



**HAL**  
open science

# Impact écologique de la réalisation d'une prothèse totale de genou : analyse du cycle de vie de la matière première jusqu'aux implants définitifs

Camille Delaie

## ► To cite this version:

Camille Delaie. Impact écologique de la réalisation d'une prothèse totale de genou : analyse du cycle de vie de la matière première jusqu'aux implants définitifs. Sciences du Vivant [q-bio]. 2021. dumas-03475076

**HAL Id: dumas-03475076**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03475076>**

Submitted on 10 Dec 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**Faculté des sciences  
médicales et paramédicales**

Aix-Marseille Université

**Impact écologique de la réalisation d'une prothèse totale de genou :  
analyse du cycle de vie de la matière première jusqu'aux implants définitifs**

# **T H È S E**

**Présentée et publiquement soutenue devant**

**LA FACULTÉ DES SCIENCES MÉDICALES ET PARAMÉDICALES**

**DE MARSEILLE**

**Le 3 Décembre 2021**

**Par Madame Camille DELAIE**

**Née le 21 août 1993 à Meudon (92)**

Pour obtenir le grade de Docteur en Médecine

**D.E.S. de CHIRURGIE ORTHOPÉDIQUE ET TRAUMATOLOGIQUE**

**Membres du Jury de la Thèse :**

<b>Monsieur le Professeur ARGENSON Jean-Noël</b>	<b>Président</b>
<b>Monsieur le Professeur OLLIVIER Matthieu</b>	<b>Directeur</b>
<b>Monsieur le Professeur FLECHER Xavier</b>	<b>Assesseur</b>