARI Rachid
Pr. OUBEJJA Houda
Pr. OUKABLI Mohamed*
Pr. RAHALI Younes

Pharmacie

Pr. RATBI Ilham
Pr. RAHMANI Mounia
Pr. REDA Karim*
Pr. REGRAGUI Wafa
Pr. RKAIN Hanan
Pr. ROSTOM Samira
Pr. ROUAS Lamiaa
Pr. ROUIBAA Fedoua*
Pr. SALIHOUN Mouna
Pr. SAYAH Rochde
Pr. SEDDIK Hassan*
Pr. ZERHOUNI Hicham
Pr. ZINE Ali*

AVRIL 2013

Pr. EL KHATIB MOHAMED KARIM*

MAI 2013

Pr. BOUSLIMAN Yassir*

MARS 2014

Pr. ACHIR Abdellah
Pr. BENCHAKROUN Mohammed*
Pr. BOUCHIKH Mohammed
Pr. EL KABBAJ Driss*
Pr. FILALI Karim*
Pr. EL MACHTANI IDRISSE Samira*
Pr. HARDIZI Houyam
Pr. HASSANI Amale*
Pr. HERRAK Laila
Pr. JEAIDI Anass*
Pr. KOUACH Jaouad*
Pr. MAKRAM Sanaa*
Pr. RHISSASSI Mohamed Jaafar
Pr. SEKKACH Youssef*
Pr. TAZI MOUKHA Zakia

DECEMBRE 2014

Pr. ABILKACEM Rachid*
Pr. AIT BOUGHIMA Fadila
Pr. BEKKALI Hicham*
Pr. BENZAOU Salma
Pr. BOUABDELLAH Mounya
Pr. BOUCHRIK Mourad*
Pr. DERRAJI Soufiane*

****Enseignant militaire***

Médecine interne
Pharmacologie *Directrice du Méd. Phar.*
Neuro-chirurgie
Oncologie Médicale
Pharmacognosie
Chirurgie Pédiatrique
Anatomie Pathologique
Pharmacie Galénique *Vice-Doyen à la*

Génétique
Ne Urologie
Ophtalmologie
Ne Urologie
Physiologie
Rhumatologie
Anatomie Pathologique
Gastro-Entérologie
Gastro-Entérologie
Chirurgie Cardio-Vasculaire
Gastro-Entérologie
Chirurgie Pédiatrique
Traumatologie Orthopédie

Stomatologie et Chirurgie Maxillo-faciale

Toxicologie

Chirurgie Thoracique
Traumatologie- Orthopédie
Chirurgie Thoracique
Néphrologie
Anesthésie-Réanimation *Dir. ERSSM*
Biochimie-Chimie
Histologie- Embryologie-Cytogénétique
Pédiatrie
Pneumologie
Hématologie Biologique
Gynécologie-Obstétrique
Pharmacologie
CCV
Médecine interne
Généologie-Obstétrique

Pédiatrie
Médecine Légale
Anesthésie-Réanimation
Chirurgie Maxillo-Faciale
Biochimie-Chimie
Parasitologie
Pharmacie Clinique

Pr. EL AYOUBI EL IDRISSE Ali
Pr. EL GHADBANE Abdedaim Hatim*
Pr. EL MARJANY Mohammed*
Pr. FEJJAL Nawfal
Pr. JAHIDI Mohamed*
Pr. LAKHAL Zouhair*
Pr. OUDGHIRI NEZHA
Pr. RAMI Mohamed
Pr. SABIR Maria
Pr. SBAI IDRISSE Karim*
Hyg.

AOUT 2015

Pr. MEZIANE Meryem
Pr. TAHIRI Latifa

JANVIER 2016

Pr. BENKABBOU Amine
Pr. EL ASRI Fouad*
Pr. ERRAMI Noureddine*

JUIN 2017

Pr. ABI Rachid*
Pr. ASFALOU Ilyasse*
Pr. BOUAITI El Arbi*
Hyg.
Pr. BOUTAYEB Saber
Pr. EL GHISSASSI Ibrahim
Pr. HAFIDI Jawad
Pr. MAJBAR Mohammed Anas
Pr. OURAINI Saloua*
Pr. RAZINE Rachid
Hyg.
Pr. SOUADKA Amine
Pr. ZRARA Abdelhamid*

PROFESSEURS AGREGES :

JANVIER 2005

Pr. HAJJI Leila

MAI 2018

Pr. AMMOURI Wafa
Pr. BENTALHA Aziza
Pr. EL AHMADI Brahim
Pr. EL HARRECH Youness*
Pr. EL KACEMI Hanan
Pr. EL MAJJAOUI Sanaa
Pr. FATIHI Jamal*
Pr. GHANNAM Abdel-Ilah
Pr. JROUNDI Imane
Hyg.
Pr. MOATASSIM BILLAH Nabil
Pr. TADILI Sidi Jawad

Anatomie
Anesthésie-Réanimation
Radiothérapie
Chirurgie réparatrice et plastique
O.R.L
Cardiologie
Anesthésie-Réanimation
Chirurgie Pédiatrique
Psychiatrie
Médecine préventive, santé publique et

Dermatologie
Rhumatologie

Chirurgie Générale
Ophtalmologie
O.R.L

Microbiologie
Cardiologie
Médecine préventive, santé publique et

Oncologie Médicale
Oncologie Médicale
Anatomie
Chirurgie Générale
O.R.L
Médecine préventive, santé publique et

Chirurgie Générale
Immunologie

Cardiologie (*mise en disponibilité*)

Médecine interne
Anesthésie-Réanimation
Anesthésie-Réanimation
Urologie
Radiothérapie
Radiothérapie
Médecine interne
Anesthésie-Réanimation
Médecine préventive, santé publique et

Radiologie
Anesthésie-Réanimation

****Enseignant militaire***

Pr. TANZ Rachid*

NOVEMBRE 2018

Pr. AMELLAL Mina

Pr. SOULY Karim

Pr. TAHRI Rajae

NOVEMBRE 2019

Pr. AATIF Taoufiq*

Pr. ACHBOUK Abdelhafid*

Pr. ANDALOUSSI SAGHIR Khalid

Pr. BABA HABIB Moulay Abdellah*

Pr. BASSIR Rida Allah

Pr. BOUATTAR Tarik

Pr. BOUFETTAL Monsef

Pr. BOUCHENTOUF Sidi Mohammed*

Pr. BOUZELMAT Hicham*

Pr. BOUKHRIS Jalal*

Pr. CHAFRY Bouchaib*

Pr. CHAHDI Hafsa*

Pr. CHERIF EL ASRI ABAD*

Pr. DAMIRI Amal*

Pr. DOGHMI Nawfal*

Pr. ELALAOUI Sidi-Yassir

Pr. EL ANNAZ Hicham*

Pr. EL HASSANI Moulay El Mehdi*

Pr. EL HJOUJI Abderrahman*

Pr. EL KAOUI Hakim*

Pr. EL WALI Abderrahman*

Pr. EN-NAFAA Issam*

Pr. HAMAMA Jalal*

Pr. HEMMAOUI Bouchaib*

Pr. HJIRA Naouafal*

Pr. JIRA Mohamed*

Pr. JNIENE Asmaa

Pr. LARAQUI Hicham*

Pr. MAHFOUD Tarik*

Pr. MEZIANE Mohammed*

Pr. MOUTAKI ALLAH Younes*

Pr. MOUZARI Yassine*

Pr. NAOUI Hafida*

Pr. OBTEL MAJDOULINE

Hyg.

Pr. OURRAI ABDELHAKIM*

Pr. SAOUAB RACHIDA*

Pr. SBITTI YASSIR*

Pr. ZADDOUG OMAR*

Pr. ZIDOUH SAAD*

SEPTEMBRE 2021

Pr. ABABOU Karim*

Pr. ALAOUI SLIMANI Khaoula*

Pr. ATOUF OUFAA

Pr. BAKALI Youness

Oncologie Médicale

Anatomie

Microbiologie

Histologie-Embryologie--Cytogénétique

Néphrologie

Chirurgie réparatrice et plastique

Radiothérapie

Gynécologie-Obstétrique

Anatomie

Néphrologie

Anatomie

Chirurgie-Générale

Cardiologie

Traumatologie-Orthopédie

Traumatologie-Orthopédie

Anatomie pathologique

Neuro-chirurgie

Anatomie Pathologique

Anesthésie-Réanimation

Pharmacie-Galénique

Virologie

Gynécologie-Obstétrique

Chirurgie Générale

Chirurgie Générale

Anesthésie-Réanimation

Radiologie

Stomatologie et Chirurgie Maxillo-faciale

O.R.L

Dermatologie

Médecine interne

Physiologie

Chirurgie-Générale

Oncologie Médicale

Anesthésie-Réanimation

Chirurgie Cardio-Vasculaire

Ophtalmologie

Parasitologie-Mycologie

Médecine préventive, santé publique et

Pédiatrie

Radiologie

Oncologie Médicale

Traumatologie-Orthopédie

Anesthésie-Réanimation

Chirurgie réparatrice et plastique

Oncologie Médicale

Immunologie

Chirurgie Générale

****Enseignant militaire***

Pr. BAMOUS Mehdi*
 Pr. BELBACHIR Siham
 Pr. BELKOUCH Ahmed*
 Catastrophes
 Pr. BENNIS Azzelarab*
 Pr. CHAFAI ELALAOUI Siham
 Pr. DOUMIRI Mouhssine
 Pr. EDDERAI Meryem*
 Pr. EL KTAIBI Abderrahim*
 Pr. EL MAAROUFI Hicham*
 Pr. EL OMRI Noual*
 Pr. ELQATNI Mohamed*
 Pr. FAHRY Aicha*
 Pr. IBRAHIM RAGAB MOUNTASSER Dina*
 Pr. IKEN Maryem
 Pr. JAAFARI Abdelhamid*
 Pr. KHALFI Lahcen*
 Faciale
 Pr. KHEYI Jamal*
 Pr. KHIBRI Hajar
 Pr. LAAMRANI Fatima Zahrae
 Pr. LABOUDI Fouad
 Pr. LAHKIM Mohamed*
 Pr. MEKAOUI Nour
 Pr. MOJEMMI Brahim
 Pr. OUDRHIRI Mohammed Yassaad
 Pr. SATTE AMAL*
 Pr. SOUHI Hicham*
 Pr. TADLAOUI Yasmina*
 Pr. TAGAJDID Mohamed Rida*
 Pr. ZAHID Hafid*
 Pr. ZAJJARI Yassir*
 Pr. ZAKARYA Imane*

CCV
 Psychiatrie
 Médecine des Urgences et des

 Traumatologie-Orthopédie
 Génétique
 Anesthésie-Réanimation
 Radiologie
 Anatomie Pathologique
 Hématologie Clinique
 Médecine interne
 Médecine interne
 Pharmacie Galénique
 Néphrologie
 Parasitologie
 Anesthésie-Réanimation
 Stomatologie et Chirurgie Maxillo-

 Cardiologie
 Médecine interne
 Radiologie
 Psychiatrie
 Radiologie
 Pédiatrie
 Chimie Analytique
 Neurochirurgie
 Neurologie
 Pneumo-phtisiologie
 Pharmacie Clinique
 Virologie
 Hématologie
 Néphrologie
 Pharmacognosie

****Enseignant militaire***

2 - ENSEIGNANTS-CHERCHEURS SCIENTIFIQUES

PROFESSEURS DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR :

Pr. ABOUDRAR Saadia
Pr. ALAMI OUHABI Naima
Pr. ALAOUI KATIM
Pr. ALAOUI SLIMANI Lalla Naïma
Pr. ANSAR M'hammed
Chimique
Pr. BARKIYOU Malika
Pr. BOUHOUCHE Ahmed
Pr. BOUKLOUZE Abdelaziz
Pr. DAKKA Taoufiq
Rech. et de la Coop.
Pr. FAOUZI Moulay El Abbes
Pr. IBRAHIMI Azeddine
Pr. OULAD BOUYAHYA IDRISSE Med
Pr. RIDHA Ahlam
Pr. TOUATI Driss
Pr. ZAHIDI Ahmed

Physiologie
Biochimie-Chimie
Pharmacologie
Histologie-Embryologie
Chimie Organique et Pharmacie

Histologie-Embryologie
Génétique Humaine
Applications Pharmaceutiques
Physiologie *Vice-Doyen chargé de la*

Pharmacologie
Biologie moléculaire/Biotechnologie
Chimie Organique
Chimie
Pharmacognosie
Pharmacologie

PROFESSEURS HABILITES :

Pr. AANNIZ Tarik
Pr. BENZEID Hanane
Pr. CHAHED OUZZANI Lalla Chadia
Pr. CHERGUI Abdelhak
végétales
Pr. DOUKKALI Anass
Pr. EL BAKKALI Mustapha
Pr. EL JASTIMI Jamila
Pr. KHANFRI Jamal Eddine
Pr. LAZRAK Fatima
Pr. LYAHYAI Jaber
Pr. OUADGHIRI Mouna
Pr. RAMLI Youssef
Pr. SERRAGUI Samira
Pr. TAZI Ahnini
Pr. YAGOUBI Maamar

Microbiologie et Biologie moléculaire
Chimie
Biochimie-Chimie
Botanique, Biologie et physiologie

Chimie Analytique
Physiologie
Chimie
Histologie-Embryologie
Chimie
Génétique
Microbiologie et Biologie
Chimie Organique Pharmaco-Chimie
Pharmacologie
Génétique
Eau, Environnement

Mise à jour le 21/02/2022

KHALED Abdellah

Chef du Service des Affaires Administratives

FMPR

**Enseignant militaire*



Dédicaces



Après avoir rendu grâce à ALLAH tout puissant, Miséricordieux ainsi qu'à son prophète Mohamed paix et salut sur lui.

Par la grâce et la bonté de Dieu qui nous a toujours guidé et qui nous a donné la chance et la force d'étudier et d'en arriver là.

Je dédie cette thèse, ...

A ma très chère maman

Aucune expression n'est à même de témoigner de l'immense gratitude que j'éprouve envers cet être qui m'a donné non seulement la vie, mais aussi les bases inébranlables de mes premiers pas dans la vie ainsi que d'une bonne éducation et d'une meilleure orientation. Je te serai à tout jamais reconnaissante, combien même mon besoin est grand de ta bénédiction, de ta bonté et de ta protection. À toi ma chère maman, je dédie ce modeste travail et Dieu sait que j'aurais tant aimé te dédier autre chose de plus précieux dès lors que tu me le demanderas. Sans toi, sans ta présence, ton réconfort et tes encouragements ce travail n'aurait, sans doute, jamais vu le jour. Que Dieu te préserve et t'accorde davantage de santé et de béatitude. Je t'aime maman.

A mon très cher père

Quoique je puisse dire ou écrire, je ne pourrais jamais exprimer ma grande affection, ma profonde reconnaissance et ma fierté d'être ta fille. Mon papa, mon premier maître, ma source de sécurité. Je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain je ferai de mon mieux pour te rendre fier de moi et ne jamais te décevoir. Ton honnêteté, ton ardeur dans le travail, et tes grandes qualités humaines font de toi un exemple à suivre.

En ce jour, ta fille espère être à la hauteur de tes espérances et réaliser l'un de tes rêves. Que ce travail soit l'exaucement de tes vœux et le fruit de tes innombrables sacrifices consentis pour mes études et mon éducation, et témoigne de l'amour, de l'affection et du profond respect que j'éprouve à ton égard. C'est ta réussite avant d'être la mienne. Puisse Dieu tout puissant te protéger et t'accorder santé, bonheur et longue vie.

A mon chéri Younes

L'homme de ma vie, ma moitié et mon âme sœur.

A la personne qui m'a entouré d'amour, de tendresse, de motivation et d'attention. Je remercie Allah le tout puissant qui a croisé nos chemins. Nous avons partagé beaucoup de belles choses ensemble, et le chemin est encore long. Merci pour ton amour inconditionnel, ta tendresse, ton affection et ton dévouement. Merci d'être dans ma vie. Que ce travail puisse être le témoignage de mon immense gratitude et reconnaissance. Que dieu le tout puissant t'accorde plein de succès, santé, une très longue vie à mes côtés et te remplis la vie avec tout le bonheur que tu m'as apporté depuis le jour où tu as fait partie de ma vie. Que Dieu, le très haut, préserve notre amour et notre union. Je t'aime

A mes chères sœurs Sana, Meryem

Je vous remercie pour tous les moments agréables que nous avons partagés, pour tous nos éclats de rire, nos disputes, nos bêtises. Merci pour votre soutien pour votre serviabilité, et pour m'avoir supporté dans mes mauvais jours. Votre place dans mon cœur est irremplaçable. Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots, tous les mots ne sauraient exprimer mon amour et ma reconnaissance.

Qu'Allah nous garde a jamais unis dans la joie et la prospérité, et qu'il vous préserve du mal et vous accorde santé et réussite.

A ma chère petite sœur Imane

Ma si jolie petite sœur, tu étais mon tout premier meilleur ami et tu le resteras pour toujours. A toi ma complice, ma confidente. Merci pour tout ton soutien, tu m'as épaulé pendant les chapitres les plus difficiles de ma vie. Merci d'avoir toujours été à l'écoute et de venir à mon secours quand j'avais besoin d'aide, merci pour tous les conseils pour ton encouragement sans cesse. Je te dédie ce travail en témoignage de ma profonde affection et mon attachement. Je te souhaite le meilleur des avenir possibles, la réussite et tout le bonheur qui puisse exister. Je t'aime ma Dashnia !

A mes tantes, oncles et cousins :

Merci pour vos encouragements, votre soutien tout au long de ces années. Je vous dédie ce travail en reconnaissance à la grande affection que vous me témoignez et pour vous exprimer toute la gratitude et l'amour que je vous porte. Puisse Dieu vous procurer bonheur et prospérité.

A ma deuxième famille

Merci de m'avoir accueillie au sein de votre petite famille. Je vous dédie ce travail, en témoignage de mon grand respect et mon affection envers vous. Que Dieu vous apporte santé, bonheur et une longue vie.

A mes amies

Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des sœurs et des amies sur qui je peux compter.

En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur

A tous ceux et celles que j'ai omis de citer

A toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail



Remerciements



A notre maitre et président de thèse

Monsieur Mohamed Karim EL KHATIB

***Chef de Service de Chirurgie Plastique et Maxillo-faciale de l'Hôpital Militaire d'Instruction
Mohammed V de Rabat***

Je vous remercie professeur pour le grand honneur que vous m'accorder en acceptant de présider cette thèse. Vos qualités humaines et professionnelles exemplaires, votre compétence, votre dynamisme ont toujours suscité notre admiration. Veuillez professeur, accepter ma reconnaissance, mon respect et ma grande estime.

A notre maitre et rapporteur de thèse

Monsieur LAHCEN KHALFI

***Professeur de stomatologie et chirurgie maxillo-faciale à l'Hôpital Militaire d'Instruction
Mohammed V de Rabat***

Permettez-moi de vous remercier du fin fond de mon cœur pour la bienveillance, la gentillesse et la spontanéité avec lesquelles vous avez accepté de diriger ce travail. Travailler sous votre direction était un réel honneur. Vos qualités scientifiques, pédagogiques et votre intarissable bonté m'inspirent beaucoup d'admiration et de respect. Veuillez trouver ici le témoignage de ma gratitude et ma reconnaissance les plus sincères.

A notre maître et juge de thèse

Monsieur ABDELHAFID ACHBOUK

***Professeur de chirurgie plastique et réparatrice à l'Hôpital Militaire d'Instruction Mohammed V de
Rabat***

Nous sommes particulièrement touchés par la spontanéité et la gentillesse avec laquelle vous avez bien voulu accepter de juger ce travail. Veuillez accepter, cher maître, ce travail avec toute notre estime et haute vénération

A notre maître et juge de thèse

Monsieur JALAL HAMAMA

*Professeur de stomatologie et chirurgie maxillo-faciale à l'Hôpital Militaire d'Instruction
Mohammed V de Rabat*

Votre présence au sein de notre jury présente pour nous le plus grand honneur. Veuillez trouver, cher maître, dans ce travail l'expression de ma profonde gratitude et mon grand respect.

A notre maître et juge de thèse

Monsieur JAWAD HAFIDI

Professeur de chirurgie réparatrice et plastique au CHU de rabat

Vous nous avez fait l'honneur de faire partie de notre jury. Nous avons pu apprécier l'étendue de vos connaissances et vos grandes qualités humaines. Veuillez accepter, cher Professeur, nos sincères remerciements et notre profond respect



Liste des abréviations



Abréviations

ABS	: Acrylonitrile butadiène styrène
AFNOR	: Association française de normalisation
ANSM	: Agence nationale de sécurité du médicament
AR	: Réalité augmentée
ASA	: Acrylonitrile styrène acrylate
ATM	: Articulation temporo-mandibulaire
BJ	: Binder Jetting
CAO	: Conception assistée par ordinateur
CLIP	: Production continue d'interface liquide (Continuous Liquid Interface Production)
CNR	: Rapport contraste/bruit
CR	: Relation centrée
CT	: Computed tomography
D2P	: DICOM TO PRINT
DICOM	: Digital imaging and communications in medicine
DLP	: Digital Light Processing
DM	: Dispositifs médicaux
DMLS	: Direct Metal Laser Sintering
EBM	: Electron Beam Melting
FDM	: Fused Deposition Modeling / dépôt de filaments fondus
FFF	: Fused Filament Fabrication
IRM	: Imagerie par résonance magnétique

JCE	: Jonction cémento-émail
MJ	: Material Jetting
MPFC	: Muscles peauciers de la face et du cou
ORL	: Oto rhino laryngologie
PA	: Poudre de polyamide
PEEK	: Polyetheretherketone
PLA	: Acide polylactique
PSI	: Implants spécifiques au patient
RSNA	: Radiological Society of North America
RV	: Réalité virtuelle
SDL	: Selective Deposition Lamination
SLA	: Stéréolithographie Apparatus
SLS	: Selective Laser Sintering
SLS	: Selective laser sintering
SNR	: Rapport signal/bruit
STL	: Standard Tessellation Language
TI	: Texas Instruments
UE	: Union européen
UV	: Rayons ultra-violets
VSP	: Planification chirurgicale virtuelle
3D	: Trois dimensions
3DP	: Three-Dimensional Printing



Liste des illustrations



Liste des figures

Figure 1: Les limites anatomique et étages de la face	5
Figure 2 : Éléments osseux constitutifs du massif facial	9
Figure 3: a. La mandibule. b. Les deux temps de l'ouverture buccale : rotation puis luxation.....	11
Figure 4 : anatomie de la dent	13
Figure 5: les muscles masticateurs	15
Figure 6 : Muscle de la mimique faciale.....	16
Figure 7: Myologie fonctionnelle des muscles peauciers	18
Figure 8 : vascularisation artérielle de la face.....	20
Figure 9 : Les différents groupes ganglionnaires du cou	22
Figure 10: branches du nerf trijumeau	24
Figure 11: branches de nerf facial F.	26
Figure 12: Coupe transversale de l'épiderme (source : cosmeticofficine)	28
Figure 13: Plexus vasculaire de la peau	30
Figure 14: Lignes de moindre tension de la face	32
Figure 15: Les différentes sous-unités esthétiques faciales	34
Figure 16: Mouvement de rotation autour d'un point fixe du condyle	36
Figure 17: Mouvement de translation de la mandibule	37
Figure 18: Bordure et mouvements fonctionnels dans le plan sagittal.....	38
Figure 19: Mouvement de rotation de la mandibule avec les condyles en position charnière terminale.....	40
Figure 20: Deuxième étape du mouvement de rotation pendant l'ouverture	41
Figure 21: Mouvement du bord de fermeture antérieur dans le plan sagittal	42

Figure 22: Imprimante SLA 250, première imprimante 3D commercialisée en 1988.	48
Figure 23: l'impression 3D en 4 étapes	50
Figure 24: Schéma montrant les étapes du processus d'impression	51
Figure 25: processus d'impression 3D	55
Figure 26: modèle 3D d'une Réparation chirurgicale des déformations faciales logiciel Osirix	58
Figure 27: processus de création d'image 3D à partir des coupes DICOM	60
Figure 28: modèle de crâne 3D créé à partir d'un scanner	61
Figure 29: Schéma montrant les différentes utilisations du logiciel D2P	63
Figure 30: modèle de mandibule en 3D	64
Figure 31: poudre de polyamide source : primante3d	68
Figure 32: impression par dépôt de filaments fondus	72
Figure 33: Impression par photopolymérisation (Stéréolithographie)	74
Figure 34: impression par DLP	75
Figure 35: schémas montrant les différentes étapes de la technique SLS	78
Figure 36: Avantages et inconvénients de l'impression 3D en planification chirurgicale	79
Figure 37: images TDM du massif facial	89
Figure 38: STL segmenté du massif facial	90
Figure 39: Biomodèle 3D du massif facial	91
Figure 40: photos panoramiques de la patiente avant l'intervention	94
Figure 41: Biomodèle 3D des arcades dentaires	95
Figure 42 : l'imprimante 3D ProJet MJP 3600	96

Liste des Tableaux

Tableau 1: Résumant les différences entre les techniques DLP et SLA	76
--	----



Sommaire



INTRODUCTION	1
PARTIE 1 : RAPPEL ANATOMIQUE ET BIOMÉCANIQUE	4
I. Anatomie topographique de la face	5
a) La région frontale	6
b) La région sourcilière	6
c) La région orbitaire	6
d) La région nasale	7
e) La région génienne	7
f) La région orale ou buccale	7
g) La région mentonnière	8
h) La région auriculaire	8
i) La région du scalp	8
II. Anatomie descriptive de la face	9
1. Ostéologie faciale	9
2. Anatomie de la dent	12
3. Les muscles de la face	13
3.1. Les muscles masticateurs	13
3.2. Muscles peauciers : MPFC (muscles peauciers de la face et du cou).....	15
4. La vascularisation de la face	19
4.1. La vascularisation artérielle	19
4.2. La vascularisation veineuse	21

4.3 Le réseau lymphatique	21
4.4. Innervation de la face	23
a) Le nerf trijumeau	23
b) Le nerf facial	25
5. Anatomie fonctionnelle de la peau	27
III- Biomécanique de l'appareil manducateur	35
A/ Les différents types de mouvements mandibulaires	35
1) Les mouvements élémentaires	35
a) Mouvement de rotation	35
b) Mouvement de translation	37
c) Mouvements de la mandibule dans un seul plan	38
d) Mouvements de la bordure d'ouverture postérieure	39
e) Mouvements de la bordure d'ouverture antérieure	41
f) Mouvements de la bordure de contact supérieure	42
2) Les mouvements fondamentaux	43
a) Mouvements d'ouverture-fermeture	43
b) Mouvements de l'ATM pour la propulsion – rétropulsion de la mandibule	43
B/ Cinématique mandibulaire : La position de repos	44
PARTIE 2 : IMPRESSION 3D.....	45
I. Historique	46
II. Processus d'impression 3D.....	50

1. Definition	50
2. Etapes du processus d'impression 3D	50
III. Logiciels	56
1. OsiriX	56
2. 3D doctor	59
a. Ouvrir le fichier image	59
b. Définir l'objet et les limites de l'objet	59
c. Rendu de surface 3D et rendu de volume	60
3. DICOM TO PRINT (D2P)	62
4. Blender	64
5. Medical Design Studio	65
IV. Les matériaux utilisés	66
1. Les plastiques	66
1-1. L'acide polylactique (PLA)	66
1-2. Acrylonitrile butadiène styrène (ABS)	67
1-3. Acrylonitrile styrène acrylate (ASA)	67
1-4. La poudre de polyamide (PA)	67
2. Les métaux	69
2-1. L'aluminium et ses alliages	69
2-2. Titane et ses alliages	69
2-3. L'acier inoxydable	69
2-4. Le chrome-cobalt et ses alliages	69

3. La céramique	69
4. Matériaux organiques	70
4-1 Tissus biologiques	70
4-2 Bois	70
4-3 Cires	70
V. Techniques d'impression	71
6. Avantages et inconvénients de l'impression 3D	78
7. Enjeux réglementaires	80
PARTIE 3 : CAS CLINIQUES	87
Patient 1.....	88
Patient 2.....	92
PARTIE 4 : DISCUSSION	97
I. Apport pédagogique	100
II. Apport en chirurgie maxillo-faciale de reconstruction	102
III. Apport en Chirurgie orthognathique	105
IV. Apport en implantologie dentaire	107
CONCLUSION	110
RÉSUMÉS	113
REFERENCES	117



INTRODUCTION



La face est un paysage anatomique complexe. Une mosaïque osseuse d'une dizaine de pièces, recouverte de cartilages, muqueuses, dents, muscles, nerfs, vaisseaux sanguins. Une mécanique d'horlogerie suisse qui ne sert à rien de moins que manger, parler, sentir, saliver, respirer, voir... autant de fonctions essentielles à restaurer ou préserver lorsqu'un accident ou une malformation vient faire voler en éclats ce bel assemblage. Mais qu'il s'agisse d'un impact de balle, d'un accident ou d'un cancer, chaque cas présente des caractéristiques uniques. À chaque fois, le puzzle diffère en fonction de la forme des lésions, de leur localisation et des caractéristiques initiales du patient. Face à ce défi qui hante les médecins depuis un siècle au moins, le recours à la modélisation et à l'impression 3D révolutionne la chirurgie maxillo-faciale.

L'impression 3D dite "fabrication additive" est un procédé additif par lequel des couches de matériaux sont assemblées pour créer une pièce en 3D, à l'inverse des méthodes de fabrication soustractive qui procèdent par retrait de matière comme l'usinage ou bien la fabrication mise en forme. [1]

Le point de départ est un fichier informatique représentant l'objet en trois dimensions, décomposé en tranches. Puis ces informations sont envoyées à une imprimante 3D qui va réaliser la fabrication par ajout de couches successives.

De nos jours, elle est devenue progressivement plus accessible en raison de l'expiration des brevets concernant les principales technologies (SLS, SLA et FDM) à partir des années 2000, du développement progressif de logiciels de segmentation, de simulation et de conception en libre accès et de l'apparition sur le marché des imprimantes de bureau. Parallèlement au développement des techniques d'imagerie tridimensionnelle et de leur démocratisation, les applications de l'impression 3D se sont étendues au champ de la chirurgie

maxillo-faciale et orale et la fabrication non industrielle a fait son apparition. Contrairement aux procédés classiques de fabrication soustractive, l'impression 3D procède par dépôt de couches successives de matériaux jusqu'à l'obtention d'objets tridimensionnels. Ce procédé de fabrication, associé au dessin numérique d'objets, est utilisé en chirurgie maxillo-faciale et orale pour la planification chirurgicale et la conception de dispositifs médicaux (DM). Il permet d'obtenir des modèles anatomiques pour améliorer la préparation et la stratégie opératoire, l'information du patient et la communication professionnelle ; il permet également la fabrication de dispositifs médicaux sur mesure, guides chirurgicaux, gouttières et implants spécifiques au patient.

Le présent travail va restituer l'historique d'émergence et d'évolution de cette technologie ainsi que le processus de fabrication du bio modèle, ce qui constituera la première partie de ce travail.

En outre, nous proposons deux observations cliniques qui résument les deux techniques généralement utilisées au sein du service de chirurgie maxillo-faciale à l'hôpital militaire Mohamed V d'instruction HMMVI à RABAT.



PARTIE 1 :
RAPPEL ANATOMIQUE
ET BIOMÉCANIQUE



I. Anatomie topographique de la face :

La face est un terme classiquement utilisé en anatomie. Située sous le crâne, en avant de l'extrémité céphalique, elle est composée de structures diverses : osseuses, musculaires, graisseuses, vasculaires, nerveuses, mais aussi tégumentaires. [2]

Elle est limitée en bas, par le plan passant par le bord inférieur de la mandibule. En haut, elle a pour frontière la limite antérieure du cuir chevelu.

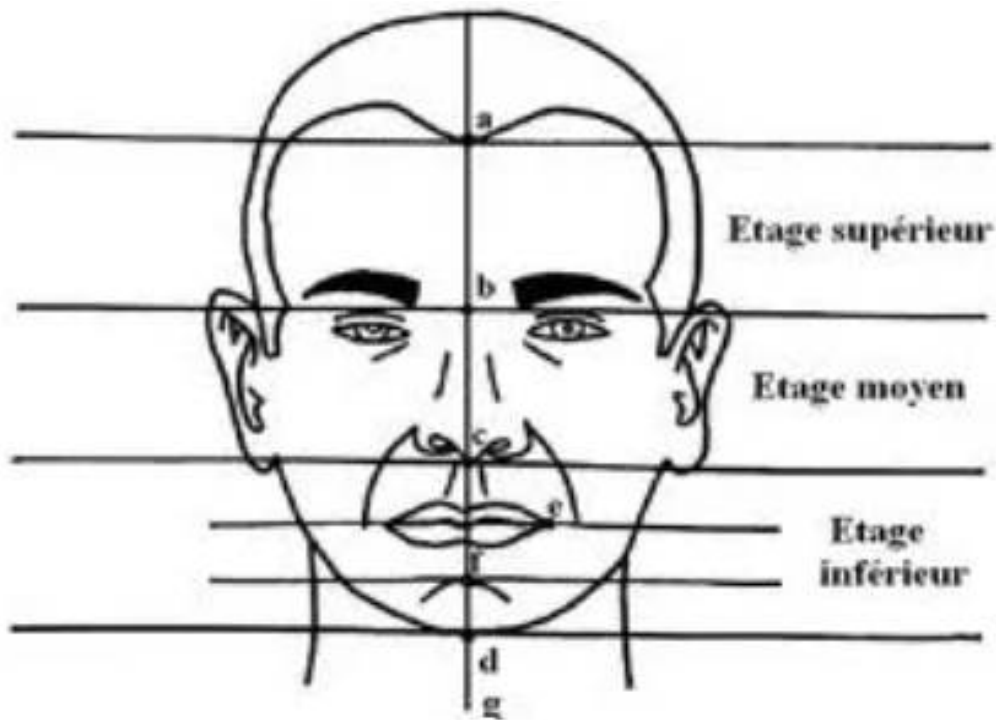


Figure 1: Les limites anatomique et étages de la face [3]

La face est divisée en plusieurs régions :

a) La région frontale :

Le front est une surface convexe située entre le bord supérieur des sourcils en bas et la lisière du cuir chevelu en haut. L'intime rapport de cette région avec les structures neuroméningées expose au risque d'envahissement tumoral de ces dernières. [4]

b) La région sourcilière :

Constituée par deux sourcils séparés par une région glabre appelée la glabelle. Le sourcil est l'élément pileux séparant la région orbito-palpébrale du front, il représente une zone anatomique indispensable du point de vue social

c) La région orbitaire :

Cette région est constituée par les paupières formant un rideau fin et souple qui ferme antérieurement la cavité orbitaire. De point de vue anatomique, cette région est limitée en haut par le bord inférieur des sourcils et en bas par le pli palpébro-génien de Charpy. [5]

Les paupières sont des lames cutané-musculo-membraneuse mobiles, constituée de quatre grandes couches : la peau, muscle orbiculaire et l'aponévrose du releveur de la paupière, un tissu fibreux (le tarse) et la conjonctive. [6]

Les muscles extra-oculaires, au nombre de 7, regroupant le muscle releveur de la paupière et 6 muscles occulo-moteurs. La glande lacrymale, située dans l'angle supéro-latéral de l'orbite, assure une humidification permanente du globe. [7]

d) La région nasale :

La limite supérieure est représentée par la glabelle, la limite inférieure est matérialisée par la base du nez et les limites latérales par les lignes des sillons naso-géniens. [8]

Les pertes de substance interruptrices, sont réparées rigoureusement, selon trois plans, superficiel, muqueux et éventuellement intermédiaire, avec comme but la restauration de l'image nasale le plus « ad integrum » possible. [4]

e) La région génienne :

Elle constitue la partie latérale de la face. Cette région présente deux faces ; une latérale cutanée, et une autre médiale de nature muqueuse. [9]

Entre ces deux faces s'étend le plan musculaire, et logent quatre éléments essentiels qui témoignent de la complexité de prise en charge des cancers cutanés survenant à ce niveau.

Ces éléments sont :

- ⊗ Le conduit parotidien
- ⊗ Le nerf facial
- ⊗ L'artère faciale
- ⊗ la glande parotide

f) La région orale ou buccale : [9]

Elle comprend les deux lèvres qui circonscrivent l'orifice oral. On décrit à chaque lèvre une portion cutanée, ou lèvre blanche et une portion muqueuse ou lèvre rouge, séparées par la ligne de jonction cutanéomuqueuse ou limbe, qui constitue un repère anatomique important à respecter lors de la reconstruction pour éviter les décalages inesthétiques. [9]

g) La région mentonnière :

Répond à la saillie du menton représentée par la partie antérieure de la mandibule. La peau à ce niveau est épaisse et adhérente. A ce niveau aussi, passe le nerf mentonnier le V3. [9]

h) La région auriculaire : [7]

Elle fait partie des confins crânio-faciaux. Le cornet acoustique d'architecture complexe, le pavillon est aussi un élément de l'identité individuelle et donc esthétique.

i) La région du scalp :

L'adhérence directe du scalp aux os du crane expose au risque d'extension rapide des cancers cutanés à l'endo-crane et aux espaces sous arachnoïdiens

II. Anatomie descriptive de la face :

1. Ostéologie faciale :

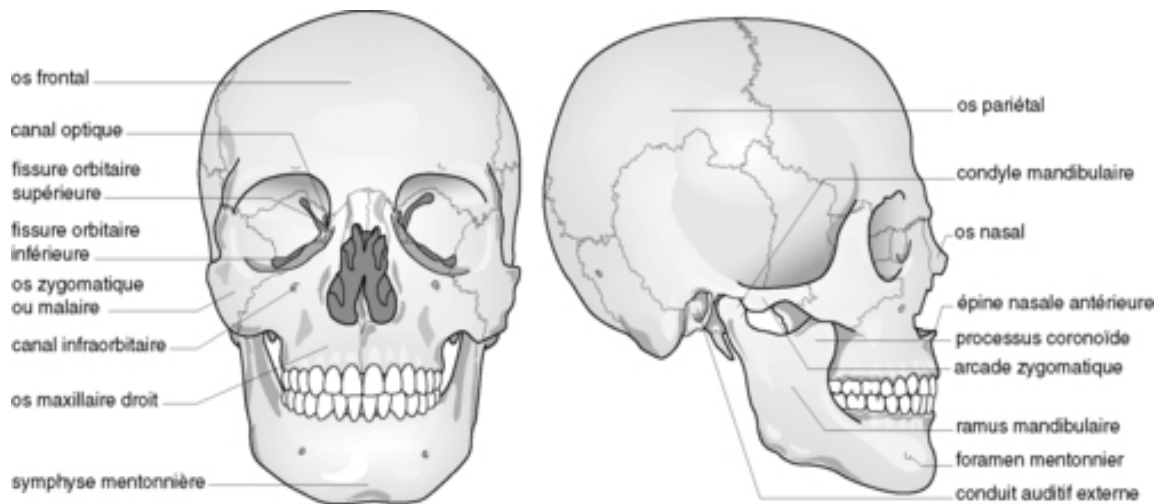


Figure 2 : Éléments osseux constitutifs du massif facial. [10]

La face est constituée par des os irréguliers. Elle renferme la partie initiale du tube digestif et des voies respiratoires, et une partie des organes des sens.

Son squelette, appelé viscérocrâne, splanchnocrâne ou encore massif facial, est formé par treize os fixes, soudés entre eux par des articulations fibreuses appelées sutures (au nombre de sept), ainsi que par un os mobile, la mandibule.

Il est divisé en trois étages : [10]

✓ Le *massif facial supérieur* est crânio-facial :

- Ethmoïdo-frontal médialement ;
- Fronto-sphénoïdal au niveau du cône et du toit orbitaire ;
- Fronto-zygomatique latéralement

✓ Le *massif facial moyen* est formé par les deux maxillaires réunis autour de l'orifice piriforme. Latéralement, l'os zygomatique (ou os malaire) forme le relief osseux de la pommette et rejoint le processus zygomatique du temporal pour fermer la fosse temporale, coulisse du muscle du même nom. L'os nasal forme avec son homologue le faîte du toit nasal.

✓ le *massif facial inférieur*. Elle est répartie en deux entités :

- une portion dentée horizontale ;
- un ramus, ou partie ascendante, se terminant en avant par le processus coronoïde (ou coroné) donnant insertion au muscle temporal et, en arrière, le condyle articulaire qui s'articule avec le condyle de l'os temporal.

La *mandibule* (fig. 3a) s'articule :

- avec le maxillaire par l'intermédiaire de l'articulé dentaire ;
- avec le temporal au niveau de l'articulation temporo-mandibulaire (ATM).

Après une simple rotation en début d'ouverture buccale, le condyle mandibulaire se luxé physiologiquement en avant pour obtenir une ouverture buccale complète (fig. 3b).

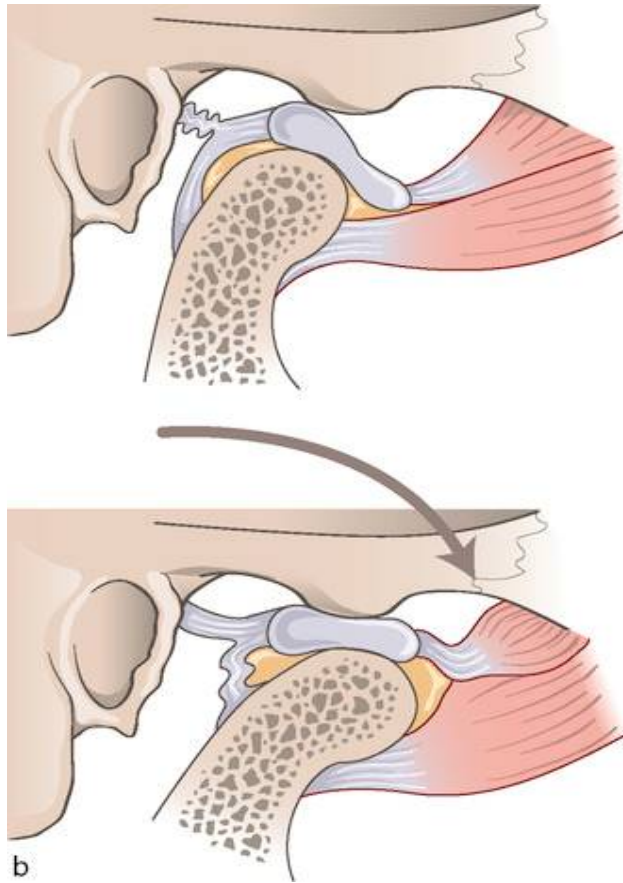
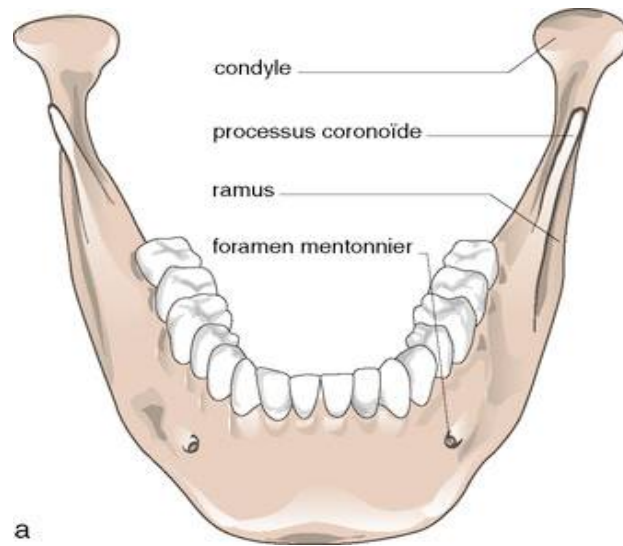


Figure 3: a. La mandibule. **b.** Les deux temps de l'ouverture buccale : rotation puis luxation. [10]

2. Anatomie de la dent : [11], [12]

C'est l'organe le plus dur du corps humain car il est fait d'émail. Il a longtemps résisté au feu, et peut servir pour l'identification médico-légale. Le rôle des dents n'est pas uniquement d'assurer la mastication. Elles soutiennent aussi les joues et les lèvres et contribuent à l'esthétique du visage, ainsi qu'à la qualité de la prononciation.

Les dents se composent des éléments suivants :

- ✓ La couronne : Partie supérieure et visible de la dent. Il s'agit d'une recouverte d'émail au-dessus de la jonction cémento-émail (JCE) ou "collet" de la dent.
- ✓ L'émail : substance blanche, dure qui recouvre la dent. Son rôle est de protéger la dentine située sous la couronne dentaire
- ✓ Sillon gingival : appelé aussi sulcus. Espace où se rencontre la gencive
- ✓ La dentine : tissu dur, recouvert de l'émail, qui forme la masse de la dent et entoure la pulpe dentaire.
- ✓ La pulpe dentaire : tissu mou situé au cœur de la dent et qui contient beaucoup de tissus nerveux et de vaisseaux sanguins. C'est dans la pulpe dentaire que se trouvent les terminaisons nerveuses qui transmettent la douleur.
- ✓ La racine : portion de la dent qui est incluse dans l'alvéole dentaire. Les racines sont recouvertes de cément, une substance qui recouvre la racine et qui attache la dent à l'os et à la gencive.

La racine anatomique se trouve sous la JCE et, à partir de laquelle les fibres élastiques et de collagène du ligament alvéolodentaire ou desmodonte prennent racine. Le ligament et l'os forment une véritable articulation et contiennent des cellules de régénération osseuse, ligamentaire et cémentaire.

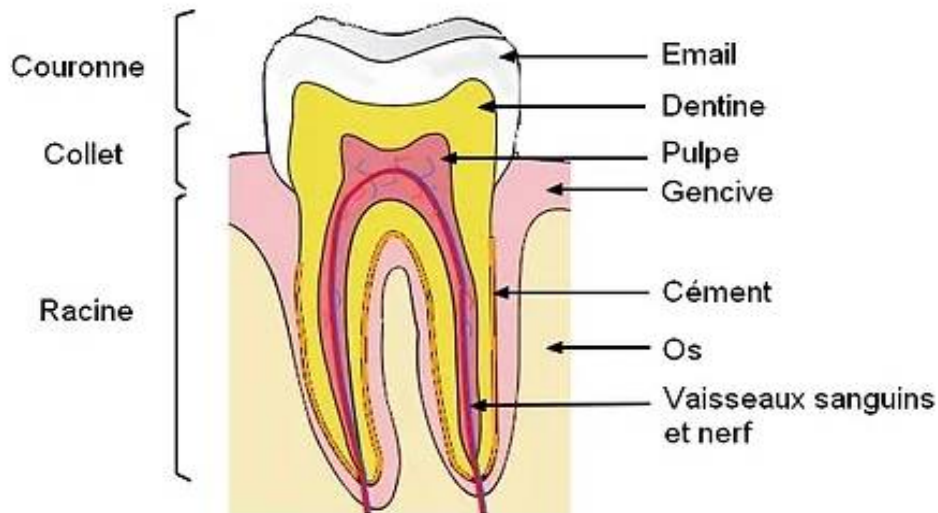


Figure 4 : anatomie de la dent [13]

3. Les muscles de la face : [7]

On divise les muscles de la tête en deux grands groupes : les muscles masticateurs et les muscles peauciers.

3.1. Les muscles masticateurs :

Ils sont au nombre de quatre : le masséter, le temporal, les ptérygoïdes médial et latéral. [14], [15]

- *Muscle masséter* : est un muscle court, épais, rectangulaire, allongé de haut en bas, étendu de l'arcade zygomatique à la face latérale de la branche montante de la mandibule. Le muscle masséter est composée de trois faisceaux : superficiel, moyen et profond. Les principales actions sont l'élévation, la propulsion et le déplacement latéral de la mandibule.

- *Muscle temporal* : est de forme large, plat, radié. Il occupe la fosse temporale, d'où ses faisceaux sont originaires (le long de la ligne temporale inférieure) et convergent vers le processus coronoïde de la mandibule.

Le muscle temporal est impliqué dans le mouvement de l'élévation et rétropulsion de la mandibule. C'est le principal muscle postural, maintenant la mandibule en position de repos.

- *Muscle ptérygoïdien latéral* : est court, épais, aplati transversalement. Il est situé dans la région ptérygo-maxillaire. Ce muscle présente deux chefs : l'un, supérieur ou sphénoïdal, l'autre, inférieur ou ptérygoïdien.

- *Muscle ptérygoïdien médial* : est épais, de forme quadrilatère, situé en dedans du muscle ptérygoïdien latéral. Il est obliquement étendu de la fosse ptérygoïde à la face médiale de l'angle et de la branche montante de la mandibule. Ce muscle est impliqué dans les mouvements d'élévation, de propulsion et diduction de la mandibule. La branche ptérygoïdien médiale de la division mandibulaire du nerf trijumeau innerve ce muscle.

L'atteinte de l'un ou plusieurs de ces muscles se manifeste par une limitation de l'ouverture buccale, signe d'extension locorégionale des cancers.

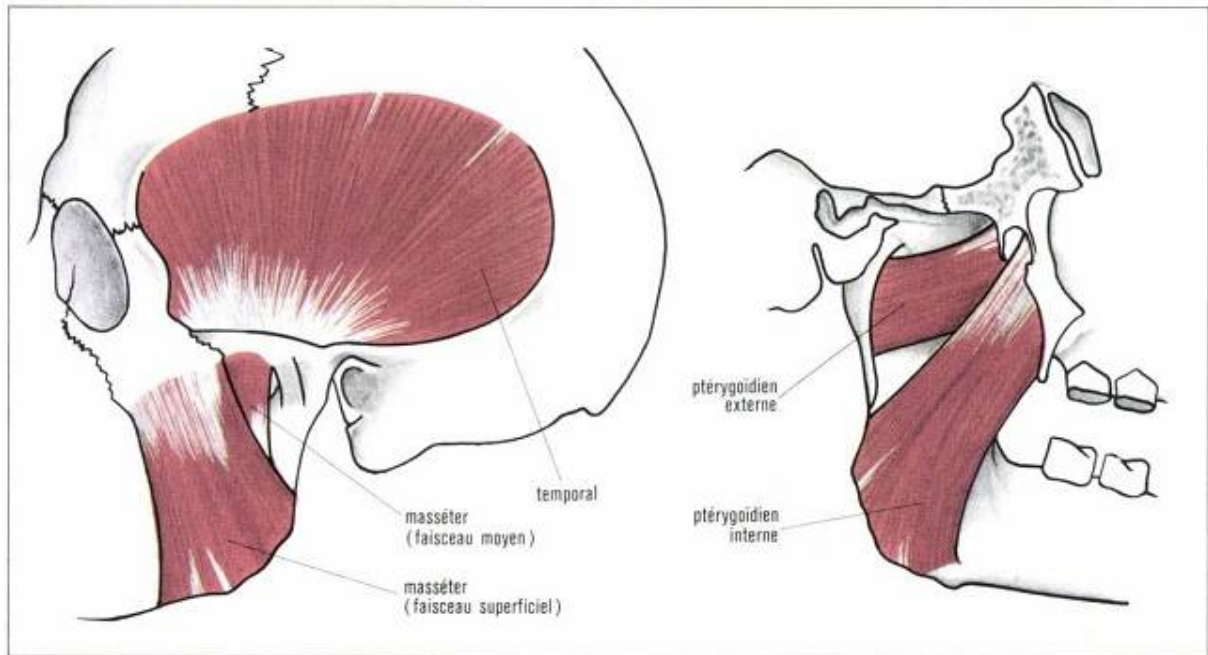


Figure 5: les muscles masticateurs [16]

3.2. Muscles peauciers : MPFC (muscles peauciers de la face et du cou)

La structure des muscles peauciers est particulière : ils présentent une insertion, généralement osseuse et se terminent par une insertion cutanée (mobile) dans les couches profondes de la peau. Leur contraction permet donc un mouvement cutané externe responsable des mouvements de la mimique faciale.

Les muscles de la mimique sont innervés par le nerf facial (VIIème paire de nerfs crâniens) alors que les muscles de la mastication sont innervés par le nerf V3 (nerf mandibulaire, branche du nerf trijumeau).

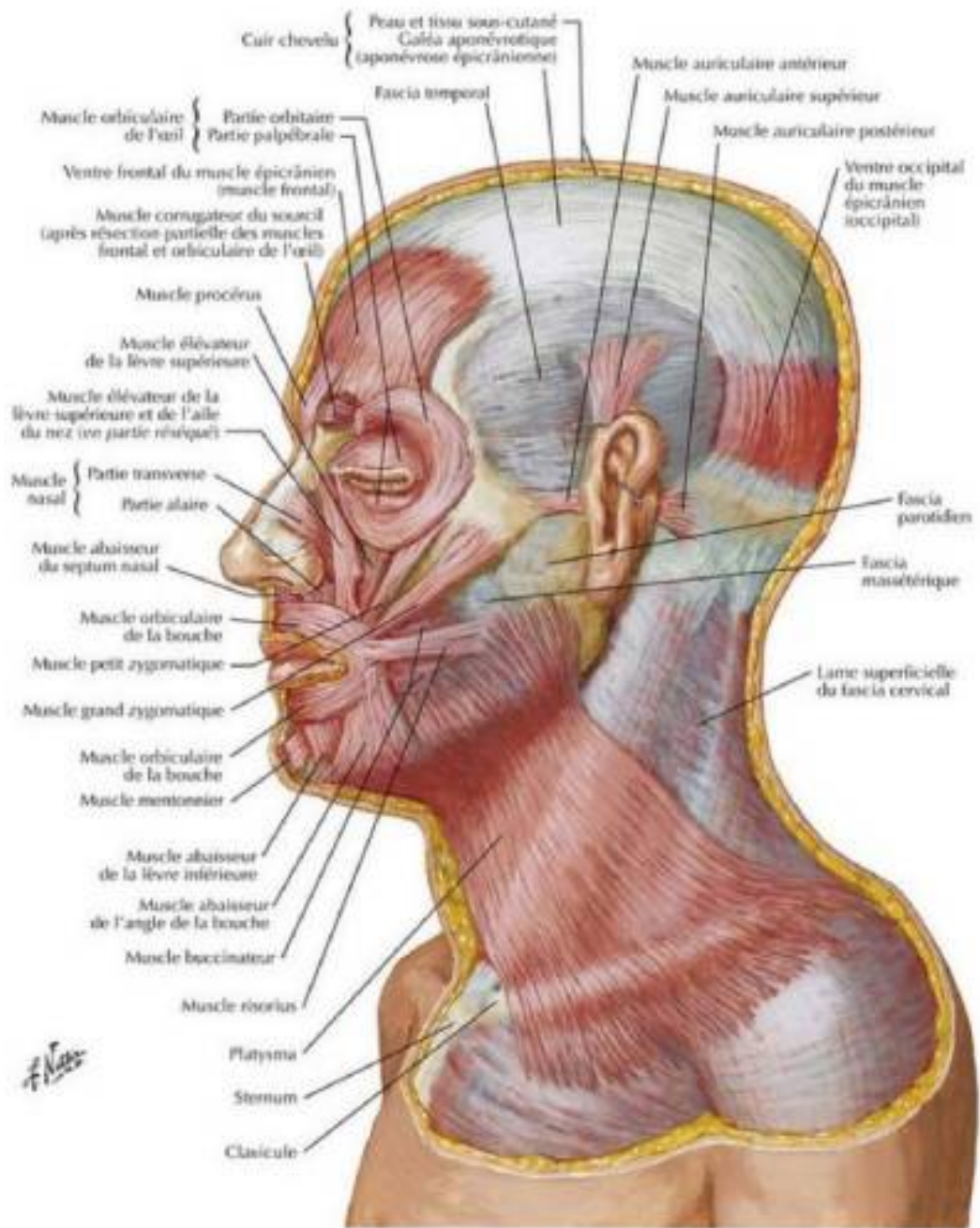


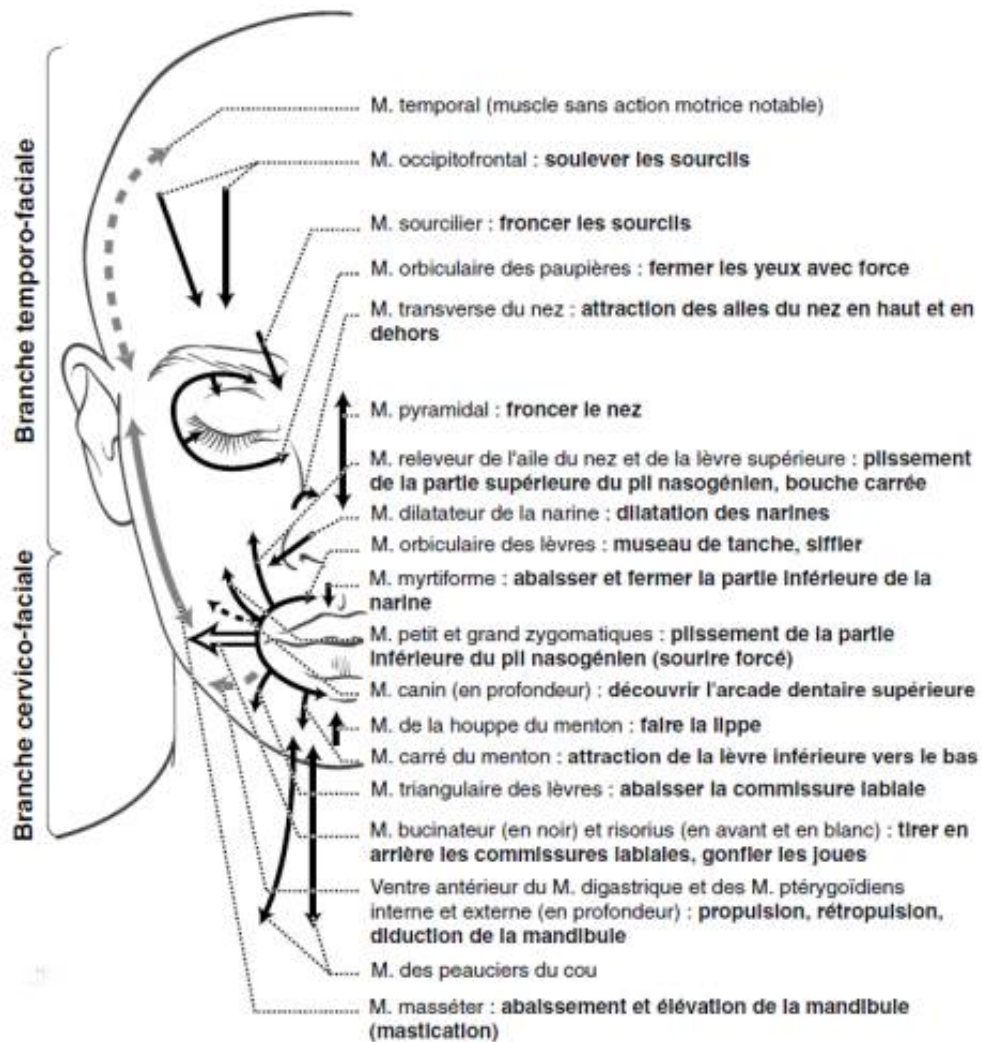
Figure 6 : Muscle de la mimique faciale. [15]

✓ Action des muscles peauciers :

Les muscles peauciers sont regroupés autour des orifices de la face. Ils peuvent ainsi être regroupés selon leur topographie :

- les muscles de paupières et des sourcils,
- les muscles du pavillon de l'oreille,
- les muscles du nez,
- les muscles des lèvres. Leur action combinée va permettre une grande variabilité de mimiques, nécessaires à la communication non verbale.

Les mouvements de la face sont permis par une combinaison de contractions et de relâchements des muscles dont les fibres sont imbriquées. Ceux-ci agissent donc dans une synergie complexe. La Figure ci-dessous décrit l'action de chacun des muscles de la face.



Vue antérieure schématique de l'hémiface droite. Les flèches noires : action des muscles innervés par le VII ; Les flèches grises : action des muscles innervés par le V3.

Figure 7: Myologie fonctionnelle des muscles peuciers [17]

4. La vascularisation de la face :

4.1. La vascularisation artérielle : (fig. 8)

Le réseau vasculaire de la face présente des particularités anatomiques : unicité des pédicules artériels et système anastomotique très riche des branches des carotides internes et externes. [8]

La vascularisation artérielle repose sur les branches des deux systèmes carotidiens : Artère faciale dans son segment supra mandibulaire, artère temporale superficielle, Artère maxillaire, Branches de l'artère ophtalmique et système carotidien interne.

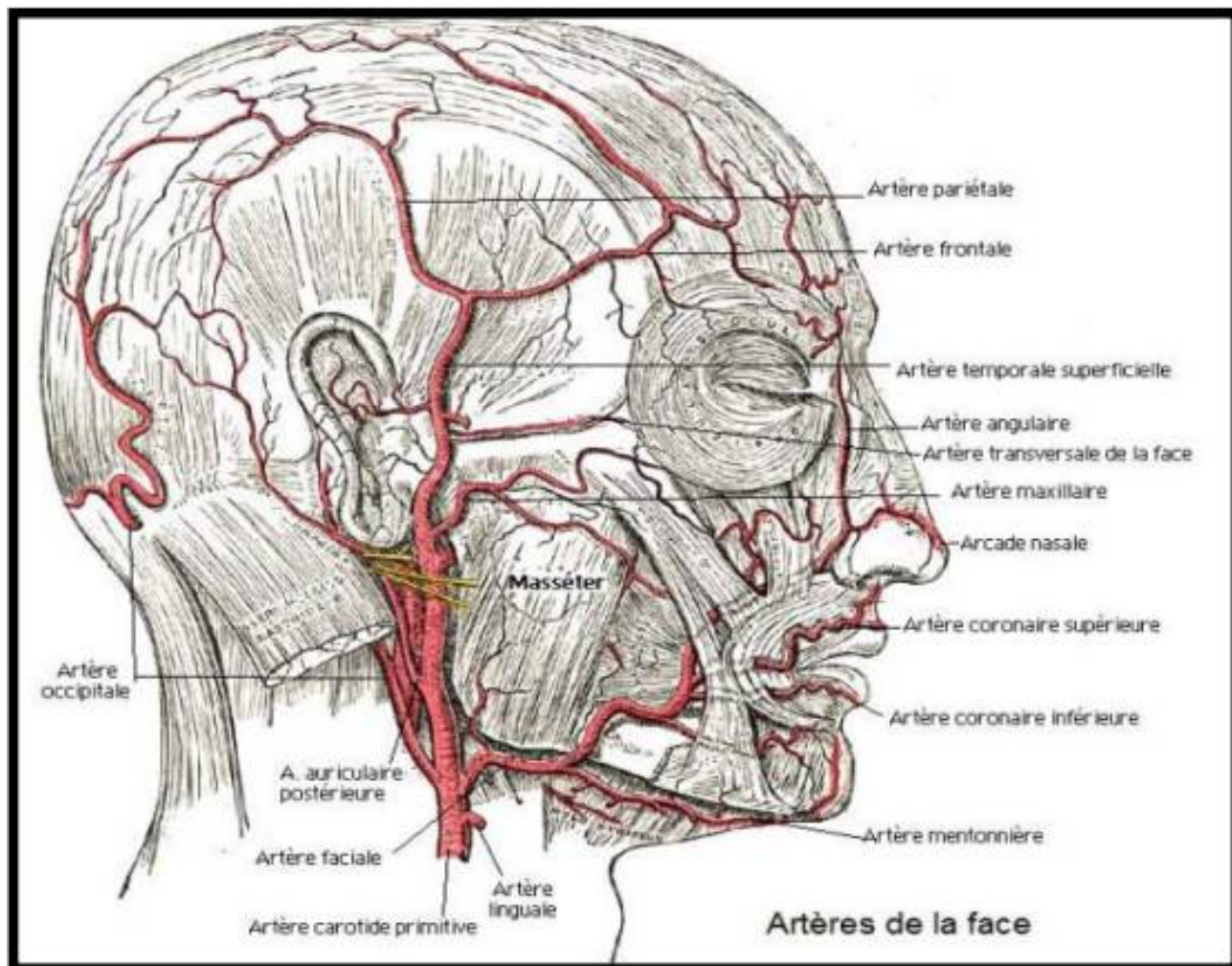


Figure 8 : vascularisation artérielle de la face. [18]

4.2. La vascularisation veineuse : [8]

Le sang veineux de la tête et du cou est drainé, de chaque côté, dans les gros troncs veineux de la base du cou, par six veines principales : la veine jugulaire interne, la veine jugulaire externe, la veine jugulaire antérieure, la veine vertébrale, la veine jugulaire

4.3 Le réseau lymphatique : [19]

La région cervicale comporte quatre groupes de ganglions lymphatiques, selon la terminologie de Sloan-Kettering Memorial. Il est crucial de prendre en compte ces groupes en raison de leur rôle important dans les réactions œdémateuses post-opératoires, le blocage cicatriciel et l'écoulement lymphatique.

De plus, l'extension lymphatique est un moyen fréquent de dissémination des carcinomes épidermoïdes. Parfois, il peut être nécessaire d'enlever les ganglions de drainage concernés pour traiter certaines situations.

Groupe I : il correspond aux classiques aires sous-mentonnières et sous-maxillaires, séparées par le ventre antérieur du muscle digastrique.

Groupe II : le groupe jugulaire supérieur comporte les ganglions sous-digastriques et les ganglions spinaux supérieurs

Groupe III : le groupe jugulaire moyen correspond au tiers moyen de la chaîne jugulaire interne.

Groupe IV : le groupe jugulaire inférieur correspond au tiers inférieur de la chaîne jugulaire interne.

Groupe V : il correspond à la chaîne spinale dans le triangle postérieur.

Groupe VI : le groupe cervical antérieur comporte les ganglions compris entre l'os hyoïde en haut et le manubrium sternal en bas, avec pour limites latérales le bord latéral des muscles pré laryngés (m. sterno-hyoïdien).

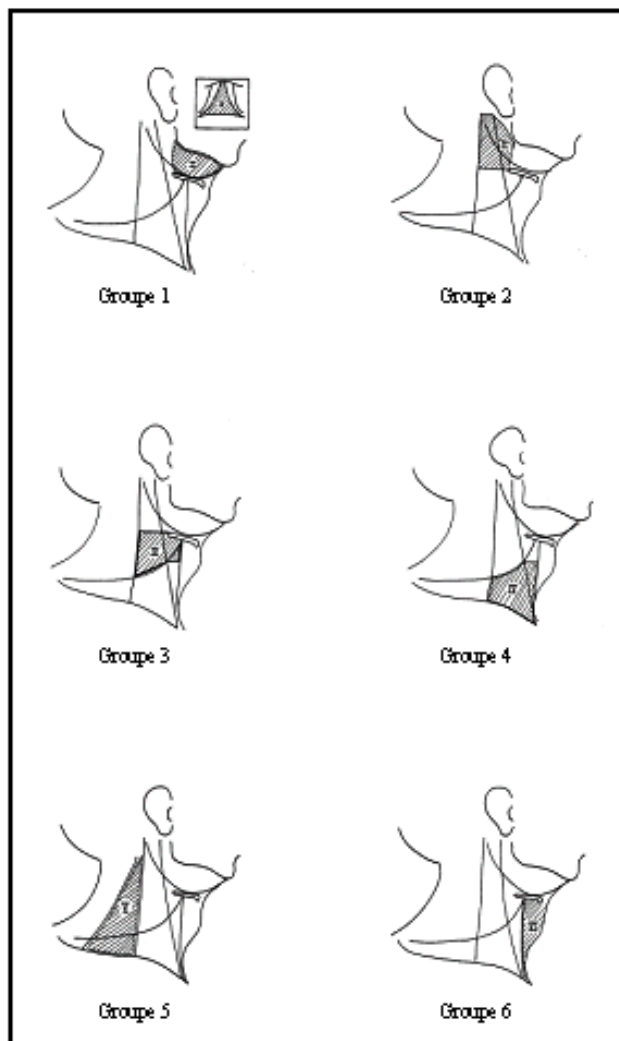


Figure 9 : Les différents groupes ganglionnaires du cou [19]

4.4. Innervation de la face :

L'innervation de la face est assurée par deux nerfs :

a) Le nerf trijumeau :

Le nerf trijumeau est un nerf mixte qui comprend une racine sensitive pour la face, les cavités buccales, nasales et sinusiennes, la langue et la dure-mère sus-tentorielle, ainsi qu'une racine motrice pour l'innervation des muscles masticateurs.

C'est le plus gros des nerfs crâniens et comporte trois branches : le nerf ophtalmique (V1), le nerf maxillaire (V2) et le nerf mandibulaire (V3). L'innervation sensitive de la face est tronculaire et organisée selon ces trois territoires, ce qui permet une anesthésie locorégionale pour la chirurgie cutanée, mais aussi le risque d'extension de certains cancers aux nerfs avec hypoesthésie ou anesthésie dans le territoire du nerf affecté. Cependant, l'innervation sensitive du pavillon auriculaire et de la région angulo-mandibulaire dépend du plexus cervical.

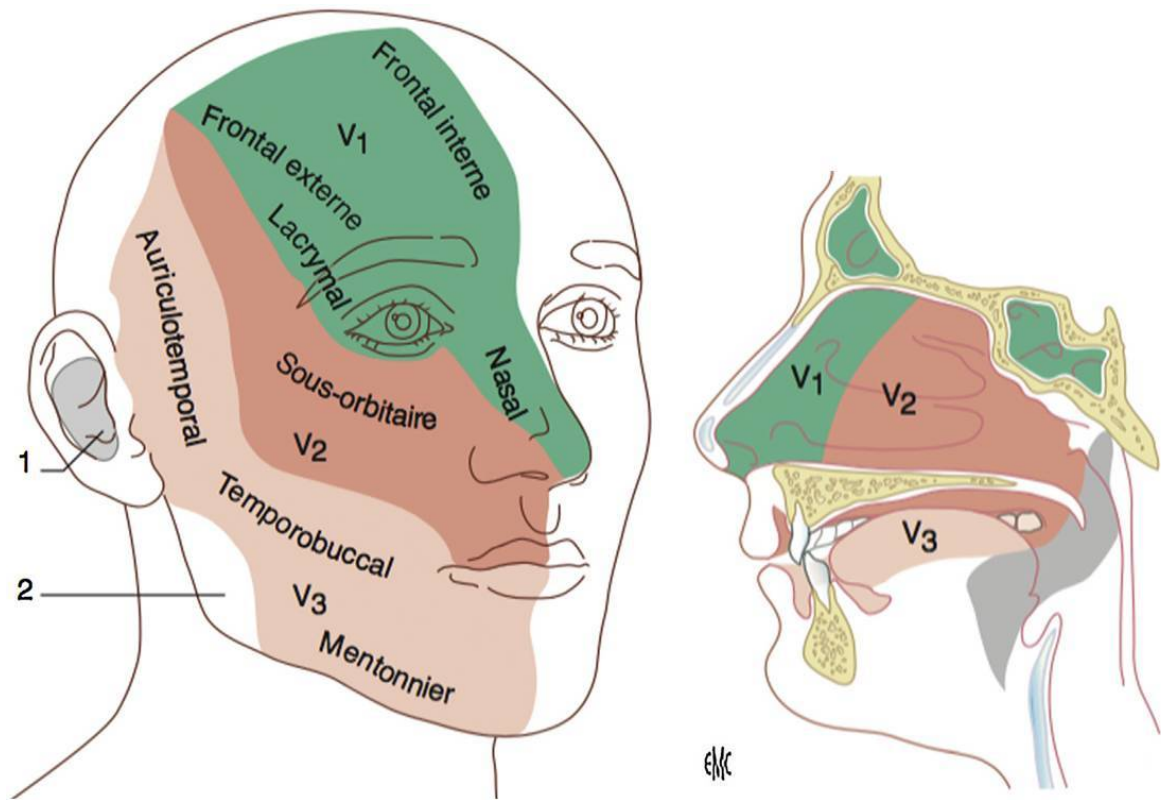


Figure 10: branches du nerf trijumeau [20]

1. La conque de l'oreille 2. l'encoche massétérine

b) Le nerf facial :

C'est le nerf moteur des muscles peauciers de la face et du cou et de la mimique. Il s'épanouit après sa sortie au niveau du trou stylo-mastoïdien en une série de branches dont deux seulement nous intéressent :

- la branche temporo-faciale
- la branche cervico-faciale

Le nerf facial présente des anastomoses avec : [21]

- Le nerf maxillaire (V3) via le nerf grand pétreux et le ganglion ptérygo-palatin.
- Le nerf glosso-pharyngien (IX) via le rameau communicant avec le nerf IX près du foramen stylo-mastoïdien et le plexus tympanique.
- Le nerf pneumogastrique (X) via le rameau communicant avec le nerf X.
- Le sympathique via des rameaux du plexus carotidien.
- Le plexus cervical via le rameau auriculaire et la branche cervico-faciale.

L'atteinte de ce nerf lors de son trajet donne la paralysie faciale périphérique, il peut être lésé aussi en cas de chirurgie maxillofaciale et ORL et en cas de plaie faciale ce qui peut laisser des séquelles fonctionnelles durable.

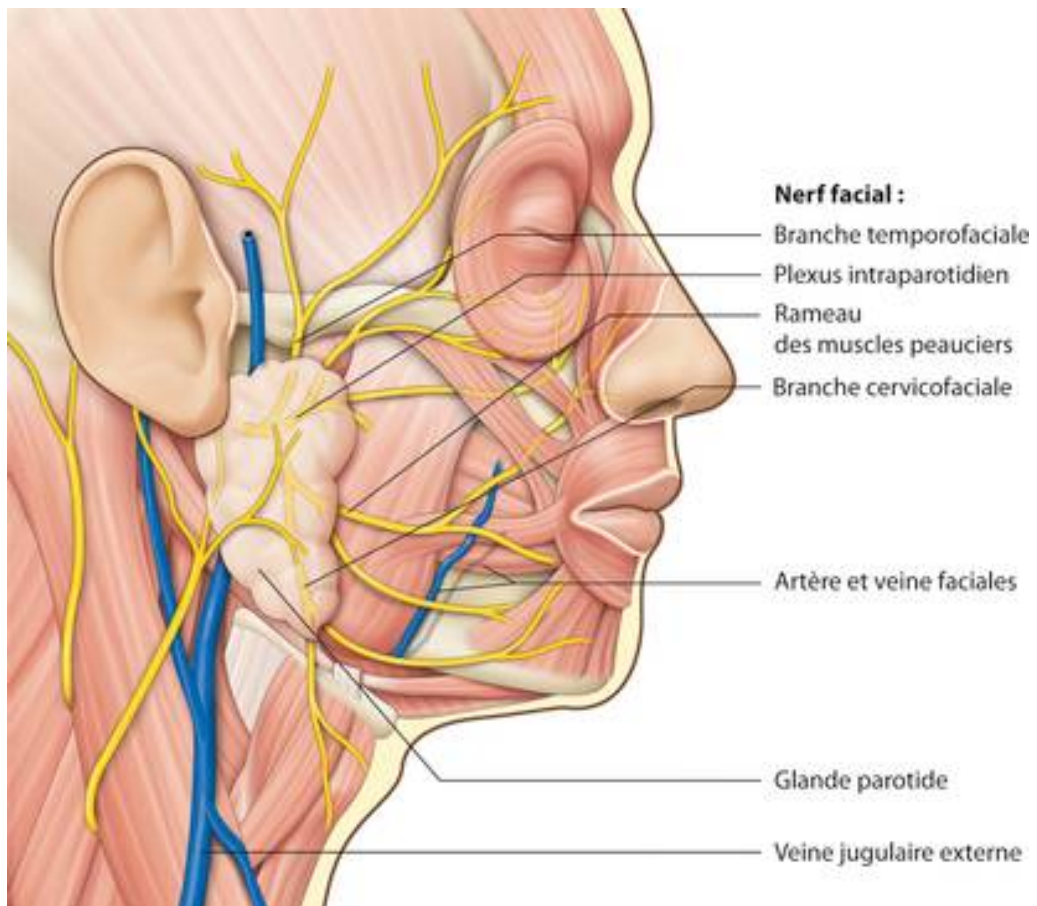


Figure 11: branches de nerf facial F. [22]

5. Anatomie fonctionnelle de la peau : [23]

La peau est la principale barrière qui sépare notre organisme du milieu extérieur et le protège de multiples agressions. Comme le reste du corps, l'anatomie de la peau du visage est constituée de trois couches de tissus : l'épiderme, le derme et l'hypoderme

❖ L'épiderme :

L'épiderme, est la couche la plus superficielle de la peau. C'est un épithélium stratifié (car composé de plusieurs couches cellulaires), squameux (car les cellules superficielles sont plates) et kératinisé (car il produit de la kératine). Il ne contient ni vaisseau sanguin ni vaisseau lymphatique, mais renferme de nombreuses terminaisons nerveuses libres. Il est recouvert d'un film hydrolipidique, le sébum, produit par les glandes sébacées du derme et qui le protège des agressions extérieures.

Dans l'épiderme (figure 12), on distingue 4 types de cellules :

- Les kératinocytes ;
- Les mélanocytes ;
- Les cellules de Langerhans
- Les cellules de Merkel

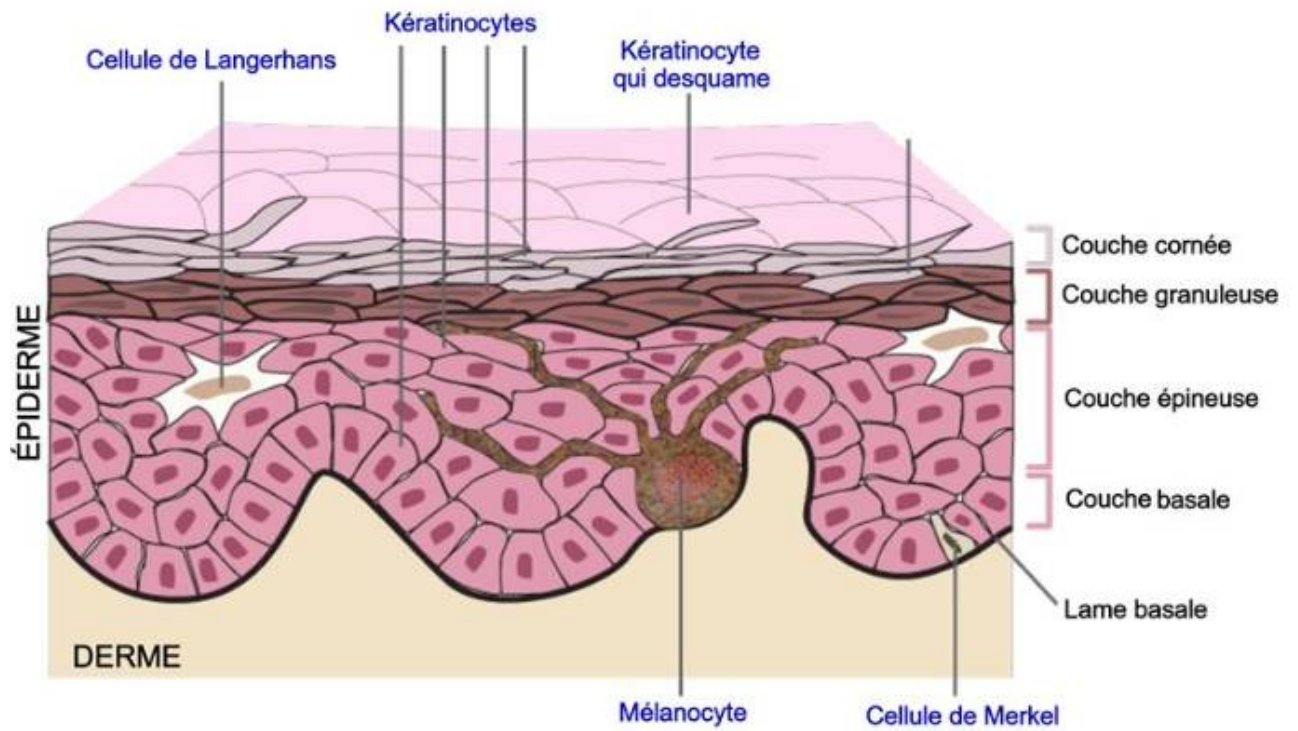


Figure 12: Coupe transversale de l'épiderme (source : cosmeticofficine)

❖ Le derme :

Le derme est 10 à 40 fois plus épais que l'épiderme. C'est un tissu conjonctif comprenant de nombreux capillaires sanguins et terminaisons nerveuses. Les fibroblastes y sont les principales cellules. Ce sont des cellules spécialisées dans la synthèse de deux types de fibres protéiques : les fibres de collagène et les fibres d'élastine, constituants principaux de la matrice extracellulaire. Les premières lui confèrent une résistance aux tensions et aux tractions, tandis que les secondes lui donnent des propriétés élastiques.

❖ L'hypoderme :

La couche la plus profonde de la peau. C'est un tissu adipeux, une couche composée de graisse. Elle est assez peu épaisse sur le visage.

Mais la peau du visage est aussi :

- **Plus fine** que le reste du corps. Environ 1,2 mm d'épaisseur, contre 3 à 4 mm selon les autres régions du corps.
- **Plus exposée** aux agressions extérieures : pollutions, soleil, changements climatiques, etc.
- **Plus sensible**, en raison de sa finesse et de son exposition constante aux agressions

✓ La vascularisation cutanée :

L'hypoderme est pauvrement vascularisé et n'est qu'une voie de transit pour les vaisseaux ; alors que l'épiderme est totalement avasculaire. Le derme est donc la structure nourricière essentielle de la peau qui contient les vaisseaux sous la forme de plexus plus ou moins denses, dans son épaisseur et sa face profonde. [24]

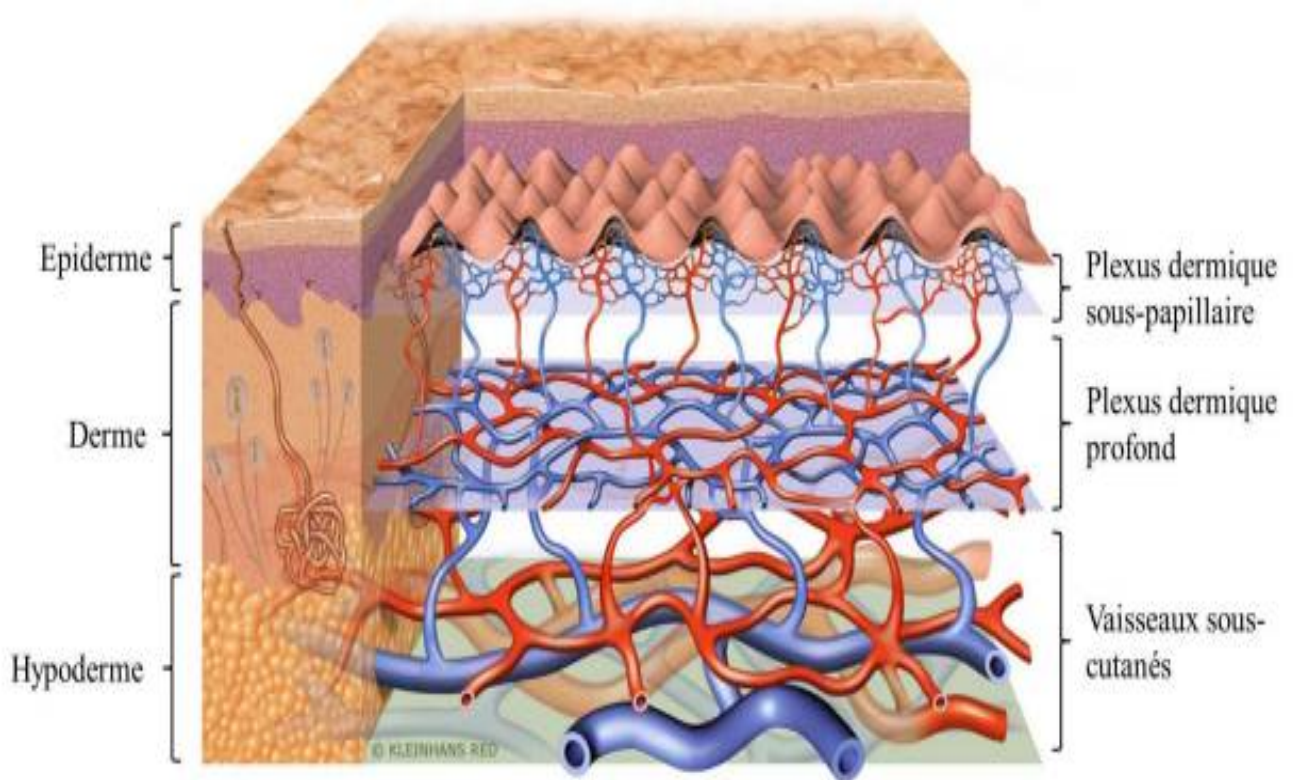


Figure 13: Plexus vasculaire de la peau [25]

Caractéristiques de la peau faciale : [26]

Le revêtement cutané facial est très spécifique. Ses caractéristiques varient de façon importante d'une région à l'autre. Elle comprend huit paramètres à analyser :

- ♣ Son épaisseur : non uniforme.
- ♣ Sa texture : grossière au niveau du nez.
- ♣ Son modèle : très élaboré au niveau du philtrum de la lèvre supérieure, des orifices nasaux ou de la face antérieure des oreilles.
- ♣ Sa pilosité : varie en fonction du sexe, de l'âge, du secteur anatomique.
- ♣ Sa coloration : plus marquée sur les pommettes ou sur le nez.
- ♣ Sa mobilité.
- ♣ Ses limites : ou zones de transition avec les muqueuses, le cuir chevelu.
- ♣ Sa tension : constante, variant selon les régions.



Lignes de moindre tension de la face
Orientation optimale des fuseaux d'excision

Figure 14: Lignes de moindre tension de la face [27]

Ces lignes sont parallèles aux rides d'expression et perpendiculaires aux muscles peauciers sous-jacents. Elles sont autant des éléments d'anatomie artistique que des repères chirurgicaux. On peut isoler des zones esthétiques qui devront toujours être considérées dans leur ensemble structural lors des actes chirurgicaux.

Les incisions idéales doivent suivre ces lignes garantissant un bon résultat esthétique. Toute cicatrice parallèle à ces lignes de tension sera *a priori* discrète; toute cicatrice perpendiculaire à ces lignes de tension risque de s'élargir. [10]

Les unités esthétiques : [8]

Ces sous unités esthétiques sont au nombre de 8 :

⊗ Frontal

⊗ Nasal

⊗ Sous orbitaire

⊗ Labiofiltrale

⊗ Menton

⊗ Malaire

⊗ Sous zygomatique

⊗ La sous unité du masque faciale

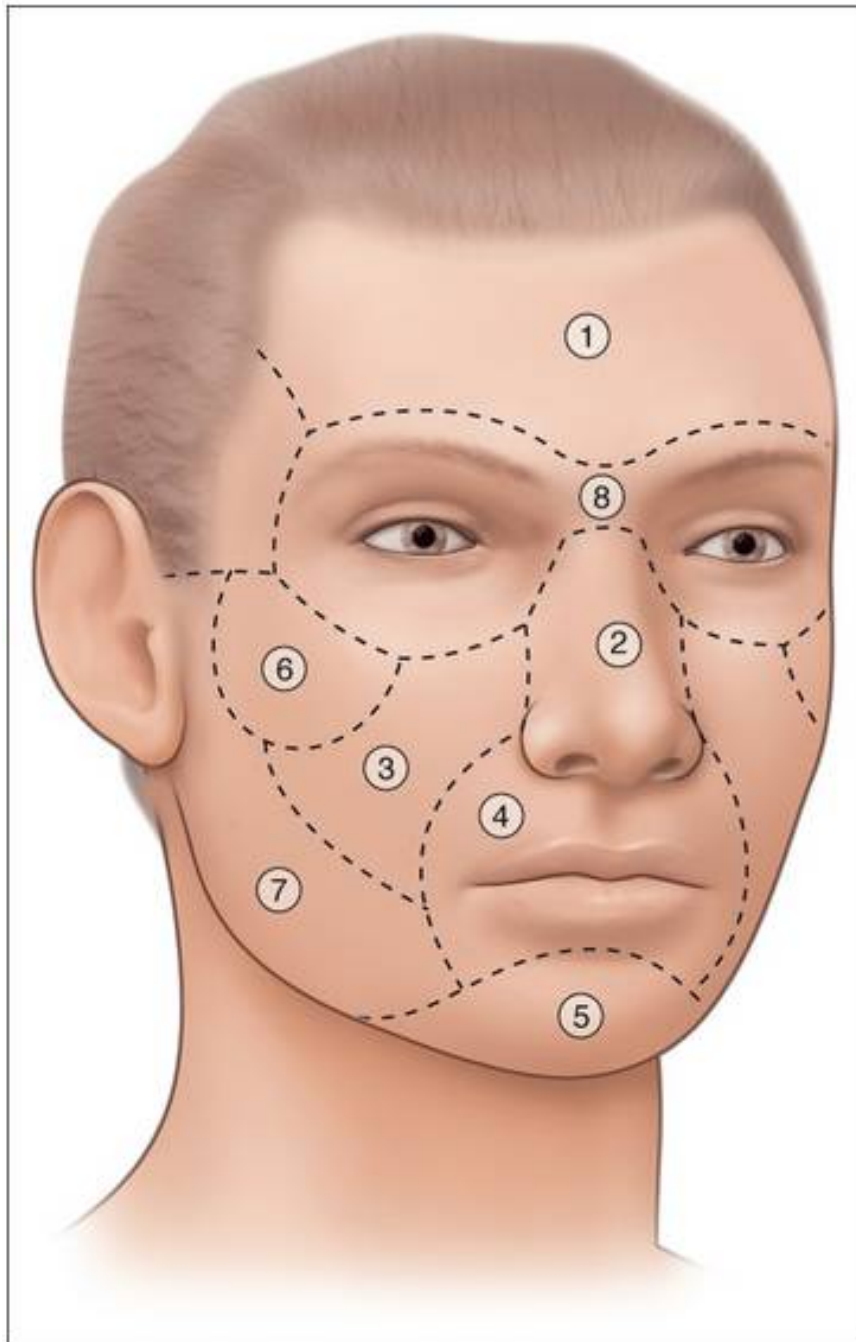


Figure 15: Les différentes sous-unités esthétiques faciales.[28]

1. Le front.
2. Le nez.
3. La région sous-orbitaire.
4. Le filtrum et les lèvres.
5. Le menton et l'angle cervico-mentonnier.
6. La région malaire.
7. La région sous-zygomatique.
8. Le masque facial.

III- Biomécanique de l'appareil manducateur :

Le mouvement mandibulaire est une série complexe d'activités de rotation et de translation tridimensionnelles qui dépendent les unes des autres. Il est contrôlé par les activités combinées et simultanées des deux articulations temporo-mandibulaires (ATM). Bien que les ATM ne puissent pas fonctionner de manière complètement indépendante l'une de l'autre, elles ne fonctionnent rarement avec des mouvements simultanés identiques.

Pour mieux comprendre la complexité du mouvement mandibulaire, il est nécessaire d'abord d'isoler les mouvements qui se produisent dans une seule ATM. Les différents types de mouvements sont d'abord examinés, puis les mouvements tridimensionnels de l'articulation sont divisés en mouvements dans un seul plan.

A/ Les différents types de mouvements mandibulaires :

1) Les mouvements élémentaires :

Deux types de mouvements se produisent dans l'articulation temporo-mandibulaire : les mouvements de rotation et de translation.

a) Mouvement de rotation :

Selon le dictionnaire médical de Dorland, la rotation est définie comme "un processus de tourner autour d'un axe, un mouvement d'un corps autour de son axe." [29]

La rotation dans le système masticatoire se produit lors de l'ouverture et de la fermeture de la bouche, où les dents sont séparées puis occlues sans que la position des condyles ne change.

Dans l'articulation temporo-mandibulaire, la rotation se produit à l'intérieur de la cavité inférieure, c'est-à-dire entre la surface supérieure du condyle et la surface inférieure du disque articulaire.

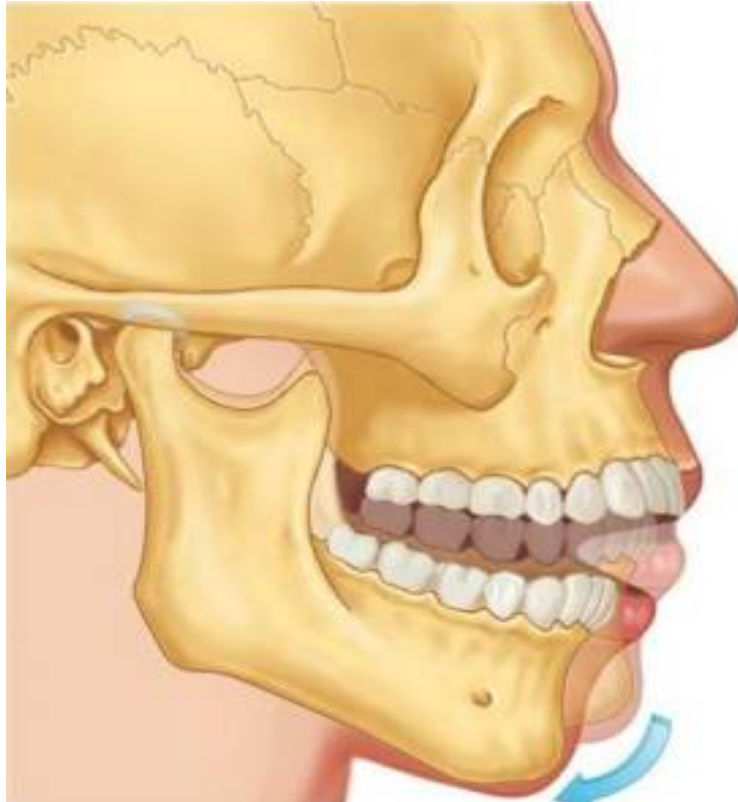


Figure 16: Mouvement de rotation autour d'un point fixe du condyle

b) Mouvement de translation :

Lors de la translation dans le système masticatoire, tous les points de la mandibule se déplacent simultanément dans la même direction et à la même vitesse, comme dans le cas de la protrusion. Les dents, les condyles et les branches se déplacent ensemble dans la même direction et à la même intensité.

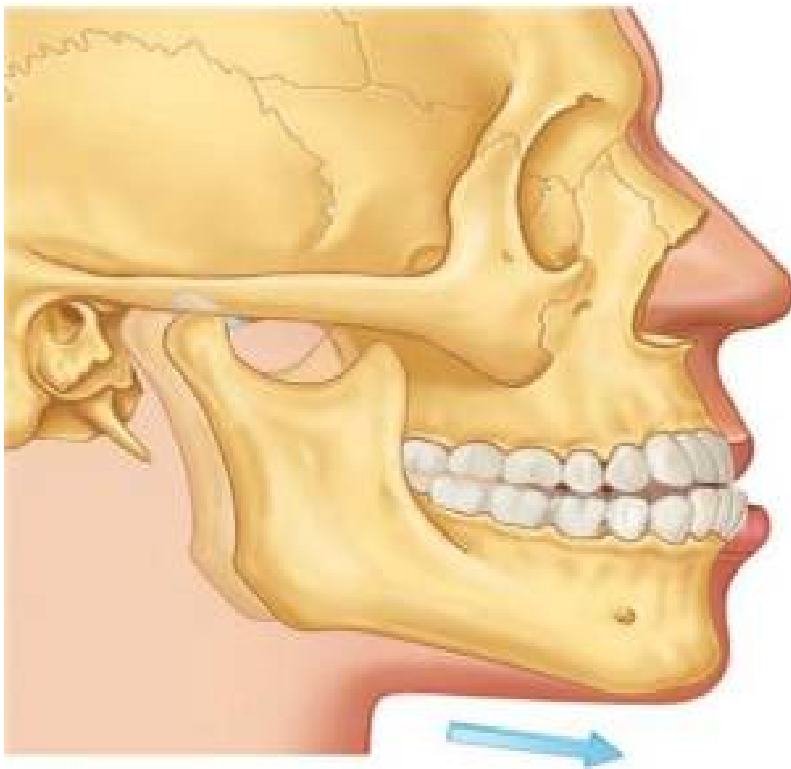


Figure 17: Mouvement de translation de la mandibule

Lors de mouvements normaux de la mandibule, la translation se produit simultanément avec la rotation dans la cavité supérieure de l'articulation temporo-mandibulaire. Elle se produit entre la surface supérieure du disque articulaire et la surface inférieure de la fosse articulaire, c'est-à-dire entre le complexe disque-condyle et la fosse. [30]

En d'autres termes, les mouvements de la mandibule se caractérisent par une combinaison de rotation et de translation, ce qui rend la compréhension de ces mouvements complexe. La rotation se produit autour de l'axe de la mandibule, tandis que la translation est un déplacement de l'axe dans l'espace. Les deux mouvements se produisent simultanément, ce qui rend la visualisation des mouvements mandibulaires difficile.

c) **Mouvements de la mandibule dans un seul plan :**

Le mouvement de la mandibule est limité par les ligaments et les surfaces articulaires des ATM, ainsi que par la morphologie et l'alignement des dents.

Lorsque la mandibule se déplace dans toute l'amplitude du mouvement, il en résulte des limites reproductibles et descriptibles, appelées mouvements limites. Les mouvements limites et les mouvements fonctionnels typiques de la mandibule sont décrits pour chaque plan de référence.

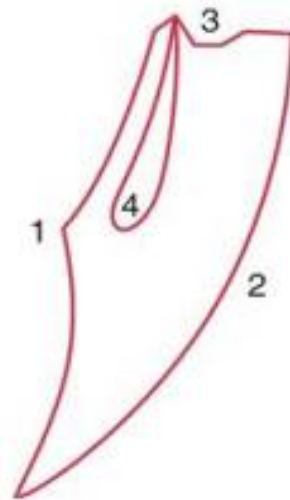


Figure 18: Bordure et mouvements fonctionnels dans le plan sagittal

1. bord d'ouverture postérieur ; 2. bord d'ouverture antérieur ; 3. bord de contact supérieur ; 4. mouvement fonctionnel typique

L'amplitude des mouvements des bords d'ouverture postérieurs et antérieurs est déterminée, ou limitée, principalement par les ligaments et la morphologie des ATM. Les mouvements de la bordure de contact supérieure sont déterminés par les surfaces occlusales et incisives des dents. Les mouvements fonctionnels ne sont pas considérés comme des mouvements limites, car ils ne sont pas déterminés par une amplitude de mouvement extérieure. Ils sont déterminés par les réponses conditionnelles du système neuromusculaire.

d) Mouvements de la bordure d'ouverture postérieure :

Les mouvements du bord d'ouverture postérieur dans le plan sagittal se produisent comme des mouvements de charnière en deux étapes.

Dans la première étape, les condyles sont stabilisés dans leur position la plus supérieure dans les fosses articulaires (c'est-à-dire la position charnière terminale). La position condylienne la plus supérieure à partir de laquelle un mouvement de l'axe de la charnière peut se produire est la position de relation centrée (CR). La mandibule peut être abaissée (ouverture de la bouche) dans un pur mouvement de rotation sans translation des condyles.

Théoriquement, un mouvement de charnière (rotation pure) peut être généré à partir de n'importe quelle position mandibulaire antérieure à la CR ; pour que cela se produise, cependant, les condyles doivent être stabilisés afin qu'il n'y ait pas de translation de l'axe horizontal. Comme cette stabilisation est difficile à établir, les mouvements du bord d'ouverture postérieur qui utilisent l'axe de charnière terminal sont le seul mouvement d'axe de charnière répétable de la mandibule

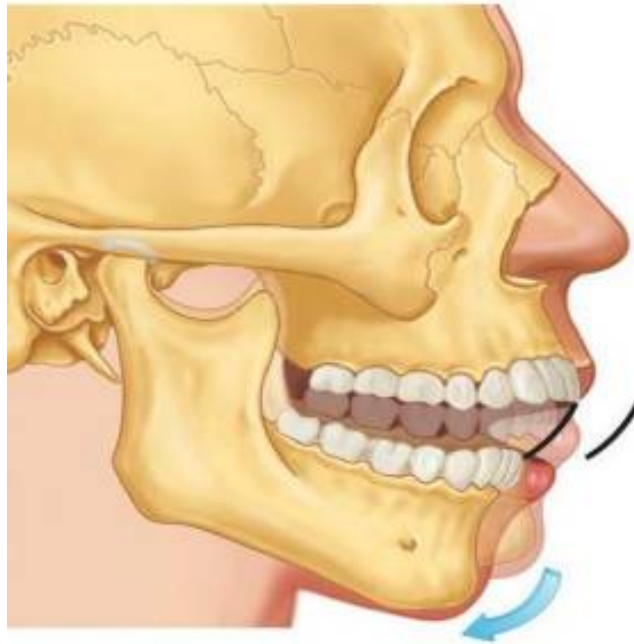


Figure 19: Mouvement de rotation de la mandibule avec les condyles en position charnière terminale

Cette ouverture en rotation pure peut se produire jusqu'à ce que les dents antérieures soient distantes de quelque 20 à 25 mm.

En CR, la mandibule peut être tournée autour de l'axe horizontal jusqu'à une distance de seulement 20 à 25 mm, mesurée entre les bords incisifs des incisives maxillaires et mandibulaires. À ce point d'ouverture, les ligaments temporo-mandibulaires se resserrent, après quoi la poursuite de l'ouverture entraîne une translation antérieure et inférieure des condyles. Au fur et à mesure que les condyles se translatent, l'axe de rotation de la mandibule se déplace dans les corps des ramis, ce qui entraîne la deuxième étape du mouvement du bord d'ouverture postérieur (figure ci-dessous).

L'ouverture maximale est atteinte lorsque les ligaments capsulaires empêchent tout mouvement 36 supplémentaire au niveau des condyles. L'ouverture maximale se situe entre 40 et 60 mm, mesurée entre les bords incisifs des dents maxillaires et mandibulaires.

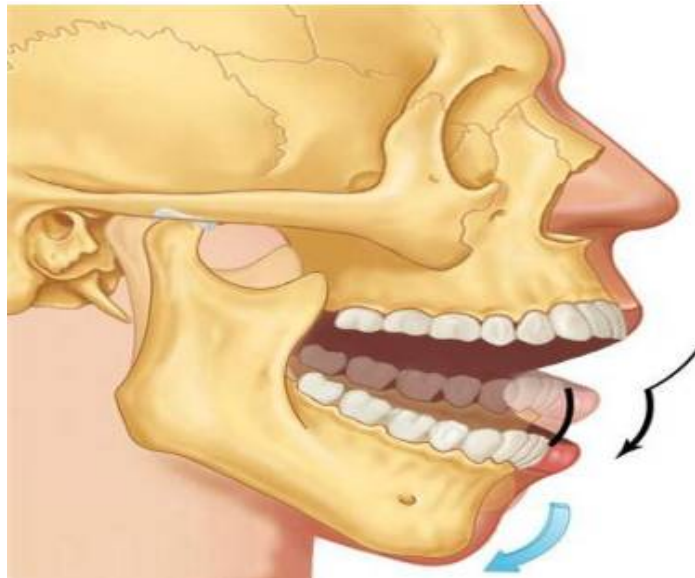


Figure 20: Deuxième étape du mouvement de rotation pendant l'ouverture

e) Mouvements de la bordure d'ouverture antérieure :

Lorsque la mandibule est ouverte au maximum, la fermeture accompagnée de la contraction des ptérygoïdes latéraux inférieurs (qui maintiennent les condyles en position antérieure) génère le mouvement du bord antérieur de fermeture. En théorie, si les condyles étaient stabilisés dans cette position antérieure, un mouvement de charnière pure pourrait se produire pendant que la mandibule se ferme de la position d'ouverture maximale à la position de protrusion maximale. Comme la position de protrusion maximale est déterminée en partie par les ligaments stylo mandibulaires, lors de la fermeture, le resserrement des ligaments produit un mouvement postérieur des condyles. La position condylienne est la plus antérieure dans la position d'ouverture maximale

mais pas dans la position de protrusion maximale. Le mouvement postérieur du condyle de la position d'ouverture maximale à la position de protrusion maximale produit une excentricité dans le mouvement du bord antérieur. Il ne s'agit donc pas d'un mouvement de charnière pur.

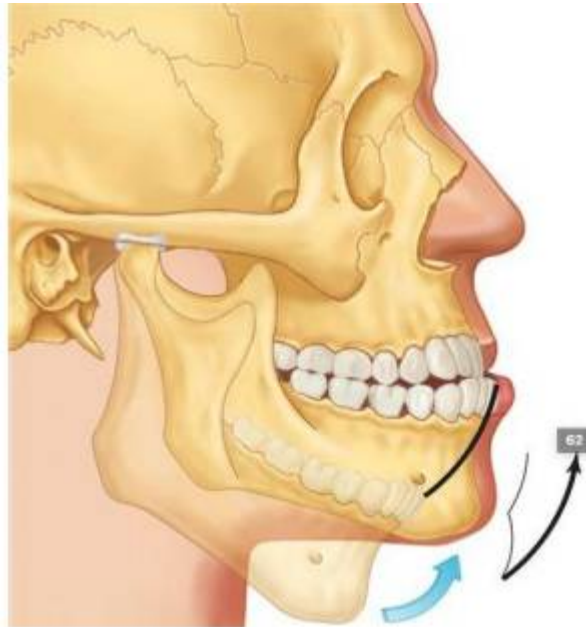


Figure 21: Mouvement du bord de fermeture antérieur dans le plan sagittal

f) Mouvements de la bordure de contact supérieure :

Le mouvement de la bordure de contact supérieure se produit lors de la fermeture de la bouche et il est déterminé par les caractéristiques de la forme et de la disposition des dents supérieures. La quantité de variation de la fermeture dentaire, la rigidité des inclinaisons cuspidiennes des dents postérieures, la quantité de chevauchement vertical et horizontal des dents antérieures, la morphologie linguale des dents antérieures et les relations générales entre les dents sont tous des facteurs qui peuvent influencer la délimitation précise de ce mouvement. Les modifications dentaires peuvent entraîner des modifications dans la nature de ce mouvement.

2) Les mouvements fondamentaux : [31]

a) Mouvements d'ouverture-fermeture :

Les mouvements d'ouverture-fermeture se composent de 3 stades :

- ✓ Le premier stade est un mouvement de rotation autour d'un axe transversal au centre des condyles, entraînant une ouverture de la bouche d'environ 2 à 4 mm.
- ✓ Le deuxième stade comporte deux mouvements simultanés : la rotation condylo-méniscale et la translation temporo-méniscale, permettant une ouverture de la bouche de 4 cm.
- ✓ Le troisième stade est un mouvement supplémentaire et volontaire. Les muscles masséters et ptérygoïdes se relâchent, ce qui entraîne une contraction des muscles ptérygoïdiens externes et un mouvement de translation antérieure du ménisque ainsi que de rotation postérieure du condyle.

Les mouvements qui en résultent consistent en la translation antérieure du ménisque ainsi que la rotation postérieure du condyle.

b) Mouvements de l'ATM pour la propulsion – rétropulsion de la mandibule :

Le mouvement de propulsion de la mandibule est causé par la translation du ménisque et du condyle. Ce mouvement est associé à une descente de la mandibule, la profondeur de laquelle dépend de plusieurs facteurs. Lors de la propulsion maximale, le côté antérieur du condyle appuie sur le ménisque et sur le tubercule articulaire. La rétropulsion de la mandibule est obtenue par le mouvement vers l'arrière du ménisque et du condyle, suivant un plan incliné d'environ 40° à 45° par rapport au plan d'occlusion.

Les mouvements latéraux :

Les mouvements latéraux de la mandibule sont réalisés en faisant glisser le condyle et le ménisque d'un côté, tandis que le condyle de l'autre côté reste en place ou se déplace légèrement vers l'arrière. Lors d'un mouvement latéral vers la droite, le condyle et le ménisque gauches se déplacent vers l'avant, vers le bas et vers l'intérieur en formant un angle de 15° avec le plan médian sagittal. Le condyle droit reste en place ou bouge peu, formant l'axe autour duquel se déroule ce mouvement latéral vers la droite. Le mouvement latéral vers la gauche est réalisé de manière similaire, avec le condyle gauche jouant un rôle central. L'amplitude des mouvements latéraux diminue avec l'ouverture de la bouche ou avec la rétropulsion mandibulaire.

B/ Cinématique mandibulaire : La position de repos : [32]

La position de repos est la position statique de la mandibule, conditionnée par les facteurs neuromusculaires. La position de repos physiologique se produit lorsque la tête est droite et que les muscles impliqués (principalement les muscles de levée et de descente) sont en équilibre avec une tonicité minimale. Les condyles n'ont alors aucune contrainte dans leur cavité glénoïde. Tous les mouvements de la mandibule démarrent à partir de cette position de repos, avec une mince marge d'inocclusion d'environ 2 mm.



PARTIE 2 : IMPRESSION 3D



I. Historique : [33], [34]

Il est important de rappeler que l'impression 3D a été créée il y a plus de 35 ans.

En 1984, aux Etats-Unis, l'ingénieur américain Chuck Hull dépose le brevet sur la technique d'impression 3D de stéréolithographie (SLA pour Stéréolithographie Apparatus). [35]

Ce brevet donnera non seulement le nom de l'extension du fichier d'impression .stl, mais aussi la fondation de son entreprise 3D Systems Corporation®, et le lancement de la SLA-1, première imprimante 3D commercialisée, en 1987.

En 1988, à l'Université de Texas, Carl Deckard a déposé un brevet pour la technologie de Frittage Sélectif par Laser, ou SLS (Selective Laser Sintering), une autre méthode d'impression 3D qui consiste à fusionner localement des grains de poudre ensemble à l'aide d'un laser.

En 1989, Scott Crump remplit un brevet d'impression par Dépôt de Fil ou FDM (Fused Deposition Modeling). La même année, il a fondé avec sa femme Lisa Crump la société StrataSys®, qui a produit en série la première imprimante 3D FDM. [36]

Cela marquera fortement l'impression 3D, car le dépôt de fil sera l'un des plus populaires techniques dans le monde de la fabrication additive. [37]

En moins de dix ans, les trois principales méthodes d'impression 3D furent brevetées, ce qui marqua la naissance de l'impression 3D

En 1995, c'est la technologie d'impression 3D métallique ou DMLS

(Direct Metal Laser Sintering) qui fait son apparition, mis au point à « Massachusetts Institute of Technology », qui a fondé la société Z Corporation®. Ce procédé vise à projeter de la glue sur une fine surface de poudre destinée uniquement au monde industriel.

Les années **2000** marqueront véritablement un tournant dans l’histoire de l’impression 3D et sa “popularisation”. Plusieurs innovations marquantes, notamment pour le secteur médical, propulsent la découverte de l’impression tridimensionnelle par le grand public. [37]

Parmi ces innovations, on compte la fabrication d’un rein fonctionnel en 2000.

8 ans plus tard, les médias relaient également massivement la fabrication du premier membre prothétique imprimé en 3D. Ces premières innovations dans le secteur médical ouvriront la voie à beaucoup d’autres, ainsi qu’à de nouvelles applications de ce procédé de fabrication dans diverses industries.

En 2005 la société Z Corporation® lance la Spectrum Z510, la première imprimante 3D couleur en haute définition.

A partir des années **2010**, d’autres brevets tombent dans le domaine public, à l’image des brevets SLS ou SLM. La création de toutes sortes d’objets et pièces par la fabrication additive devient alors une réalité accessible à tout professionnel ou particulier.

C’est lors de cette décennie que l’impression 3D va véritablement prendre de l’ampleur autant auprès du public qu’auprès des entreprises.

En **2011**, on voit apparaître des initiatives dans l’impression 3D alimentaire. C’est le cas avec l’impression 3D de sucre/chocolat...

Il est impossible de parler de l'impression 3D, de ses origines et de son histoire sans se projeter en parallèle sur son avenir et ses perspectives d'évolution.

C'est un marché qui est d'ailleurs en fort développement. En 2020, la croissance de l'impression 3D atteint 52% (à titre de comparaison, elle était de 17% en 2015). Le recours à cette méthode de fabrication est encore majoritairement lié au prototypage produit, ou encore à la production de pièces en petites et moyennes séries. Mais elle tend à se développer vers d'autres usages, et les secteurs d'activité utilisant cette technique sont de plus en plus nombreux. [37]



Figure 22: Imprimante SLA 250, première imprimante 3D commercialisée en 1988 [38]

Plusieurs secteurs de santé ont été impactés par cette nouvelle méthode de production. A ce jour, différents types de produits de santé sont créés par impression 3D : dispositifs médicaux, médicaments, et même tissus et organes.

La puissance de l'impression 3D est significative, mettant ainsi en question certains procédés industriels et permettant de construire :

- Des formes géométriques complexes ou imbriquées
- Des pièces d'un seul tenant (clé à molette, ...
- Des objets uniques et précis
 - Dentisterie : bridges, couronnes ;
 - Orthodontie
 - Reconstruction mammaire ...
- Des implants sur mesure
- Les modèles anatomiques
- Des organes humains (bio-printing)
- La fabrication de médicaments

II. Processus d'impression 3D

1. Definition :

L'impression 3D, aussi connue sous le nom de fabrication additive, est un processus de création d'objets en 3D en ajoutant des couches de matériaux. C'est une alternative à la fabrication soustractive qui consiste à enlever de la matière, telle que l'usinage. [39]

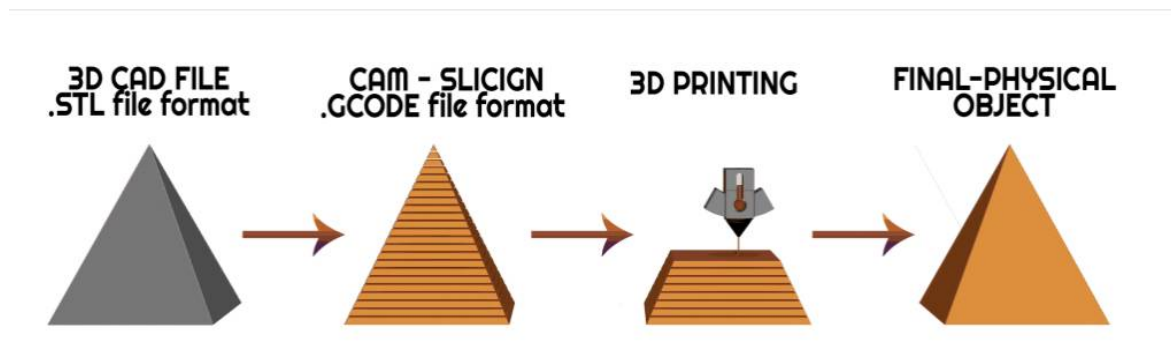


Figure 23: l'impression 3D en 4 étapes [40]

L'impression 3D est utilisée pour produire des pièces en volume à partir de données numériques, telles que des images volumiques ou surfaciques (tomodensitomètre, IRM, Cone Beam, scanner optique, échographie). Les fichiers sont convertis en fichiers 3D grâce à des logiciels spécialisés. [41]

Ces logiciels permettent de réaliser une segmentation de l'image source (séparation des zones et/ou des tissus d'intérêt) et/ou de concevoir divers objets en 3D. Sur la base de cette préparation virtuelle, l'imprimante 3D dépose ou solidifie la matière couche par couche jusqu'à l'obtention de l'objet final.

2. Etapes du processus d'impression 3D

Les étapes du processus général d'impression peuvent être synthétisées selon le schéma ci-dessous :

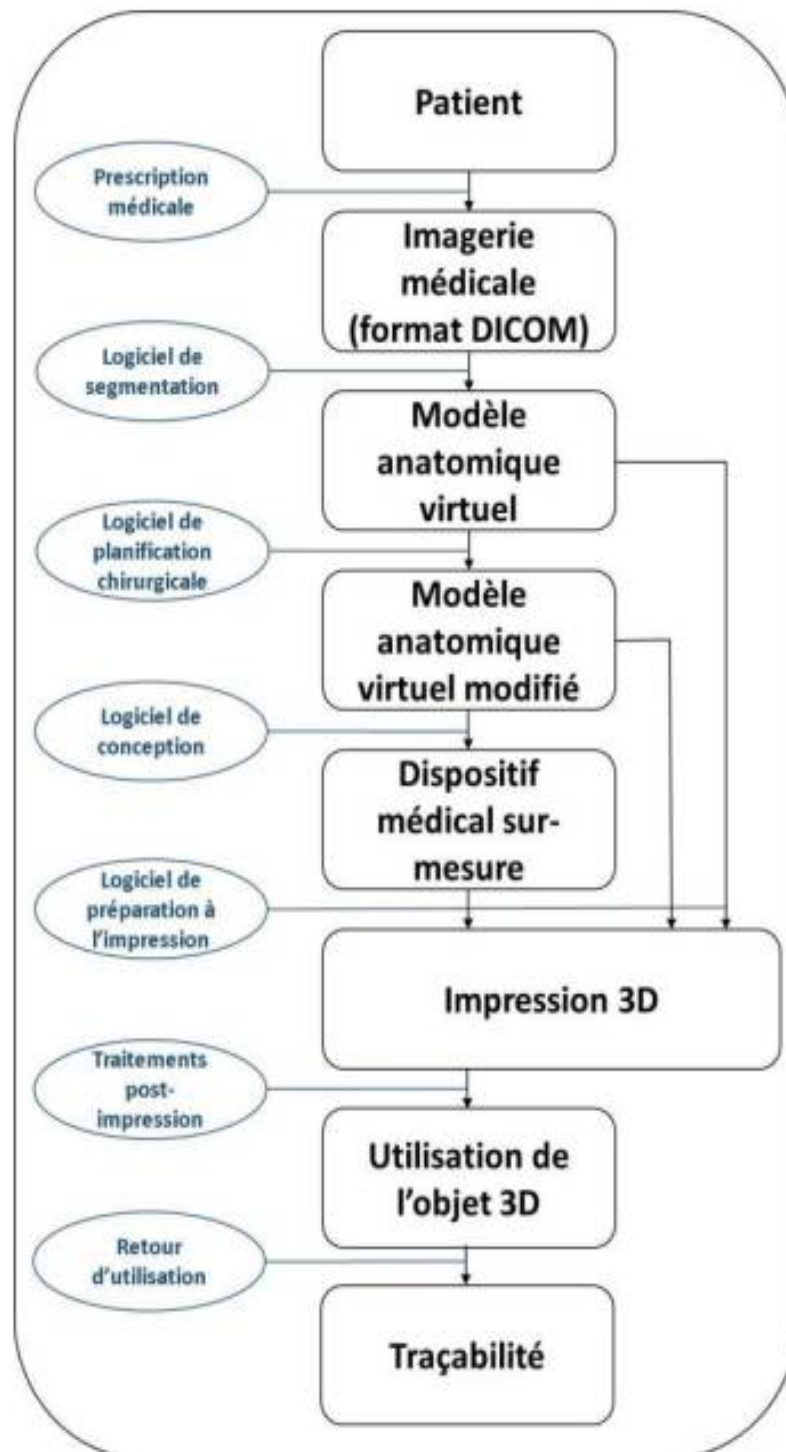


Figure 24: Schéma montrant les étapes du processus d'impression [41]

Les étapes du processus sont les suivantes : acquisition d'images ; traitement des images : segmentation (manuelle, semi-automatique ou automatique) ; conversion en fichier STL (ou autre) ; optimisation et correction du fichier (réparation des erreurs de conversion, élaboration des supports d'impression si nécessaire) ; impression ; procédures de post-traitement (élimination des supports le cas échéant, cuisson complémentaire si nécessaire, polissage de la pièce) ; validation et contrôle qualité ; emballage (si nécessaire) ; stérilisation (si nécessaire) et livraison.

En 2018, la Radiological Society of North America (RSNA) a élaboré des lignes directrices sur les bonnes pratiques (méthode du consensus) pour une utilisation appropriée de l'impression 3D. Ces directives décrivent les approches et les outils impliqués dans le processus d'impression 3D, en commençant par l'acquisition d'images, la segmentation de l'anatomie souhaitée à imprimer, la création d'un modèle 3D imprimable et le traitement ultérieur du modèle anatomique imprimé ou imprimé en 3D pour les soins aux patients.

Les données volumétriques des patients obtenues après imagerie médicale sont traduites au format DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine), puis segmentées et rendues en 3D pour la planification chirurgicale virtuelle (VSP) et la conception d'implants spécifiques au patient (PSI). Les modèles et les implants sont imprimés en 3D, stérilisés et ensuite utilisés pour la chirurgie.

Ces différentes étapes sont décrites dans la littérature [41]

- Acquisition d'images médicales :

Les modalités d'imagerie les plus fréquentes sont le scanner et l'IRM ; d'autres données d'imagerie 3D incluant l'échographie, le Cone Beam et les techniques de scanner surfacique (optique ou infrarouge) peuvent être utilisées. Les fichiers d'images médicales sont habituellement au format DICOM et sont ensuite segmentés et transformés en formats informatiques reconnus par l'imprimante : par exemple Standard Tessellation Language (STL), OBJ, VRML/WRL, AMF, 3MF, ou X3D. Ces fichiers 3D pourront être archivés (par exemple dans le dossier médical du patient).

Afin d'acquérir des images de qualité, et faciliter la segmentation et l'impression 3D, les recommandations sont les suivantes :

- Optimisation de la résolution spatiale et de l'épaisseur de coupe lors de l'acquisition en prenant en compte l'exposition aux radiations
- Utilisation de rapports SNR (rapport signal/bruit) et CNR (rapport contraste/bruit) comparables ou supérieurs à ceux utilisés pour la visualisation 3D sur écran
- Définition de la zone d'intérêt à imprimer en 3D
- Réduction des artefacts (notamment métalliques au niveau dentaire)
- Interprétation de l'image et stockage des données sur un support permettant leur exportation (PACS, CD, clé USB, disque dur externe).

- Importation des données DICOM sur un ordinateur équipé d'un logiciel de segmentation destiné à isoler la structure et/ou la zone d'intérêt (os, tumeur, parties molles, organe) de son environnement anatomique. Discussion interprofessionnelle (ingénieur et/ou technicien/chirurgien) sur le projet (but,

type d'objet à imprimer, destination, caractéristiques géométriques, technique et matériaux à utiliser, délai de production) et simulation chirurgicale préalable le cas échéant à l'aide d'un logiciel spécifique.

- Transformation des données DICOM en fichier STL imprimable ; correction des erreurs de transformation grâce à un logiciel dédié et/ou conception numérique (CAO) d'un objet ou d'un DM à l'aide d'un logiciel spécifique et transformation de l'objet ou du DM en fichier STL imprimable.

- Injection du fichier STL dans le logiciel de l'imprimante et détermination des paramètres d'impression (résolution et épaisseur de couches en fonction de la précision de l'objet souhaitée, températures du plateau, de la chambre d'impression et de la buse en fonction du matériau et de la technique utilisés, détermination des supports d'impression).

- Impression

- Etapes ultérieures après impression (post-traitement) en fonction de la technique d'impression et des matériaux utilisés ainsi que des recommandations du fabricant : nettoyage/lavage, élimination du raft et des supports, cuisson/durcissement complémentaires, polissage, inspection de la pièce, emballage, stérilisation, traçabilité, gestion documentaire, archivage, livraison à l'utilisateur et discussion interprofessionnelle (ingénieur/chirurgien) si besoin.

Les imprimantes doivent subir des nettoyages et des tests réguliers de qualité d'impression, de précision et de calibration.

La réalité virtuelle (RV) est utilisée pour une évaluation et une simulation plus poussée avant la chirurgie. La réalité augmentée (AR) peut aider l'équipe chirurgicale pendant l'opération.

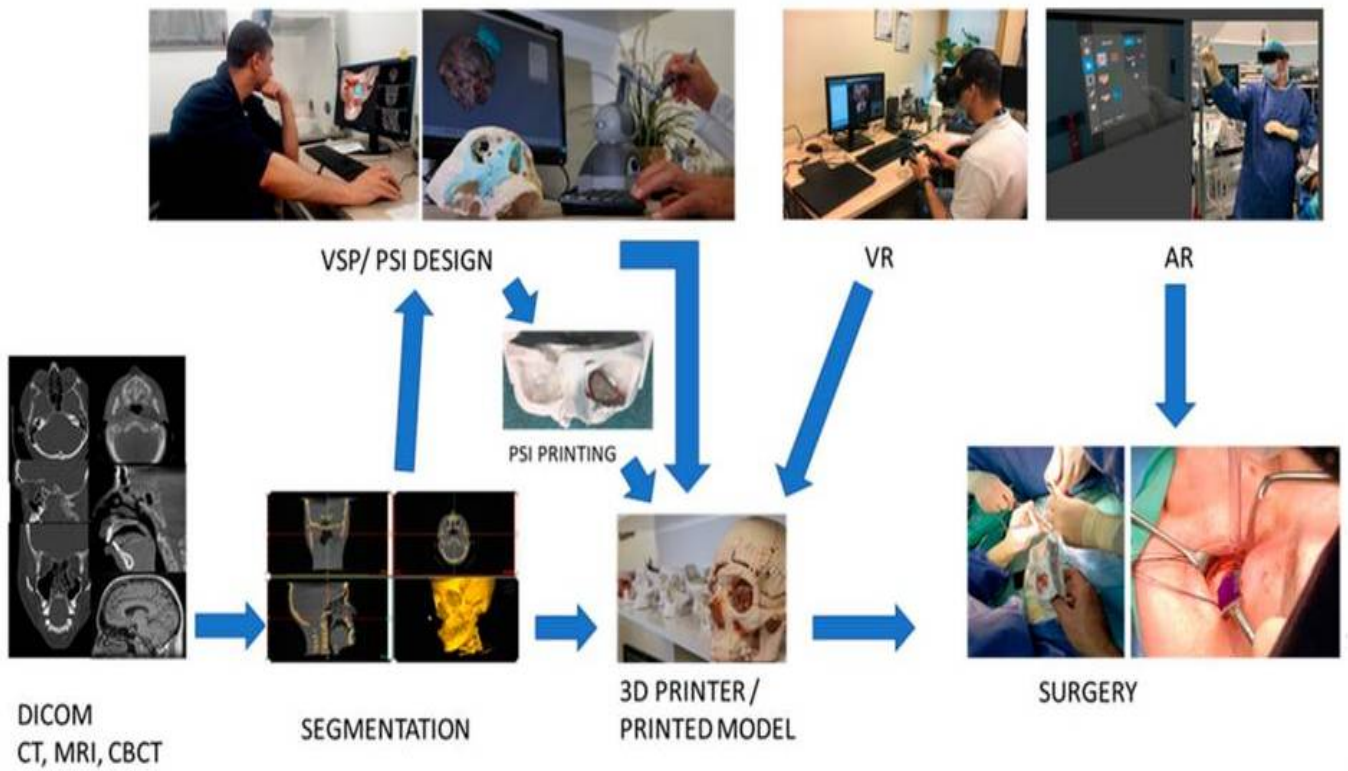


Figure 25: processus d'impression 3D [42]

III. Logiciels :

Grâce aux logiciels de modélisation 3D, il est désormais possible de faire plusieurs modèles 3D et d'essayer de nouvelles choses et de nouvelles méthodes.

Il existe différents types de logiciels pour le secteur médical, tout dépend de ce qui est prévu de faire, imprimer en 3D ou bien obtenir un modèle 3D pour une meilleure visualisation ; Peut-être les deux.

Avant d'utiliser un logiciel de modélisation 3D, le pratiquant doit faire attention au format du fichier qu'on souhaite importer. La plupart du temps, les scans sont au format DICOM, un format qui n'est pas reconnu par la plupart des logiciels de modélisation 3D. Cela ne veut pas dire qu'on ne peut pas utiliser un logiciel de modélisation traditionnel pour la modélisation ou l'impressions 3D médicales. Mais il faudra simplement utiliser un autre logiciel afin de convertir le fichier au bon format.

Voici quelques principaux logiciels utilisés en chirurgie maxillo-faciale :

1. OsiriX : [43]

Osirix est un outil d'imagerie diagnostique, d'enseignement et de recherche, qui présente de nombreuses applications possibles dans le champ de la chirurgie maxillofaciale et de la stomatologie.

Le projet démarre en novembre 2003 et une première version est rendue publique en avril 2004.

Il s'agit d'un logiciel fonctionnant sur Mac et développé par le Dr Antoine Rosset et le Pr Otman Ratib du département de radiologie et d'informatique médicale des hôpitaux universitaires de Genève (Suisse).

Osirix est capable de recevoir des images transférées suivant le protocole de communication DICOM, ensuite de reconstituer des vues 3D à partir de coupes de scanner, et de les exporter dans un format reconnu par les logiciels 3D

À l'occasion de la *Apple Worldwide Developers Conference de juin 2005*, OsiriX est récompensé dans les catégories *Best Use of Open Source et Best Mac OS X Scientific Computing Solution*.

Aujourd'hui, OsiriX a plus de 17 ans de succès avec plus de 700 000 utilisateurs et compte plus de 20 000 téléchargements par mois. Il est utilisé dans plus de 170 pays dans 50 000 institutions.



Figure 26: modèle 3D d'une Réparation chirurgicale des déformations faciales logiciel Osirix [43]

2. 3D doctor :

Comme son nom l'indique, 3D-Doctor est un logiciel de modélisation 3D, spécialement conçu pour le secteur médical, et plus particulièrement pour les simulations chirurgicales et les traitements. Ce logiciel est développé par Able Software Corp.

Avec 3D-Doctor, il est possible de travailler sur différents formats, comme le format DICOM, TIFF, Interfile, GIF, JPEG, PNG, BMP, PGM, MRC, RAW ou autres et d'exporter ensuite le travail au format STL très facilement. [44]

3D-DOCTOR est développé à l'aide de technologies orientées objet qui rendent le logiciel hautement efficace pour traiter et manipuler des images 3D et d'autres éléments de données associés dans un environnement intégré.

Le fonctionnement du logiciel 3D-DOCTOR : (voir la figure ci-dessous) [45] :

a. Ouvrir le fichier image :

Utilisez la commande Fichier/Nouvelle pile (File/New Stack) pour placer plusieurs fichiers d'image de tranches dans une pile 3D ou la commande Fichier/Ouvrir (File/Open) si plusieurs tranches sont stockées dans un seul fichier d'image.

Votre image peut également être traitée à l'aide des commandes du menu Image.

b. Définir l'objet et les limites de l'objet :

Utilisez l'option Editer/Objet (Edit/Object) pour ajouter des objets à votre projet. Utilisez la fonction Rendu 3D/Segmentation automatique pour détecter

automatiquement les limites des objets. Vous pouvez également utiliser les commandes Interactive Segment ou Segment objet pour générer des limites d'objet pour les objets définis.

Vous pouvez utiliser la commande Editer/Editeur de limites (Edit/Boundary Editor) pour tracer les limites des objets manuellement.

c. Rendu de surface 3D et rendu de volume :

Vous pouvez exporter les modèles de surface 3D à l'aide de la commande Fichier/Exporter (File/Export Model) à de nombreux formats courants et créer des animations avancées à l'aide de la commande Vue/contrôle d'animation (View/Animation Control) pour créer des animations avancées.

Il est important de bien comprendre comment les différents types de données, tels que les images, les lignes de délimitation, les marqueurs de points, les points de contrôle et les annotations, sont traités par le logiciel et comment ils sont générés, affichés, modifiés et enregistrés dans un fichier.

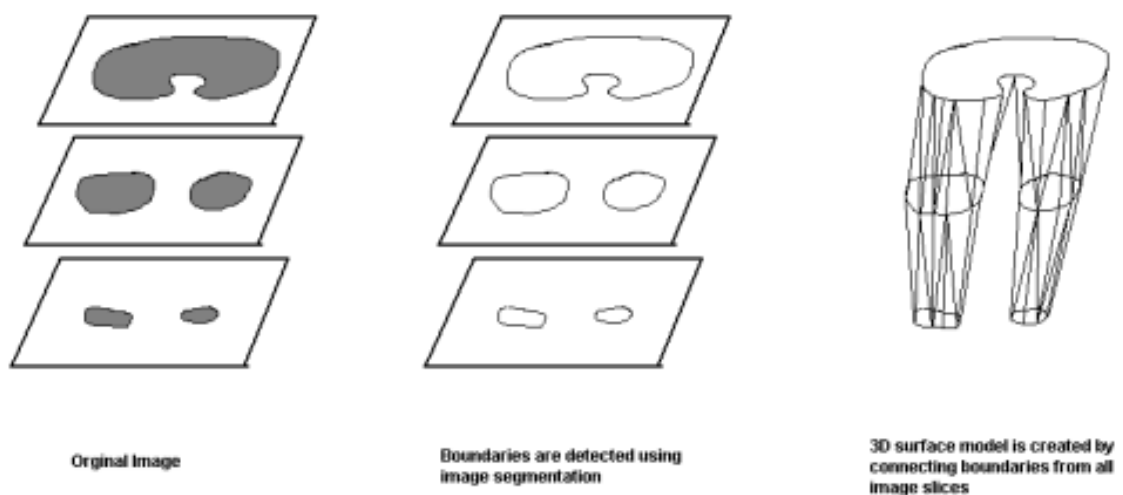


Figure 27: processus de création d'image 3D à partir des coupes DICOM_[45]

Ce logiciel basé sur la technologie vectorielle. Il est parfait pour les professionnels de la santé, permettant entre autres de traiter les images, et de modéliser.[44]

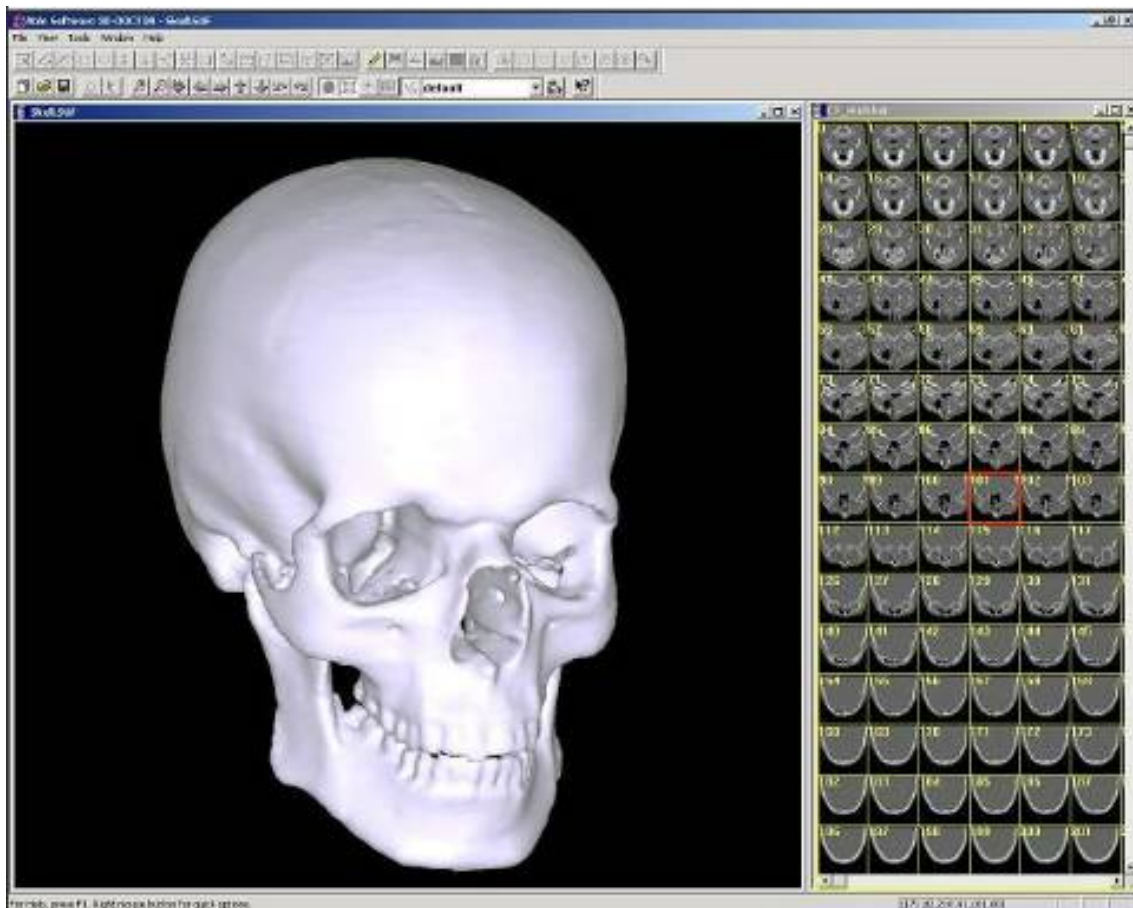


Figure 28: modèle de crâne 3D créé à partir d'un scanner_[45]

3. DICOM TO PRINT (D2P) : [46]

Développé par 3D Systems, et spécialement conçu pour un usage médical. Avec ce logiciel, on peut travailler sur des fichiers DICOM et les imprimer en 3D.

S'il est parfait pour l'impression 3D, il est également possible de l'utiliser pour la visualisation. D2P permet aussi d'exporter les fichiers 3D pour une expérience de réalité virtuelle.

Les images DICOM sont importées dans le progiciel modulaire autonome D2P qui regroupe toutes les étapes de segmentation et de préparation du modèle 3D sur un seul poste de travail. Le D2P est un dispositif médical homologué destiné à la planification chirurgicale préopératoire et à la production de modèles anatomiques imprimés en 3D à des fins de diagnostic.

L'ensemble unique d'outils de segmentation d'images et sa visualisation avancée en réalité virtuelle (RV) permettent aux cliniciens et au personnel des centres de soin de limiter les efforts et le temps associés à la création de modèles anatomiques personnalisés.

Les modèles numériques exportés du logiciel D2P peuvent être utilisés dans une grande variété d'applications, notamment les imprimantes 3D, les appareils de RV, les logiciels de planification chirurgicale et les logiciels de CAO. [47]

Ce logiciel est une solution complète, avec laquelle il est possible pour le chirurgien de créer ses propres modèles 3D grâce à des outils de segmentation automatique. De plus, ce logiciel accepte de nombreux formats et possède des outils intuitifs permettant de bien contrôler ses données.

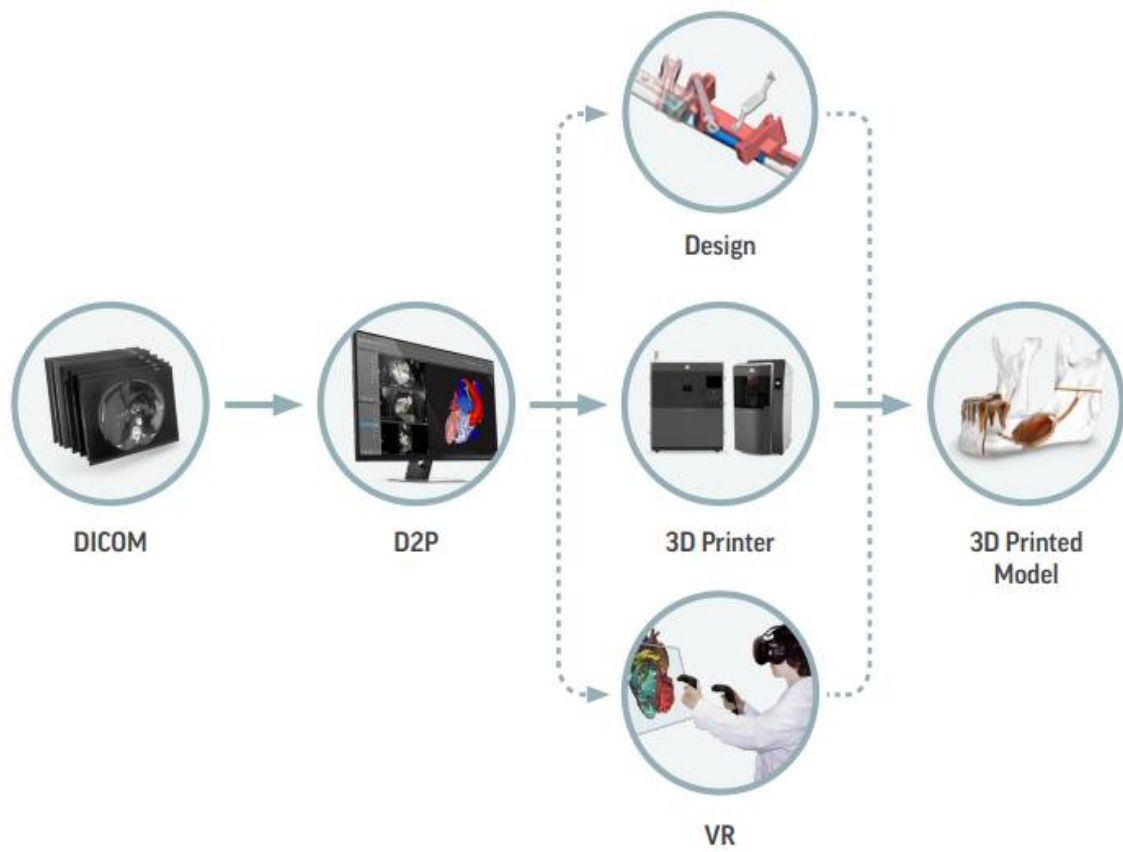


Figure 29: Schéma montrant les différentes utilisations du logiciel D2P [46]

4. Blender

Blender est un logiciel de modélisation, Il permet de faire de la modélisation, de l'animation, de la simulation, du rendu, de la vidéo et de créer des jeux vidéo.

Comme il est tout à fait possible de créer des modèles élaborés avec les nombreux outils de ce logiciel, les professionnels de la santé peuvent parfaitement utiliser ce logiciel gratuit.



Figure 30: modèle de mandibule en 3D [48]

5. Medical Design Studio

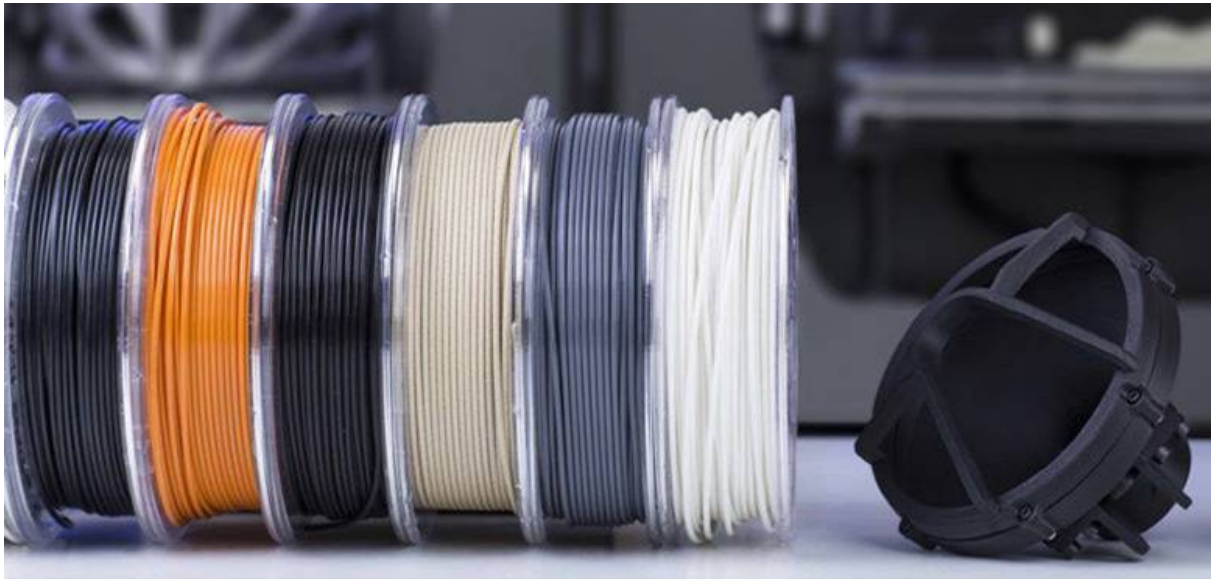
Logiciel sophistiqué spécialisé dans la conception et la création de modèles 3D à partir d'images médicales. Le logiciel est capable d'utiliser des scanners CT ou IRM standard pour créer des modèles anatomiques 3D. [49]

L'un des principaux composants de Medical Design Studio est la création de modèles 3D (STL) à partir de scanners médicaux CT ou IRM. Il donne la possibilité d'exporter des fichiers pour l'impression 3D de l'anatomie du patient en taille réelle. Le logiciel comprend des fonctions d'optimisation d'image qui permettent de nettoyer facilement les images pour une impression précise des patients. [50]

En outre, il est possible d'importer un modèle 3D existant d'un dispositif médical et de le personnaliser pour l'adapter à l'anatomie spécifique d'un patient. Le logiciel est polyvalent dans la mesure où ses fonctions peuvent être appliquées à la conception, à l'amélioration des dispositifs et à la création de dispositifs médicaux spécifiques aux patients.

IV. Les matériaux utilisés : [51]

1. Les plastiques :



Des dizaines de matériaux plastiques sont disponibles pour l'impression 3D. Chacun a ses propres qualités pour des utilisations bien spécifiques.

1-1. L'acide polylactique (PLA)

Le PLA est le consommable le plus couramment utilisé en impression 3D FDM "fused deposition modeling" à dépôt de fil. Écologique car d'origine végétale (amidon de maïs, racine de manioc et betterave).

Ce plastique est biodégradable et non toxique.

L'une de ses caractéristiques principales est son faible rétrécissement à l'impression 3D, raison pour laquelle des plateaux chauffants ne sont pas nécessaires lors de l'impression. Les températures d'impression ne doivent pas être très élevées, comprises entre 190°C et 230°C.

1-2. Acrylonitrile butadiène styrène (ABS) :

L'ABS a une température d'impression comprise entre 230°C et 260°C et peut supporter des températures très basses (-20°C) et très élevées (80°C).

Sa force, sa souplesse et sa meilleure résistance à la température font de lui le matériau préféré pour les ingénieurs et les applications professionnelles.

1-3. Acrylonitrile styrène acrylate (ASA) :

Ce matériau possède des propriétés similaires à l'ABS avec toutefois une meilleure résistance aux rayons UV.

Les paramètres d'impression sont très semblables à ceux utilisés avec de l'ABS – dans le cas de l'ASA, il faut bien faire attention à utiliser des imprimantes 3D avec une enceinte fermée ou effectuer l'impression dans un espace ouvert à cause des émissions de styrène.

1-4. La poudre de polyamide (PA) :

Les polyamides sont stables, résistants et biocompatibles.

Le polissage permet de finir la pièce. Cette poudre offre un grand niveau de détail et donne aux impressions un aspect sableux, granuleux et légèrement poreux.



Figure 31: poudre de polyamide source : [primante3d](#)

2. Les métaux :

2-1. L'aluminium et ses alliages :

Composé principalement d'aluminium, de silicium et de magnésium.

Ce matériau possède de bonnes caractéristiques mécaniques et peut être utilisé pour des pièces sujettes à de fortes tensions.

Le matériau est résistant et léger.

2-2. Titane et ses alliages :

Le matériau par excellence dans les comblements osseux, utilisé en chirurgie maxillo-faciale et en traumatologie orthopédie, en raison de son rapport solidité/poids, de sa grande résistance à la corrosion, et de sa biocompatibilité.

2-3. L'acier inoxydable

Comme son nom l'indique, il possède des propriétés mécaniques de haute résistance à la corrosion.

2-4. Le chrome-cobalt et ses alliages :

Tout comme les alliages de titane, les alliages cobalt-chrome, sont très utilisés pour la fabrication de prothèses médicales (hanche, genou ...).

Ils sont rigides et très résistants à l'usure.

3. La céramique :

Elle permet la fabrication de pièces fonctionnelles alliant précision (stabilité dimensionnelle) et propriétés exceptionnelles des céramiques techniques (résistance thermique et chimique). Le principal avantage des

technologies additives céramiques est de pouvoir réaliser des pièces complexes au plus proche des cotes finales sans développer un outillage au préalable.

4. Matériaux organiques :

4.-1 Tissus biologiques :

En 2007 est fondée une des premières entreprises spécialisées dans la bio-impression : Organovo. L'une des pionnières dans ce domaine. Grâce à son imprimante biologique NovoGen MMX, l'entreprise est maintenant en mesure de fabriquer un tissu organique en 3D.

4-2 Bois :

Il s'imprime via une technique de dépôt de filaments fondus (FDM), et nécessite d'être chauffé à une température comprise entre 185 et 230°C.

L'impression 3D en bois est une technique respectant l'environnement. En effet, ces bobines sont conçues à partir de bois étant issus à 40% de bois recyclés.

4-3 Cires :

L'impression 3D à la cire est principalement utilisée pour créer des moules dentaires et dans la joaillerie.

V. Techniques d'impression [41]

Il existe plusieurs techniques d'impression 3D différentes, qui varient en coût, précision et vitesse d'impression, ainsi qu'en matériaux utilisables, fonctionnalités et propriétés mécaniques des objets produits.

Les différentes techniques d'impression 3D permettent d'obtenir des résultats différents, nécessitant différents types d'équipements et procédés mécaniques. Chaque type d'imprimante utilise une variété de matériaux adaptés aux besoins biologiques et/ou fonctionnels, tels que les filaments pour la technologie FDM, les résines pour la technologie SLA, et les poudres de polymères ou métalliques pour les technologies de frittage laser telles que SLS.

Les matériaux utilisés dans les imprimantes 3D sont sélectionnés pour leurs propriétés fonctionnelles telles que la résistance mécanique et la porosité, ainsi que pour leur biocompatibilité. Ils peuvent être de différentes natures, notamment des plastiques, des métaux (tels que des alliages de titane), des céramiques de synthèse et des résines.

Il existe plusieurs techniques d'impression 3D qui utilisent des matériaux solides, liquides ou en poudre.

- **La technique FDM**, aussi appelée ME ou **Fused Filament Fabrication** (FFF), est la plus répandue et la moins coûteuse en matière d'impression 3D. Elle consiste à extruder des filaments thermoplastiques tels que le PLA, l'ABS, le polycarbonate et le high-impact polystyrène à travers une buse d'extrusion chaude. Les pièces sont fabriquées couche par couche de bas en haut.

Récemment, le PEEK, déjà utilisé en SLS pour des implants crâniens sur mesure, est considéré comme une perspective prometteuse pour l'utilisation d'imprimantes FDM non industrielles.

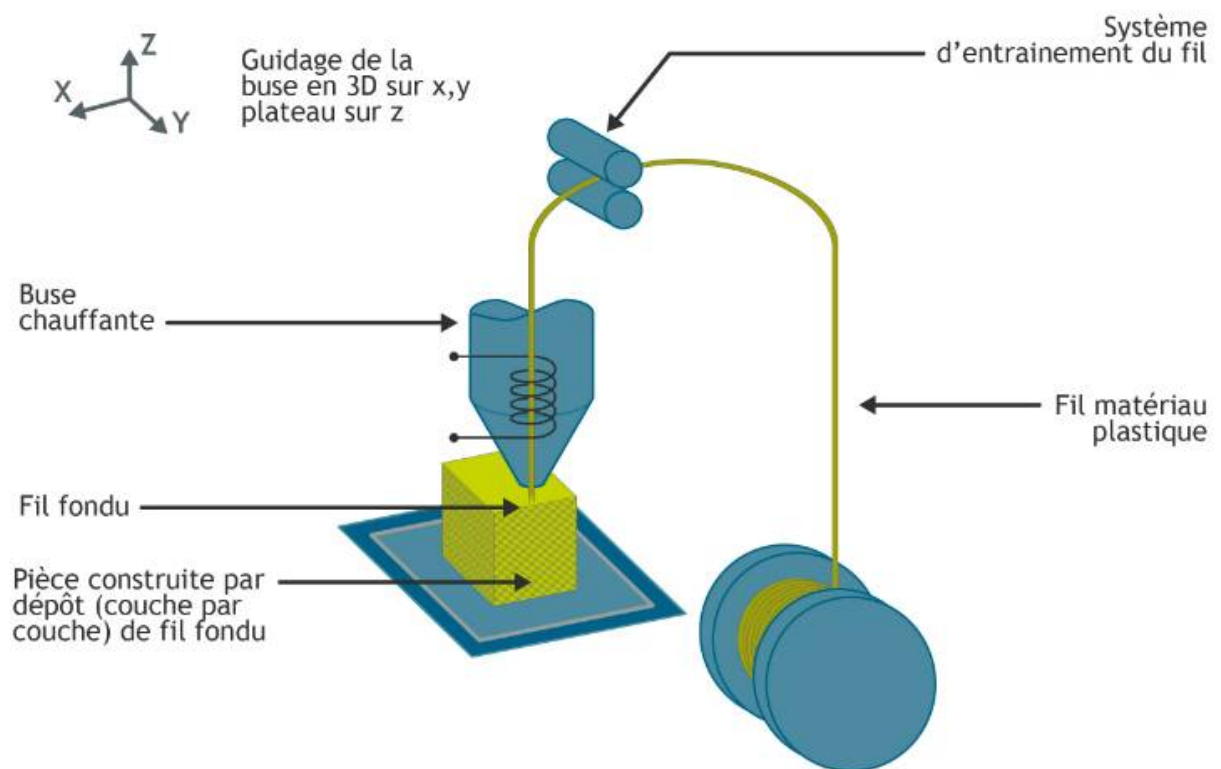


Figure 32: impression par dépôt de filaments fondus [52]

L'impression à dépôt de fil se fait avec des polymères thermoplastiques en forme de filament de 1,75 mm ou 2,85 mm de diamètre, vendus en bobine. Cette technique est utilisée pour créer des prototypes, des modèles anatomiques, etc.

Elle présente l'avantage d'obtenir un plus grand volume d'impression à coût égal et est de plus en plus fréquemment utilisée pour la production de pièces.

- **La stéréolithographie** est une technique de photopolymérisation qui comprend trois technologies distinctes: SLA, DLP et CLIP.

SLA (StereoLithography Apparatus) est la première technologie d'impression 3D, apparue en 1986 et développée par 3D Systems.

La SLA consiste à durcir une résine photosensible à l'aide d'un laser UV en projetant celui-ci sur la matière à solidifier. Le laser balaie la surface de chaque couche à partir du bas en utilisant une cuve transparente, puis le plateau s'élève pour la couche suivante.

Des étapes supplémentaires sont requises après l'impression en SLA, telles que :

- Nettoyage de la surface de l'objet avec de l'alcool isopropylique pour enlever la résine non durcie,
- Retrait des supports d'impression, et
- Exposition à une lumière UV pour la post-polymérisation selon les matériaux utilisés.

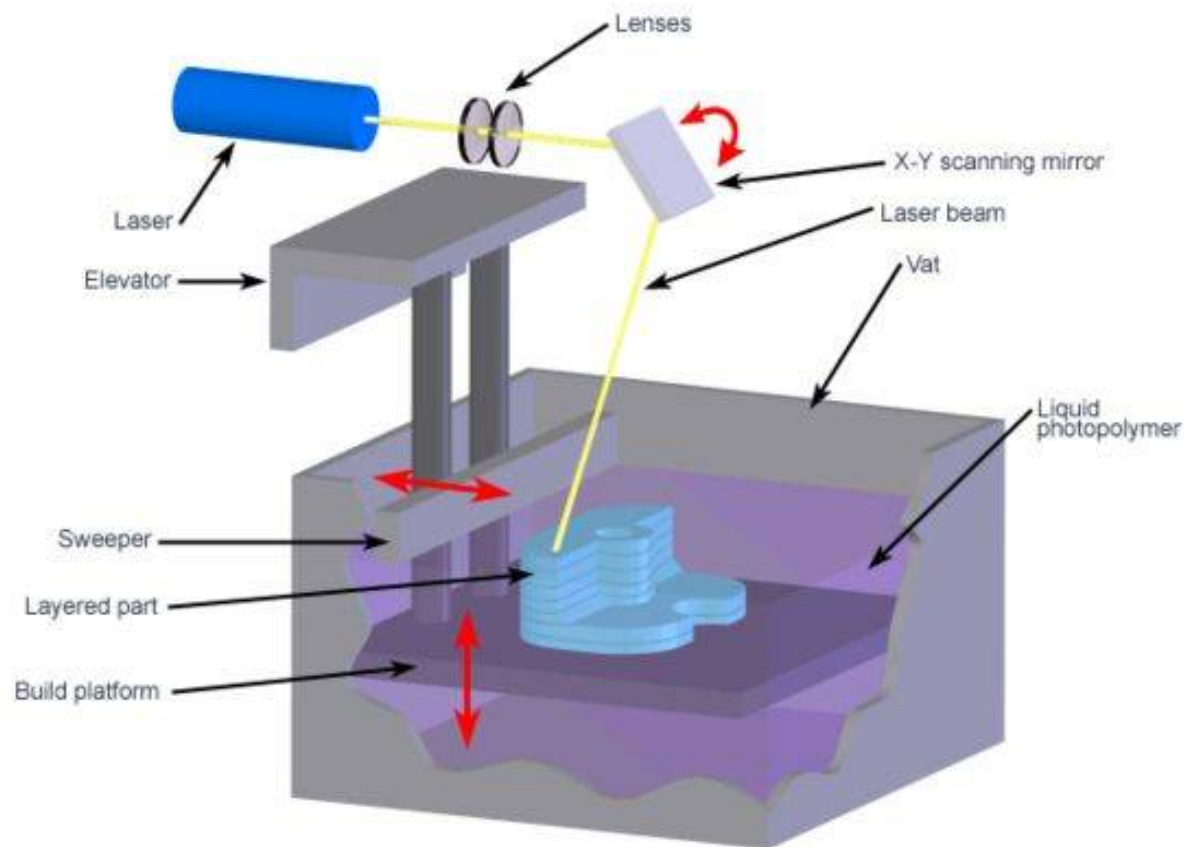


Figure 33: Impression par photopolymérisation (Stéréolithographie) [53]

- La technique DLP (Direct Light Projection) utilise une projection de lumière à travers un masque (semblable à un pochoir). Elle se différencie de la SLA par le fait que la source de lumière, moins intense qu'un laser, ne se déplace pas et durcit une couche complète en agissant à travers le masque sur le fond de la cuve de résine, modifié couche après couche.

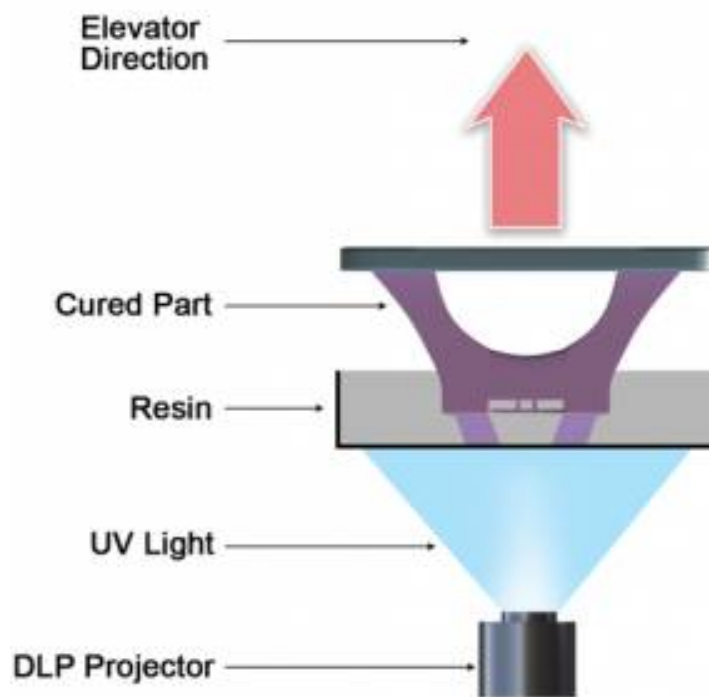


Figure 34: impression par DLP [54]

Cette technologie a été mise au point par l'entreprise américaine Texas Instruments (TI) en 1987, et est utilisée par la firme allemande Envision TEC® spécialisée sur le marché de la prothèse dentaire et auditive ainsi que les bijoux.

Les deux techniques diffèrent également en termes de vitesse d'impression (DLP est plus rapide), de précision (SLA est plus précise) et de coût (DLP est plus coûteux). Elles sont utilisées pour des applications telles que les gouttières et les guides chirurgicaux en chirurgie maxillo-faciale, stomatologie et chirurgie buccale. [41]

	DLP	SLA
Vitesse d'impression	++++	+
Précision	++	++++
Coût	++++	++

Tableau 1: résumant les différences entre les techniques DLP et SLA

Récemment, une nouvelle technique DLP est apparue : CLIP (Continuous Light Interface Processing), qui offre un avantage supplémentaire en termes de vitesse d'impression.

Cette technique utilise un bain de résine liquide et une projection continue d'images UV produites par un projecteur de lumière numérique, à travers une fenêtre transparente aux UV perméable à l'oxygène.

- **La technique par projection ou jet** : comprend Material Jetting (MJ) ou impression à jets multiples Polyjet et Binder Jetting (BJ), qui implique la pulvérisation d'un liant.

PolyJet se base sur la photopolymérisation en déposant une résine liquide photopolymérisable qui durcit grâce à un traitement ultraviolet sur une plateforme de production par l'intermédiaire de jets répétitifs.

La technique PolyJet est coûteuse et peu accessible, mais elle permet de produire des objets complexes avec une haute résolution et de nombreux détails grâce à l'utilisation de la photopolymérisation et un dépôt de résine liquide par jets successifs.

Les imprimantes 3D Multijet sont capables de créer des pièces avec une texture douce et une souplesse semblable à celle obtenue par les techniques de production classiques, avec une grande précision et une variété de combinaisons de couleurs et de matériaux.

- La technique liage de poudre ou fusion sur lit de poudre (Power Bed Fusion) comporte : **Selective Laser Sintering (SLS)** et la technique fusion laser ou Selective Laser Melting (SLM)

Cette technique a été développée par la société allemande EOS en 1989.

Le procédé SLS utilise un laser pour faire fondre des poudres de matériaux tels que le plastique, la céramique, le verre ou le métal. Il s'agit d'une méthode différente de la SLA, qui implique la liquéfaction du matériau. Le DMLS est une variante de ce procédé, qui utilise des poudres métalliques pour fabriquer des objets en métal. [55]

La technique SLS utilise un laser ultraviolet fort pour solidifier les grains de poudre, couche après couche, en provoquant une réaction chimique de frittage ou de fusion. Elle offre une grande variété de matériaux, tels que des métaux (titane), des plastiques et des céramiques, et les produits finis sont robustes, précis, sans restriction de forme, peuvent être colorés et sont facilement stérilisables.

La technique SLM permet de produire des plaques d'ostéosynthèse personnalisées en titane et des implants sur mesure. Cependant, son coût élevé et la nécessité d'une adaptation des locaux pour gérer la toxicité de la poudre et le port d'équipements de protection individuels en font une technique peu adaptée à un usage non industriel.

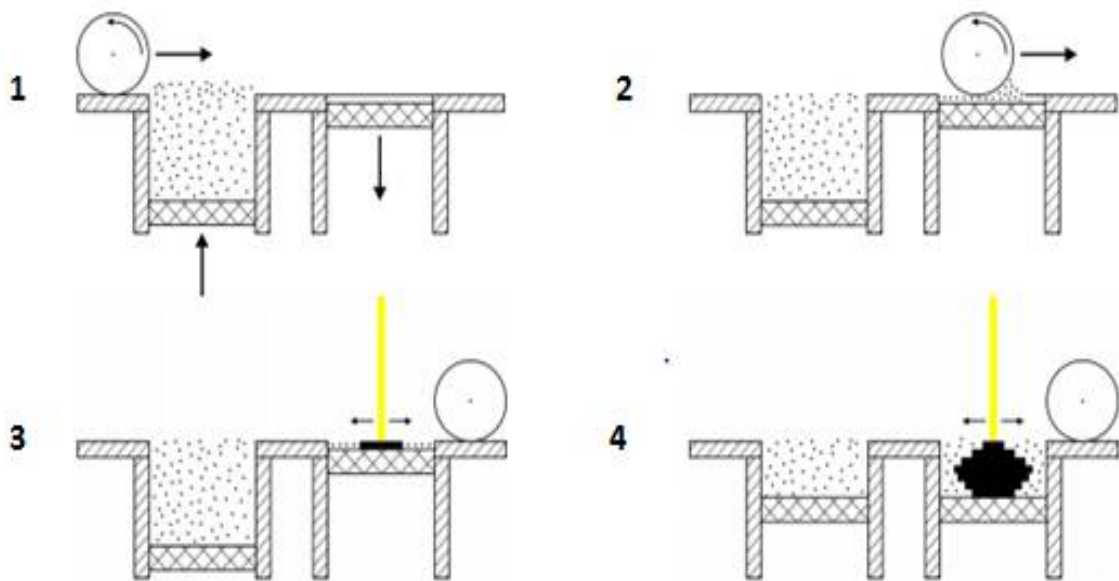


Figure 35: schémas montrant les différentes étapes de la technique SLS [54]

6. Avantages et inconvénients de l'impression 3D :

Une analyse systématique de 158 études publiées jusqu'en 2015, dont la moitié concernant la chirurgie maxillo-faciale, a évalué les bénéfices et les limites de l'utilisation de l'impression 3D en chirurgie. [41]

Cette étude a déterminé que les avantages les plus fréquemment rapportés de l'utilisation de l'impression 3D en chirurgie incluent la possibilité de planification préopératoire (48,7%), la précision de la méthode d'impression (33,5%), une réduction du temps opératoire (32,9%) et une réduction des risques et des complications (30,4%).

Les principaux inconvénients de l'impression 3D en chirurgie ont été identifiés comme étant la précision insuffisante des dispositifs obtenus (selon 34 études soit 21,5%) et les propriétés physiques décevantes des modèles anatomiques (19 études soit 12%). D'autres inconvénients incluent le temps de planification et de production de l'objet (19,6%) et les coûts additionnels (19,0%).

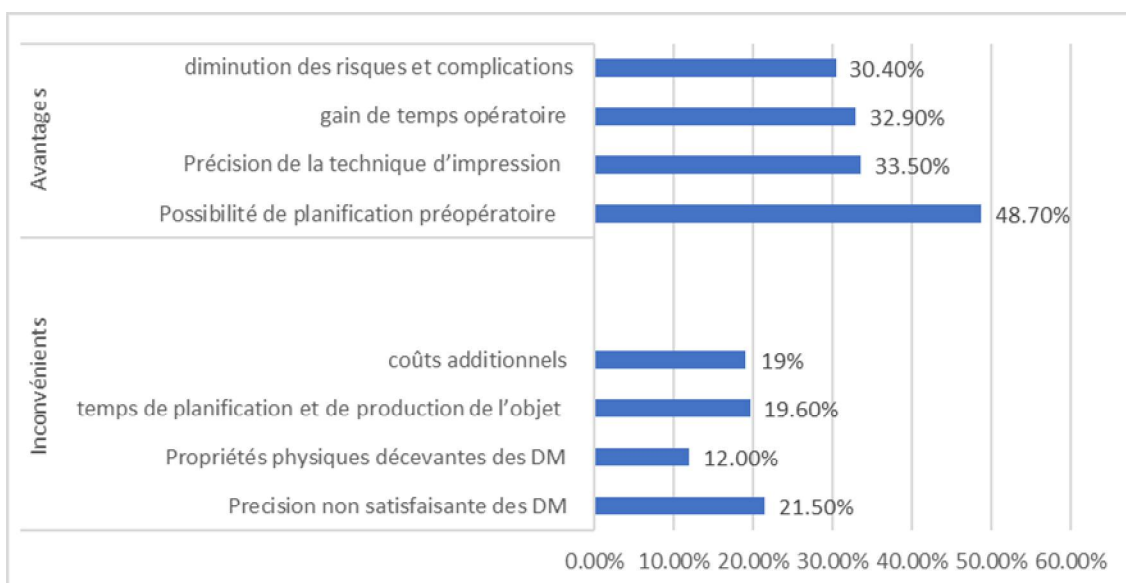


Figure 36: Avantages et inconvénients de l'impression 3D en planification chirurgicale

7. Enjeux réglementaires

Les dispositifs médicaux créés par impression 3D sont soumis aux mêmes réglementations que ceux produits par d'autres méthodes de fabrication.

➤ DM : définitions et classes : [56]

Dispositif médical : « tout instrument, appareil, équipement, logiciel, implant, réactif ou autre article destiné par le fabricant à être utilisé, seul ou en association, chez l'homme pour l'une ou plusieurs des fins médicales suivantes :

- Diagnostic, prévention, contrôle, prévision, pronostic, traitement ou atténuation d'une maladie,
- Diagnostic, contrôle, traitement, atténuation ou compensation d'une blessure ou d'un handicap,
- Etude, remplacement ou modification d'une structure ou fonction anatomique, ou d'un processus ou état physiologique ou pathologique,
- Communication d'informations au moyen d'un examen in vitro d'échantillons provenant du corps humain, y compris les dons d'organes, de sang, et de tissus, et dont l'action principale voulue dans ou sur le corps humain n'est pas obtenue par des moyens pharmacologiques ou immunologiques ni par métabolisme, mais dont la fonction peut être assistée par de tels moyens. » [57]

Les produits spécifiquement destinés au nettoyage, à la stérilisation ou à la désinfection de DM et de dispositifs destinés à la maîtrise de la conception ou à l'assistance à celle-ci, sont considérés comme des DM.

« Accessoire de DM : tout article qui, sans être un DM, est destiné par son fabricant à être utilisé avec un ou plusieurs DM donnés pour permettre une utilisation de ce ou ces derniers conforme à sa ou leur destination ou pour contribuer spécialement et directement au fonctionnement médical du ou des DM selon sa ou leur destination. »

Il est important de bien distinguer la classe du dispositif fabriqué en fonction du niveau de risque associé qui prend en compte la durée d'utilisation, le caractère invasif ou non du dispositif, le type d'invasivité, la possibilité ou non de réutilisation, la visée thérapeutique ou diagnostique et la partie du corps en contact avec le dispositif.

Selon la loi n°84-12 relative aux dispositifs médicaux

Chapitre premier article 4 :

« Les dispositifs médicaux sont classés en fonction :

- De la durée d'utilisation du dispositif : de quelques minutes à plusieurs à plusieurs années ;
- Du caractère invasif ou non du dispositif ;
- Des fins d'utilisation du dispositif médical : chirurgicales ou non ;
- Du caractère actif ou non du dispositif ;
- De la partie vitale ou non du corps (système circulatoire, système nerveux central).

Les dispositifs médicaux sont classés selon leur degré de dangerosité comme suit :

- Classe I : risque potentiel faible ;

- Classe II A : risque potentiel modéré ;
- Classe II B : risque potentiel élevé ;
- Classe III : risque potentiel critique. »

En chirurgie maxillo-faciale, stomatologie et chirurgie orale, on distingue les dispositifs médicaux suivants :

- Modèles anatomiques intervenant dans la prise en charge thérapeutique d'un patient (diagnostic, pronostic, conformation préopératoire d'un DM) : DM de classe I
- Gouttières, conformateurs, attelles : DM de classe I (utilisation temporaire, non-invasif)
- Guides chirurgicaux : DM de classe IIa (utilisation temporaire – invasif)
- Implants sur mesure : DM de classe IIb (utilisation prolongée – invasif) ou de classe III (si en contact avec le SNC).

➤ Cadre réglementaire : [41]

Pour fabriquer des dispositifs médicaux, une entreprise doit être enregistrée auprès de l'ANSM et se conformer aux exigences de la directive 93/42/CEE, y compris la rédaction d'une déclaration de conformité de 23 points, le respect des exigences fondamentales, une analyse des risques, la qualification des processus et le contrôle de la biocompatibilité des matériaux utilisés.

Tous les dispositifs médicaux doivent disposer d'un marquage CE en vigueur pour être commercialisés, ce qui engage la responsabilité du fabricant et garantit la conformité du DM aux normes européennes. Pour les dispositifs sur mesure, ils doivent être produits par une chaîne de production marquée CE.

L'adoption du nouveau règlement européen sur les dispositifs médicaux, 2017/745 a pour objectif de renforcer la sécurité et la protection de la santé tout en soutenant l'innovation. Ce règlement étend la portée des dispositifs médicaux pour inclure des produits sans finalité médicale, tels que ceux destinés à la planification de la conception et à l'assistance à celle-ci, ainsi que des produits spécifiques pour le nettoyage, la désinfection ou la stérilisation des dispositifs médicaux.

En outre, la loi marocaine incite tout établissement de fabrication, d'importation, d'exportation ou de distribution de dispositifs médicaux, de respecter les règles de bonnes pratiques de fabrication, de transport, de stockage, de distribution ainsi que d'évaluation de la performance des dispositifs médicaux, fixées par voie réglementaire après consultation des instances représentatives des professionnels de santé concernés. [57]

Ainsi, la production de dispositifs médicaux dans les établissements de santé sera mieux encadrée. Les hôpitaux peuvent produire des DM par impression 3D pour leur propre utilisation, mais seulement dans des conditions très strictes et encadrées, indépendamment de la méthode de fabrication 3D utilisée :

- Les établissements de santé ne peuvent produire et utiliser in-house des DM que s'ils sont certains qu'il n'existe pas de DM équivalent disponible sur le marché pour répondre aux besoins spécifiques de leur groupe cible de patients avec les performances et la sécurité adéquates.

- Les établissements de santé devront maintenir une documentation détaillant les installations de fabrication, les procédés de fabrication, la conception et les données de performance des DM fabriqués. Ils doivent également s'assurer de la conformité aux exigences réglementaires, notamment en ce qui concerne les propriétés chimiques, physiques et biologiques des matériaux utilisés, la compatibilité avec les tissus biologiques, l'impact des processus de fabrication sur les propriétés des matériaux, la maîtrise des procédés de fabrication, les propriétés mécaniques des DM (résistance, usure, rupture, fatigue), ainsi que les performances précliniques et cliniques.
- Le règlement européen exige des établissements de santé qu'ils évaluent l'expérience acquise lors de l'utilisation clinique des DM et qu'ils mettent en œuvre les mesures correctives nécessaires. Pour cela, ils doivent élaborer un plan d'amélioration continue pour minimiser les risques associés à l'utilisation des DM fabriqués en 3D, en adaptant éventuellement les procédés de production.

Le règlement européen impose que les matériaux utilisés pour fabriquer les dispositifs médicaux soient considérés comme des DM et respectent la norme ISO 10993 : 2010 sur l'évaluation biologique des DM. Les DM doivent répondre aux exigences de sécurité et de performance générales, telles que l'innocuité, la résistance aux essais de lavage et de stérilité, l'absence d'altération du produit final, la flexibilité, la rigidité, l'élasticité, la déformabilité, les propriétés mécaniques et la biocompatibilité.

En 2020, face à la pandémie de Covid-19 et pour prévenir les pénuries de matériel médical, l'ANSM a recommandé des activités pour la production de dispositifs médicaux en utilisant l'impression 3D en cas d'urgence sanitaire : valider les logiciels et le processus d'impression,

- Maintenir les performances du processus,
- Contrôler les matériaux utilisés,
- Définir les spécifications des produits finis,
- Mettre en place des processus complémentaires,
- Et vérifier les produits finis.

Pour le fabricant 3D, les exigences réglementaires incluent la description du dispositif, des tests mécaniques (selon les normes ou référentiel interne), des tests dimensionnels, la caractérisation des matériaux, un plan de test dans des conditions simulées d'utilisation, et un protocole d'utilisation clinique.

L'ANSM indique que la production de dispositifs médicaux par impression 3D nécessite des compétences professionnelles à chaque étape, allant de la conception numérique à l'impression 3D et, le cas échéant, à la stérilisation des produits finis.

La fabrication additive est réglementée par plusieurs normes, notamment la NF E 67001 de 2011 qui définit la fabrication additive, la ASTM F 2792-12a de 2012 qui concerne les différents processus d'impression, la ISO/ASTM 52915 de 2013 qui traite des fichiers utilisés pour l'impression 3D, et la ISO/ASTM 52921 de 2013 qui couvre la terminologie normalisée et les méthodes d'essais.

À ce jour, l'AFNOR a publié trois normes liées à l'impression 3D pour faciliter la communication entre les acteurs du secteur. La NF E 67-001 propose des définitions de termes communs, la XP E 67-010 donne des indications sur les informations à fournir par le producteur de poudres, et la XP E 67-030 définit les conditions de réception des pièces fabriquées par fabrication additive.

[41]



PARTIE 3 : CAS CLINIQUES



Patient 1

Patiente de 24 ans qui présente une asymétrie faciale, avec micrognathie et latéro-déviatoin mandibulaire gauche.

Elle a bénéficié d'une TDM du massif facial qui a objectivé l'absence du condyle mandibulaire gauche. (fig. 36)

DICOM :



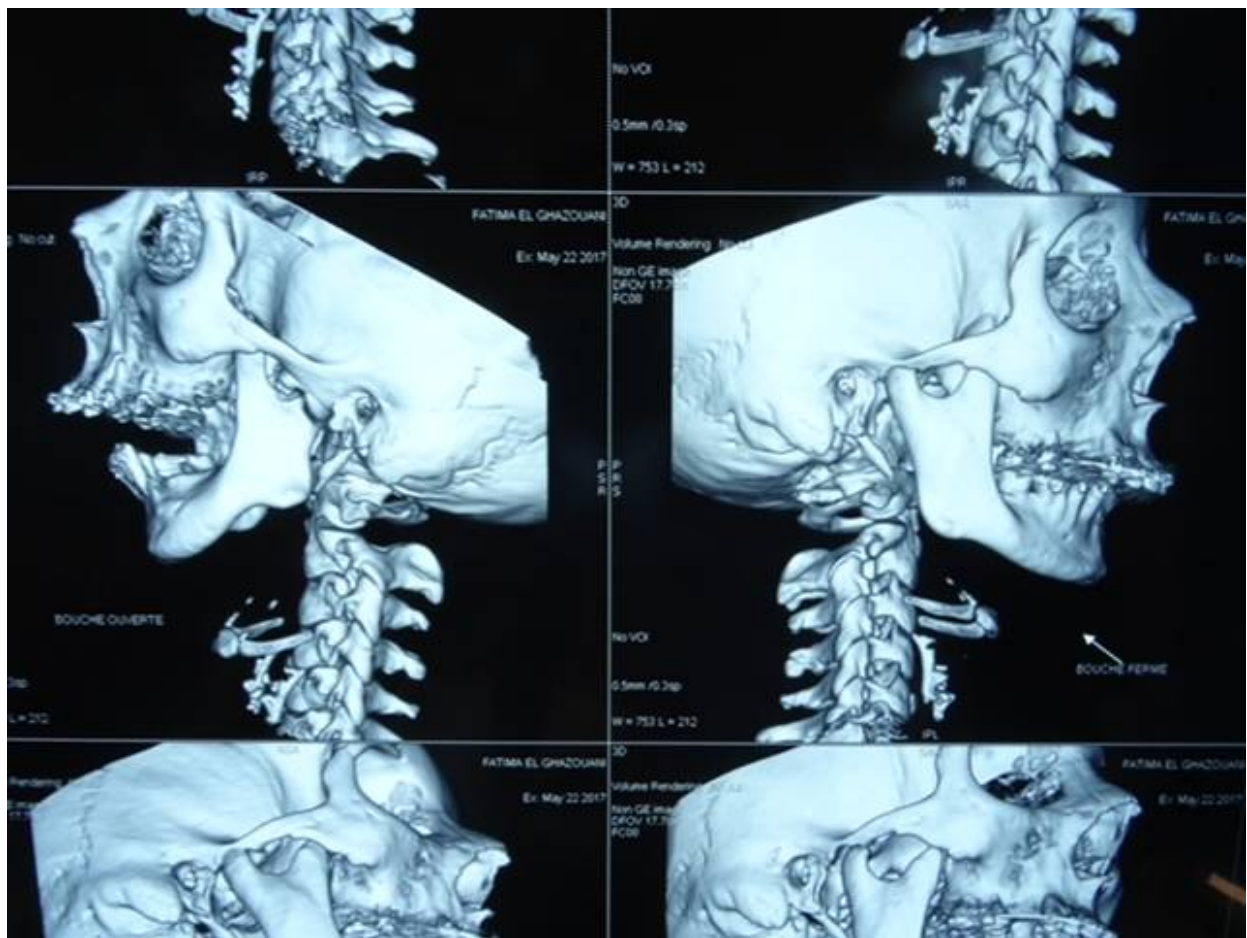


Figure 37: images TDM du massif facial

STL :

La figure 37 montre le fichier « STL » obtenu, avec le logiciel Slicer

Une segmentation du massif facial a été réalisée pour imprimer séparément la mandibule



Figure 38: STL segmenté du massif facial

Biomodèle :

A partir des données STL recueillies, une impression 3D d'un Biomodèle a été réalisée.



Figure 39: Biomodèle 3D du massif facial

Patient 2

Patiente de 23 ans, qui présente une dysmorphose maxillo-mandibulaire classe III, candidate à une chirurgie orthognatique.







Figure 40: photos de la patiente avant l'intervention

Un biomodèle a été réalisé, après acquisition des fichiers DICOM, conversion en données STL et segmentation du massif facial.



Figure 41: Biomodèle 3D des arcades dentaires



Figure 42 : l'imprimante 3D ProJet MJP 3600



PARTIE 4 : DISCUSSION



L'impression 3D est une innovation technologique qui a fait son entrée dans le domaine de la santé, en particulier dans la chirurgie maxillo-faciale. Les résultats indiquent que le temps nécessaire pour la préparation n'est pas principalement lié à l'impression elle-même, mais plutôt à l'imagerie et au traitement des données.

La production d'un simple guide de forage peut nécessiter plusieurs heures en utilisant la modélisation 3D, ce qui rend le gain de temps très subjectif et dépendant de la manière d'évaluation choisie.

De plus, le temps gagné grâce à l'utilisation de l'impression 3D peut varier en fonction de la perspective considérée et il n'est pas toujours facile d'évaluer son impact en termes économiques. Une heure consacrée à la conception et à la production d'un objet pourrait équivaloir à un gain de temps de dix minutes en salle d'opération. [51]

Les applications de l'impression 3D ont été largement décrites en chirurgie et ont été précisées pour la chirurgie maxillo-faciale.[41]

Les modèles anatomiques sont un outil précieux pour améliorer la planification chirurgicale, en permettant la préparation et la simulation sur un modèle concret. Ils offrent une meilleure compréhension de l'anatomie et de la pathologie du patient, et sont également utilisés pour la formation et l'éducation.

En outre, les modèles anatomiques en impression 3D peuvent aider à minimiser les risques et les erreurs opératoires en fournissant une représentation précise de la zone opératoire, et en permettant aux chirurgiens de planifier les incisions, les approches et les sutures de manière plus stratégique. De plus, ils peuvent également faciliter la communication entre les membres de l'équipe médicale en donnant une visualisation commune des structures anatomiques et des objectifs chirurgicaux.

L'utilisation de modèles anatomiques en impression 3D peut également permettre d'améliorer la qualité de la chirurgie en optimisant le temps opératoire et en réduisant les complications.

En chirurgie reconstructrice et orthognathique, les guides chirurgicaux servent à aligner et orienter les coupes osseuses correctement, à percer les vis en suivant les positions déterminées sur le modèle (guide de perçage) et à positionner les segments osseux selon le plan (guide de positionnement), sans avoir recours aux gouttières occlusales pour la chirurgie orthognathique.

De plus, des dispositifs implantables, invasifs et permanents peuvent également être fabriqués en 3D, tels que des implants sur mesure, des plaques de fixation, d'ostéosynthèse ou des prothèses (crâniennes, ATM).

Cependant, à ce jour, ces dispositifs de classe IIb et III nécessitent des technologies coûteuses et complexes et sont généralement produits par l'industrie.

I. Apport pédagogique

Les modèles anatomiques sont utiles pour la formation et l'éducation, tant pour les professionnels de la santé que pour les patients et leur famille.

Une étude systématique/méta-analyse a montré que les modèles anatomiques imprimés en 3D sont tout aussi efficaces que les méthodes traditionnelles pour la formation en anatomie des étudiants en médecine. [41]

Cette revue a révélé l'utilité pédagogique des modèles anatomiques imprimés en 3D pour la formation des étudiants en médecine, qui sont comparables aux méthodes classiques. Elle a montré en outre une amélioration de la vitesse d'apprentissage et de la satisfaction des étudiants en utilisant des modèles 3D par rapport aux méthodes pédagogiques traditionnelles. Ces avantages ont également été documentés dans une revue de la littérature consacrée aux nouvelles techniques d'enseignement en chirurgie, en particulier dans le domaine de la chirurgie maxillo-faciale et de la chirurgie buccale, grâce à l'utilisation de l'impression 3D.

Les recherches ont montré que l'utilisation de modèles anatomiques en 3D peut contribuer à une meilleure compréhension de la complexité de la région crânio-faciale grâce à l'utilisation de méthodes d'étude contrôlées aléatoires.

Des études ont comparé les bénéfices pédagogiques entre les modèles anatomiques 3D imprimés et les images 2D. Les résultats ont montré une meilleure compréhension des fractures osseuses zygomatiques et des doubles fractures mandibulaires avec les modèles 3D, ainsi qu'une amélioration de la compréhension des aspects biomécaniques (selon les questionnaires d'évaluation des connaissances avec un score de 2,36 pour les modèles 3D et 1,99 pour les images 2D, $p = 0,008$ et $p = 0,015$ respectivement).

Les résultats d'une autre étude ont montré que l'utilisation de modèles anatomiques en 3D a amélioré considérablement les connaissances acquises par les internes soit 44.65% versus 32.16% pour le groupe contrôle ($p=0.038$) en ce qui concerne l'ostéotomie mandibulaire, ce qui a également influencé positivement leur courbe d'apprentissage.[41]

En somme, les résultats de ces études montrent clairement que l'utilisation de modèles imprimés en 3D peut avoir un impact positif sur l'apprentissage et la compréhension de la chirurgie crânio-faciale et maxillo-faciale, avec une amélioration significative des connaissances et des compétences chirurgicales. Les modèles imprimés en 3D sont considérés comme un outil efficace pour l'enseignement et la formation en chirurgie crânio-faciale et maxillo-faciale.

II. Apport en chirurgie maxillo-faciale de reconstruction :

Plusieurs études ont évalué les avantages cliniques de l'utilisation de modèles anatomiques personnalisés imprimés en 3D en chirurgie maxillo-faciale reconstructrice.

La planification chirurgicale en maxillo-faciale reconstructrice peut être améliorée grâce à l'utilisation de modèles anatomiques. Ils peuvent être utilisés pour déterminer les incisions, évaluer les pertes osseuses, choisir les outils nécessaires et préparer les implants ou les plaques d'ostéosynthèse, ce qui peut optimiser le résultat final de l'intervention.

Les guides chirurgicaux imprimés en 3D facilitent la transition de la planification virtuelle à la salle d'opération. Ils peuvent prendre la forme de gouttières de redressement, de guides de coupe, de perçage ou de positionnement.

Les guides de coupe permettent d'exécuter de manière adéquate la planification préopératoire pour les ostéotomies mandibulaires et fibulaires. Ils minimisent le temps requis pour l'ostéotomie fibulaire et éliminent la nécessité de mesurer ou de conformer manuellement en per-opératoire. Cela réduit les risques liés à la manipulation des segments fibulaires et vise à obtenir un positionnement précis avec une approximation osseuse optimale. L'accélération de ces étapes permet de réduire le temps chirurgical et la durée de l'ischémie.

Ce chapitre se fonde à la fois sur l'examen des dernières revues systématiques qui ont examiné les avantages cliniques de l'impression 3D, sans faire de distinction entre les modes et les endroits d'impression, et sur l'analyse d'études publiées ultérieurement à ces revues. Cependant, il peut être difficile de déterminer qui fabrique les dispositifs sur mesure dans les études, à moins qu'ils ne soient fabriqués industriellement et requièrent des technologies coûteuses, comme les plaques d'ostéosynthèse ou les implants sur mesure.

Des études spécifiant une impression en interne ont été trouvées, mais elles sont peu nombreuses et se concentrent sur les guides chirurgicaux et les modèles anatomiques avec des plaques pré-conformées.

La majorité des études concernent la chirurgie reconstructrice de la mandibule ; quelques données concernant la traumatologie maxillaire et orbitaire sont également rapportées.

En 2019, une analyse systématique a examiné les bénéfices de 14 études comparatives qui ont utilisé l'impression 3D dans la chirurgie reconstructrice de la mâchoire (93,7% au niveau de la mandibule, principalement pour la chirurgie carcinologique) pour produire des modèles, des guides chirurgicaux, des plaques et des implants.

Les critères cliniques d'efficacité les plus fréquemment évalués dans les études incluses dans cette revue systématique étaient la durée opératoire (35,7%), les résultats esthétiques (28,6%) et la précision du lambeau (28,6%).

Il n'y a pas de différence significative entre les patients qui ont bénéficié de l'impression 3D et ceux qui ont été traités de manière traditionnelle quant à la survenue de complications et à la durée de l'hospitalisation. Cependant, une différence significative a été observée en faveur de l'impression 3D pour la durée opératoire, les résultats esthétiques et la précision du lambeau prélevé.

Une méta-analyse incluant 4 études a montré que l'utilisation de l'impression 3D a permis de réduire significativement le temps opératoire en moyenne de 21,2% (95% IC 10-33% ; $p < 0.001$) par rapport à des méthodes conventionnelles. Cette réduction est due à la planification préopératoire et à l'utilisation d'outils spécifiques pour prélever le lambeau osseux et pour la reconstruction.

Les auteurs de cette revue ont mis en évidence la nécessité de surveiller les résultats à long terme pour évaluer l'effet de l'impression 3D sur l'esthétique, la fonctionnalité, les perturbations neurosensorielles et la qualité de vie et la satisfaction des patients.

Les données concernant la chirurgie reconstructrice maxillo-faciale concernent surtout la reconstruction mandibulaire avec lambeau libre de fibula.

Des données provenant de revues systématiques et/ou de méta-analyses montrent que la planification préopératoire et l'utilisation de modèles imprimés en 3D avec plaques pré-conformées ainsi que de guides chirurgicaux imprimés en 3D peuvent réduire considérablement le temps opératoire et le temps d'ischémie.

Les auteurs soulignent l'hétérogénéité des études et la faible qualité méthodologique des études existantes et l'absence de randomisation, ce qui rend nécessaires des études supplémentaires pour confirmer les résultats.

Des études rétrospectives ultérieures aux revues systématiques démontrent également une précision adéquate en utilisant des guides imprimés en 3D pour la chirurgie reconstructrice de la mandibule.

Les données recueillies pour la chirurgie reconstructrice du plancher orbitaire et du complexe maxillo-zygomatique montrent que l'utilisation de la planification chirurgicale avec un modèle 3D pré-conformé et des plaques d'ostéosynthèse ou de reconstruction améliore la précision de la reconstruction et réduit le temps opératoire, ce qui se traduit par des résultats plus performants.

III. Apport en Chirurgie orthognathique :

Une revue de la littérature a étudié l'apport de l'utilisation d'implants personnalisés imprimés en 3D en chirurgie orthognathique.

En général, l'utilisation de guides chirurgicaux imprimés en 3D offre des résultats positifs en termes de précision de positionnement du maxillaire et/ou de la mandibule en fonction de la planification virtuelle dans toutes les directions de l'espace.

Les auteurs mettent en évidence les limites des études existantes, telles que le manque de données prospectives et l'hétérogénéité des séries de cas, et concluent qu'il est nécessaire de mener des études comparatives prospectives avec des méthodes d'évaluation cohérentes pour établir les avantages réels de la technologie.

Les guides chirurgicaux assurent un positionnement précis du maxillaire et de la mandibule en conformité avec la planification chirurgicale virtuelle dans toutes les directions de l'espace. Cependant, il y a des limites dans certaines situations, telles que les difficultés de simulation et de planification pour le maxillaire après plusieurs ostéotomies segmentaires, la nécessité de déterminer soigneusement les positions des trous de vis dans les guides lorsque la paroi antérieure du maxillaire est fine, ainsi que les coûts de fabrication élevés.

L'utilisation combinée de guides chirurgicaux et de plaques d'ostéosynthèse personnalisées semble permettre un transfert précis de la planification chirurgicale virtuelle au patient. La réduction du temps opératoire peut éventuellement remplacer la technique standard avec des gouttières occlusales.

Les limites incluent les coûts élevés et le manque de flexibilité pour faire face à des imprévus lors de la chirurgie.

Les gouttières occlusales imprimées en 3D offrent une précision acceptable. La chirurgie assistée par ordinateur avec l'utilisation de ces gouttières a tendance à améliorer la précision de la planification chirurgicale et du positionnement des mâchoires.

Des études comparatives contrôlées aléatoires entre la planification conventionnelle et la planification virtuelle avec des dispositifs imprimés en 3D ont montré des améliorations dans la précision avec l'utilisation de gouttières imprimées 3D et de plaques préformées sur des modèles 3D, ainsi que des guides de coupe et de repositionnement combinés à des plaques sur mesure.

Les études comparatives montrent une amélioration de la précision chirurgicale avec l'utilisation de guides de coupe et repositionnement ainsi que des guides de coupe associés à des plaques sur mesure, par rapport à l'utilisation de gouttières imprimées en 3D. La chirurgie assistée par ordinateur avec des gouttières et des plaques pré conformées sur un modèle 3D peut réduire le temps d'intervention.

Peu d'études ont examiné la fabrication interne des dispositifs chirurgicaux imprimés en 3D. Celles qui existent montrent que c'est faisable et que les gouttières, les modèles et les guides peuvent être fabriqués avec une précision satisfaisante. L'utilisation de modèles et de plaques pré-conformées et de guides chirurgicaux imprimés en interne peut également réduire le temps opératoire.

IV. Apport en implantologie dentaire :

Les études cliniques ont révélé que la précision de la chirurgie implantaire assistée par ordinateur avec des guides fabriqués par stéréolithographie est adéquate et comparable à celle de la chirurgie conventionnelle non assistée par ordinateur.

De plus, les données indiquent que la précision est meilleure avec des guides à appui dentaire plutôt qu'à appui muqueux ou osseux, et avec une CAO complète plutôt qu'une CAO semi-guidée (guide de pointage seulement sans guide pour la pose d'implants).

Les auteurs des revues systématiques soulignent la nécessité pour les cliniciens de prendre en compte toutes les étapes du protocole pour éviter les erreurs accumulées et de prévoir une marge de sécurité autour des implants lors de la planification virtuelle, qui est généralement incluse dans les logiciels de planification implantaire.

Des études prospectives ont montré une bonne précision de la position des implants après la pose chirurgicale assistée par des guides. Les déviations linéaires et angulaires ont été estimées à :

- $0.7 \text{ mm} \pm 0.3 \text{ mm}$ au niveau coronaire
- $1.4 \text{ mm} \pm 0.6 \text{ mm}$ au niveau apical
- $0.3 \text{ mm} \pm 0.3 \text{ mm}$ pour la hauteur
- $4.1^\circ \pm 2.1^\circ$ pour la déviation angulaire

Les résultats des implantations avec des guides chirurgicaux n'ont pas été affectés de manière significative par la localisation et la configuration de l'implant ou l'utilisation de techniques de préservation de la crête alvéolaire.

L'utilisation de la chirurgie implantaire assistée par ordinateur avec des guides chirurgicaux imprimés en 3D pour guider la procédure de forage et de pose des implants est également recommandée par certains cliniciens. Les avantages comprennent la potentialité d'éviter la nécessité d'un lambeau muqueux, une réduction du temps opératoire et de la douleur postopératoire, ainsi qu'une possibilité de pose d'une prothèse temporaire immédiatement dans les protocoles avec peu de nécessité de correction.

Les données des études contrôlées randomisées ne montrent pas de différence significative en termes de bénéfices cliniques entre la chirurgie implantaire assistée par ordinateur avec des guides chirurgicaux imprimés en 3D et la chirurgie implantaire conventionnelle non assistée par ordinateur. Les revues systématiques et méta-analyses mettent en évidence les limites du nombre et du suivi à court terme des études, ainsi que leur hétérogénéité en termes de types et de connections d'implants, de types de voies d'abord avec ou sans lambeaux et de fabricants de guides. La plupart des études identifiées utilisent la méthode d'impression SLA et externalisent l'impression.

Des données *in vitro* comparant différentes imprimantes n'ont pas montré de différence significative en termes de précision du positionnement implantaire entre les différentes imprimantes.

Pour minimiser les coûts et accélérer le temps de fabrication, certaines études expérimentales suggèrent l'utilisation de la technologie d'impression FDM avec de nouveaux matériaux plus durables que le PLA. Cependant, des

données cliniques supplémentaires sont nécessaires pour évaluer et valider l'utilisation d'autres techniques d'impression, ainsi que de nouveaux matériaux potentiels.

En synthèse, la planification implantaire 3D requiert une expertise spécifique que les chirurgiens seuls n'ont pas encore. Étant donné que les chirurgiens ont une grande responsabilité pour assurer les résultats pour leurs patients lors de la phase cruciale de planification préopératoire, certains peuvent craindre de ne plus avoir le contrôle sur les décisions qui impactent leurs patients. [51]

De plus, dans presque la moitié des études incluses, les bénéfices perçus de l'utilisation de l'impression 3D pour la planification préopératoire ont été rapportés.

L'utilisation de l'impression 3D dans la planification préopératoire peut aider les chirurgiens à mieux comprendre l'anatomie du patient, ce qui peut permettre d'éviter les problèmes potentiels lors de l'intervention et d'améliorer ainsi les résultats pour le patient.

Des avancées dans ce domaine pourraient se produire rapidement en raison de l'augmentation de l'accès aux logiciels de modélisation en 3D.

Enfin, nous avons constaté que les avantages perçus de l'impression 3D dans la planification préopératoire sont nombreux et qu'ils pourraient potentiellement améliorer les résultats pour les patients. Cependant, il est important de noter que le nombre d'avantages rapportés peut être influencé par un biais de publication, ce qui peut entraîner une sous-estimation des inconvénients de l'impression 3D.



CONCLUSION



Au cours de la dernière décennie, la technologie d'impression 3D s'est rapidement développée dans différents secteurs médicaux, y compris la chirurgie maxillo-faciale.

La mise en œuvre de technologies 3D dans la conception et la fabrication d'implants est en train d'inaugurer une nouvelle révolution en chirurgie orale et maxillo-faciale afin de réduire le temps de conception, accélérer la fabrication et améliorer les performances.

La planification 3D est désormais un outil important dans l'arsenal thérapeutique que le chirurgien maxillo-facial doit acquérir en l'occurrence vu la complexité de l'anatomie faciale et des difficultés qu'on rencontre en traumatologie de la face, en cancérologie, et en orthognatie.

La planification 3D nous offre la possibilité de visualiser une extension tumorale par exemple et améliorer les résultats post opératoires en diminuant les reprises. Elle permet également l'amélioration de la communication du plan de traitement au patient et à l'équipe soignante en simulant l'intervention chirurgicale ainsi que le résultat.

Nous avons mis en évidence les différentes étapes permettant d'aboutir à un processus de fabrication de bio modèles depuis l'acquisition de l'imagerie à la reconstruction 3D virtuelle jusqu'à l'impression 3D tenant en compte les recommandations de bonne pratique (RBP).

Nous avons également essayé d'appliquer cette nouvelle technologie chez des patients admis en service de chirurgie maxillo-faciale à l'hôpital militaire d'instruction à Rabat pour une asymétrie faciale, ainsi qu'une dysmorphose maxillo-mandibulaire classe III.

Ce travail peut aider à prendre des décisions éclairées lors de la mise en œuvre de la planification chirurgicale virtuelle et de l'impression 3D dans les

services hospitaliers ou servir de motivation pour des recherches futures qui peuvent développer davantage l'impression 3D au point de service dans la chirurgie cranio-maxillo-faciale.

Les avantages de cette innovation technologique sont évidents et bien établis : efficacité, rapidité, précision et obtention des résultats cliniques optimaux et prometteurs qui suggèrent que la technologie a atteint sa maturité.

Si leurs principaux inconvénients sont leur coût élevé et la nécessité d'une formation supplémentaire et d'une infrastructure lourde, ces obstacles peuvent être surmontés en établissant des centres spécialisés et de simulation 3D au sein des établissements de santé et facultés de médecine.

En outre, la démocratisation des techniques de prototypages rapides permettra une baisse des prix. L'évaluation économique reste quant à elle peu développée à ce jour. Les coûts associés devront être analysés de façon approfondie dans un futur proche afin d'envisager des sources de financement possibles et de pérenniser l'utilisation de cette technologie dans le secteur de la santé.

À la lumière de l'impact marqué de ces technologies sur le domaine, nous pensons que nous, cliniciens, devons les promouvoir activement et les mettre en œuvre dans notre travail quotidien, afin de repousser les limites du domaine et de le rapprocher de son plein potentiel.

Afin de consolider le rôle des dispositifs imprimés en 3D au point de service dans la pratique clinique standard et d'être considérés comme une alternative viable aux solutions professionnelles externalisées, d'autres évaluations prospectives, rigoureuses et à long terme de l'efficacité clinique, du rapport coût-efficacité et de la sécurité des dispositifs doivent être menées.



RÉSUMÉS



Résumé

Titre : L'impression 3D en chirurgie maxillo-faciale

Autrice : Jihad Aarab

Directeur de la thèse : Pr. Khalfi Lahcen

Mots clés : impression 3D – bio modèle – chirurgie maxillo-faciale – dispositif médical

La complexité de l'anatomie et de la fonctionnalité des structures crânio-maxillo-faciales, ainsi que la recherche des meilleurs résultats cliniques, exigent des traitements de pointe, spécifiques aux patients.

Le développement technologique stimule fortement l'évolution de la chirurgie orale et cranio-maxillofaciale. Parmi tous les procédés de fabrication additive, " l'impression tridimensionnelle", souvent utilisée comme synonyme de fabrication additive, joue un rôle de plus en plus important. Cette technologie consiste à fabriquer des objets par dépôt de matière à l'aide d'une tête d'impression, d'une buse ou d'une autre technologie d'impression.

A présent, l'impression tridimensionnelle permet aux chirurgiens d'obtenir des modèles anatomiques pour améliorer la préparation et la stratégie opératoire, l'information du patient et la communication professionnelle ; il permet également la fabrication de dispositifs médicaux sur mesure – guides chirurgicaux, gouttières et implants spécifiques au patient.

Le but de ce travail est de décrire les étapes de la planification tridimensionnelle, l'impression de bio-modèles à travers les données d'imagerie et l'élaboration de guides chirurgicaux et propositions pour la planification des actes.

Nous nous sommes proposés dans notre travail de faire le point sur les principaux apports de l'impression 3D en chirurgie maxillo-faciale, ainsi que les défis et les enjeux règlementaires à prendre en considération.

Abstract

Title : 3D printing in maxillofacial surgery

Author : Jihad Aarab

Supervisor : Pr Khalfi Lahcen

Key words : 3D printing - biomodel - maxillofacial surgery - medical device

The complexity of the anatomy and functionality of the cranio-maxillofacial structures, as well as the search for the best clinical results, require advanced, patient-specific treatments.

Technological development is strongly driving the evolution of oral and cranio-maxillofacial surgery. Among all the additive manufacturing processes, "three-dimensional printing", often used as a synonym for additive manufacturing, plays an increasingly important role. This technology consists of manufacturing objects by depositing material using a print head, a nozzle or another printing technology.

Now, three-dimensional printing allows surgeons to obtain anatomical models to improve surgical preparation and strategy, patient information and professional communication ; it also enables the manufacture of custom medical devices - surgical guides, splints and patient-specific implants.

The aim of this study is to describe the steps of the three-dimensional planning, the printing of bio-models through imaging data and the elaboration of surgical guides and proposals for the planning of procedures.

In our work, we proposed to review the main contributions of 3D printing in maxillofacial surgery, as well as the challenges and regulatory issues to be considered.

ملخص

العنوان: الطباعة ثلاثية الأبعاد على مستوى جراحة الوجه والفكين

المؤلف: جهاد أعراب

مدير الأطروحة: أ.خلفي الحسن

الكلمات الأساسية: طباعة ثلاثية الأبعاد - نموذج حيوي - جراحة الوجه والفكين - جهاز طبي

يعد تخطيط و تنفيذ العمليات لجراحة هيكل الوجه و الفك صعبة و تتطلب - فضلا عن السعي لتحقيق أفضل النتائج السريرية - علاجات متطورة خاصة بالمريض.

يحفز التطور التكنولوجي بشدة تطور جراحة الوجه و الفم و الفكين. من بين جميع عمليات التصنيع المضافة، تلعب الطباعة ثلاثية الأبعاد دوراً متزايد الأهمية. تهدف هذه التقنية إلى تصنيع القطع عن طريق استخدام رأس طباعة أو فوهة أو تقنية طباعة أخرى.

حالياً، تتيح الطباعة ثلاثية الأبعاد للجراحين الحصول على نماذج تشريحية لتحسين تحضير و تنفيذ العملية الجراحية، و كذلك التواصل المهني و العلاقة بين الطبيب و المريض؛ كما يسمح بتصنيع الأجهزة الطبية حسب الطلب.

الهدف من هذا العمل هو وصف خطوات التخطيط ثلاثي الأبعاد، ثم طباعة النماذج البيولوجية من خلال البيانات الإشعاعية و تطوير أدلة الجراحة و مقترحات التخطيط الجراحي.

لقد اقترحنا في عملنا هذا تقييم المساهمات الرئيسية للطباعة ثلاثية الأبعاد في جراحة الوجه و الفكين، بالإضافة إلى التحديات التنظيمية التي يجب أخذها بعين الاعتبار.



REFERENCES



- [1] Berchon, M. & Luyt, B. (2014). L'impression 3D. Editions Eyrolles.
- [2] Collège hospitalo-universitaire français de chirurgie maxillo-faciale et stomatologie Anatomie cranio-faciale. :19.
- [3] Hauteville, D. A. (2012, Juin 15). *Les proportions du visage et les points céphalométriques*. Récupéré sur Conseildentaire: conseildentaire.com
- [4] Arnaud, M. Bouzebec, V. Huguier, V. Darsonval, P. Rousseau : *Annales de chirurgie plastique esthétique* (2013) 58, 389—427. La reconstruction frontotemporale esthétique. Forehead and temple aesthetic reconstruction.
- [5] Atlas d'anatomie chirurgicale de la face et du cou, Tome 1 : Paupières, orbite, voies lacrymales nez et sinus.
- [6] Anatomie et fonction des paupières et conjonctives : Anne Faucher, MD, FRCS, Université de Sherbrooke Septembre 2000.
- [7] Université Médicale Virtuelle Francophone Anatomie cranio-faciale. <http://umvf.univ-nantes.fr/chirurgie-maxillo-faciale-etstomatologie/enseignement/stomatologie1/site/html/cours.pdf>.
- [8] Y. Saban, R. Polselli, V. Ruvolo Anatomie de la face. Chirurgie réparatrice du visage et du cou, tome 1, chapitre 1, pages 4-15.(2011)
- [9] Couly G. Anatomie Maxillo-Faciale. Paris: Julien Prelat ; 1991. 69:193-7.
- [10] *anatomie cranio-faciale*. (s.d.). Récupéré sur [clemedicine](https://clemedicine.com/1-anatomie-cranio-faciale/): <https://clemedicine.com/1-anatomie-cranio-faciale/>

- [11] Clemente, Carmine (1987). *Anatomy, a regional atlas of the human body*. Baltimore: Urban & Schwarzenberg. ISBN 978-0-8067-0323-7.
- [12] Ash, Major M.; Nelson, Stanley J. (2003). *Wheeler's Dental Anatomy, Physiology, and Occlusion* (8th ed.).
- [13] *Anatomie dentaire et nomenclature*. (s.d.). Récupéré sur Maxillocllic: <https://www.maxillocllic.com/anatomie-dentaire>
- [14] Watanabe, K., Shoja, M. M., & Loukas, M. (Eds.). (2016). *Anatomy for plastic surgery of the face, head and neck*. Thieme.
- [15] FRANK, Netter H. *Atlas d'anatomie humaine*. 6ème édition. Elsevier Masson, 2014
- [16] *Diagnostic des lésions intéressant le trijumeau*. (s.d.). Récupéré sur ophtalmologie.pro: <https://ophtalmologie.pro/diagnostic-lesions-interessant-trijumeau/>
- [17] Taillia H, de Greslan T, Renard J-L, Flocard F. Examen neurologique facial à l'usage de l'odontologue et du chirurgien maxillofacial. *EMC - Dentisterie* 2004;1:131–46. doi:10.1016/j.emcden.2003.12.004.
- [18] Gray, H. (1878). *Anatomy of the human body* (Vol. 8). Lea & Febiger.
- [19] Igor M, Willy L, Dulguerov P. Evidement ganglionnaire cervical endoscopique. Thèse Doctorat Médecine, Genève ; 2003, n° 10319.
- [20] RIVIERE, J.-P. (2018, Novembre 15). *Névralgie du trijumeau : premières recommandations françaises sur le diagnostic et la prise en charge*. Récupéré sur vidal: [vidal.fr](http:// Vidal.fr)

- [21] LOUTRY, P. Y. (s.d.). le nerf facial. marrakech, Département d'anatomie- FMPM.
- [22] Habib, D. E. (s.d.). *Pièges anatomiques cervicofaciaux*. Récupéré sur [medicine key: https://clemedicine.com/pieges-anatomiques-cervicofaciaux/](https://clemedicine.com/pieges-anatomiques-cervicofaciaux/)
- [23] ROUVIERE. H Anatomie humaine Paris, Masson, 1978. n.d.
- [24] Louis Dubertret, chef de service de dermatologie à l'hôpital Saint-Louis, directeur de l'Institut de recherche sur la peau « Peau », Encyclopedieuniversalis, université de Paris-VII
- [25] Skin care forum : The skin as blood vessel system. URL www.carecreations.basf.com
- [26] Iriarte Ortabe J.I ThC Reychler H. Abord orbito-fronto-temporal des tumeurs basicroâniennes. Notre expérience dans la création d'un volet orbito-zygomatiko-malaire. Ann Chir Plast 1993
- [27] *APPLICATIONS DE LA CHIRURGIE DE LA PEAU*. (s.d.). Récupéré sur chirurgie esthetique france: <http://www.chirurgie-esthetique-france.fr>
- [28] *Sous-unités de la face*. (s.d.). Récupéré sur [medicine key: http://www.clemedicine.com](http://www.clemedicine.com)
- [29] Dorland W: Dorland's illustrated medical dictionary, ed 32, Philadelphia, PA, 2011, WB Saunders Co.
- [30] Angle EH : Classification of malocclusion, Dent Cosmos 41 : 248-264, 1899.

- [31] Eng. PhD. Marinela CIORTAN, Auto College Traian Vuia Targu-Jiu
 Prof. PhD. Liliana LUCA, University Constantin Brancusi of Targu-Jiu
 Assist. Prof. Dr. Ruxandra LUCA, University of Medicine and
 Pharmacy "Victor Babes" Timisoara
- [32] ostad, A. (s.d.). *La cinetique mandibulaire*. Récupéré sur les cours
 dentaires: <http://cours-dentaire.blogspot.com/2011/01/la-cinetique-mandibulaire.html>
- [33] Kovalev, A. (2014, Février 20). *On a retrouvé les vrais inventeurs de
 l'imprimante 3D*. Récupéré sur Capital:
<https://www.capital.fr/economie-politique/on-a-retrouve-les-vrais-inventeurs-de-l-imprimante-3d-912430>
- [34] *Brief History of Printing Methodology*. (2022, juillet 26). Récupéré sur
 nano 3D print: <https://nano3dprint.com/2022/07/26/3d-printing-a-brief-history-of-printing-methodology/>
- [35] GHILASSENE, F. (2014, Septembre). *L'impression 3D Impacts
 économiques et enjeux juridiques*. Récupéré sur INPI:
https://www.inpi.fr/sites/default/files/l_impression_3d_sept_2014.pdf
- [36] Computer Hope. (2019, Novembre 16). *S. Scott Crump*. Récupéré sur
 Computer Hope:
https://www.computerhope.com/people/s_scott_crump.html
- [37] Sarah. (s.d.). *L'histoire de l'impression 3D : des premières technologies
 d'impression 3D à aujourd'hui*. Récupéré sur La Printery:
<https://www.laprintery.com/decouverte-de-limpression-3d/histoire-de-limpression-3d/>

- [38] Veille technologique : L'impression 3D. (2016).Martens Tristan SIO
<https://martenstristansio.wordpress.com/actualites-du-1ere-au-15-octobre/veilletechnologique/introduction/>
- [39] Berchon,M. & Luyt, B. (2014). L'impression 3D. Editions Eyrolles.
- [40] HOW 3D PRINTING WORKS. (2017, 04 28). Récupéré sur My 3D concepts: <http://my3dconcepts.com/explore/how-3d-printing-works/>
- [41] *Impression 3D internalisée (non industrielle) en chirurgie maxillo-faciale, stomatologie et chirurgie orale.* (2021, Mai). Récupéré sur Société française de stomatologie, chirurgie maxillo-faciale et chirurgie orale: <https://sfscmfco.fr/sfs/wp-content/uploads/2021/08/Reco-SFSCMFCO-2021-impression-3D-médicale-internalisée.pdf>
- [42] Zoabi, A., Redenski, I., Oren, D., Kasem, A., Zigron, A., Daoud, S., Moskovich, L., Kablan, F., & Srouji, S. (2022). 3D Printing and Virtual Surgical Planning in Oral and Maxillofacial Surgery. *Journal of clinical medicine, 11*(9), 2385.
- [43] *OsiriX User Manual* . (s.d.). Récupéré sur OsiriX Dicom Viewer: <https://www.osirix-viewer.com/>
- [44] *3D doctor FDA 510K CLEARED, LOGICIEL D'IMAGERIE, DE MODÉLISATION ET DE MESURE 3D VECTORIEL.* (s.d.). Récupéré sur <https://www.ablesw.com/3d-doctor/>
- [45] *3D-DOCTOR User's Manual.* (2012, Janvier 1). Récupéré sur Able Software Corp: <https://www.ablesw.com/3d-doctor/manual.pdf/>

- [46] 3D systems corporation. (2020, Février). *Brochure D2P dicom to print*. Récupéré sur 3D systems corporation: https://fr.3dsystems.com/sites/default/files/2021-03/MM-925%20Rev%20A-D2P%20Bi-Fold-WEB_0.pdf
- [47] *Dicom to print*. (s.d.). Récupéré sur 3D systems corporation: <https://fr.3dsystems.com/dicom-to-print>
- [48] bathroomTile. (s.d.). *Crâne humain réaliste modèle 3D*. Récupéré sur turbosquid: <https://www.turbosquid.com>
- [49] Gaget, L. (2017, décembre 7). *Top 8 des meilleurs logiciels de modélisation 3D pour le secteur médical*. Récupéré sur SCULPTEO - a brand of BASF: <https://www.sculpteo.com/blog/fr/2017/12/07/top-8-des-meilleurs-logiciels-de-modelisation-3d-pour-le-secteur-medical/>
- [50] *Logiciel médical Medical Design Studio*. (s.d.). Récupéré sur Anatomage: <https://www.medicalexpo.fr/prod/anatomage/product-83721-528931.html>
- [51] Carole Serrano. *Impression 3D de dispositifs médicaux utilisés en chirurgie : quelles recommandations pour l'élaboration d'un modèle d'évaluation médico-économique ?*. Economies et finances. Université Paris-Saclay, 2020. Français. ffNNT : 2020UPASQ024ff. fftel-03218250
- [52] la fabrication additive. (s.d.). *la fabrication additive*. Récupéré sur <https://www.fabrication-additive.fr/js/tinymce/source//processus-depot-fil-fondu.jpg>

- [53] Jacquet, R. (2014, Octobre 24). *Impression 3D : les différents procédés*. Récupéré sur les numeriques: <https://www.lesnumeriques.com/imprimante-3d/impression-3d-differents-procedes-a1876.html>
- [54] *Imprimantes 3D FDM, Résine ou SLS : comment choisir ?* (s.d.). Récupéré sur netforme3d: <https://www.netforme3d.fr/imprimantes-3d-fdm-resine-sls/>
- [55] W., M. (2019, Mars 14). *Frittage Sélectif par Laser, on vous explique tout !* Récupéré sur 3D natives: <https://www.3dnatives.com/frittage-selectif-par-laser/>
- [56] Poyet A. *Le dispositif médical, aspects réglementaires et économiques, évolution sur les dix dernières années*. Thèse de doctorat en pharmacie. Lyon : Université Lyon-I;2003.
- [57] Article 11-Loi n°84-12 relative aux dispositifs médicaux <https://www.sante.gov.ma/Reglementation/REGLEMENTATIONAPPLICABLEAUXPRODUITSDESANTE/84-12.pdf>

Serment d'Hippocrate

Au moment d'être admis à devenir membre de la profession médicale, je m'engage solennellement à consacrer ma vie au service de l'humanité.

- *Je traiterai mes maîtres avec le respect et la reconnaissance qui leur sont dus.*
- *Je pratiquerai ma profession avec conscience et dignité. La santé de mes malades sera mon premier but.*
- *Je ne trahirai pas les secrets qui me seront confiés.*
- *Je maintiendrai par tous les moyens en mon pouvoir l'honneur et les nobles traditions de la profession médicale.*
- *Les médecins seront mes frères.*
- *Aucune considération de religion, de nationalité, de race, aucune considération politique et sociale ne s'interposera entre mon devoir et mon patient.*
- *Je maintiendrai le respect de la vie humaine dès la conception.*
- *Même sous la menace, je n'userai pas de mes connaissances médicales d'une façon contraire aux lois de l'humanité.*
- *Je m'y engage librement et sur mon honneur.*

قسم أبقراط

بسم الله الرحمن الرحيم

أقسم بالله العظيم

في هذه اللحظة التي يتم فيها قبولي عضوا في المهنة الطبية أتعهد علانية:

- ◀ بأن أكرس حياتي لخدمة الإنسانية .
- ◀ وأن أحترم أساتذتي وأعترف لهم بالجميل الذي يستحقونه .
- ◀ وأن أمارس مهنتي بواجب من ضميري وشرفي جاعلا صحة مريض هدي في الأول .
- ◀ وأن لا أفشي الأسرار المعهودة إلي .
- ◀ وأن أحافظ بكل ما لدي من وسائل على الشرف والتقاليد النبيلة لمهنة الطب .
- ◀ وأن أعتبر سائر الأطباء إخوة لي .
- ◀ وأن أقوم بواجبي نحو مرضاي بدون أي اعتبار ديني أو وطني أو عرقي أو سياسي أو اجتماعي .
- ◀ وأن أحافظ بكل حزم على احترام الحياة الإنسانية منذ نشأتها .
- ◀ وأن لا أستعمل معلوماتي الطبية بطرق يضر بحقوق الإنسان مهما لاقيت من تهديد .
- ◀ بكل هذا أتعهد عن كامل اختيار ومقسما بالله .

والله على ما أقول شهيد .



المملكة المغربية
جامعة محمد الخامس بالرباط
كلية الطب والصيدلة
الرباط



أطروحة رقم: 115

سنة : 2023

الطباعة ثلاثية الأبعاد على مستوى جراحة الوجه والفكين

أطروحة

قدمت ونوقشت علانية يوم : / / 2023

من طرف

السيدة جهاد أعراب

المزودة في 04 يوليوز 1996 بالرباط

لنيل شهادة

دكتور في الطب

الكلمات الأساسية : طباعة ثلاثية الأبعاد؛ نموذج حيوي، جراحة الوجه والفكين؛
جهاز طبي

أعضاء لجنة التحكيم:

رئيس اللجنة	السيد محمد كريم الخطيب
مدير الأطروحة	أستاذ في أمراض الفم وجراحة الوجه والفكين السيد لحسن خلفي
عضو	أستاذ في أمراض الفم وجراحة الوجه والفكين السيد جواد حفيظي
عضو	أستاذ في الجراحة التجميلية والترميمية السيد جلال حمارة
عضو	أستاذ في أمراض الفم وجراحة الوجه والفكين السيد عبد الحفيظ أشبوق
	أستاذ في الجراحة التجميلية والترميمية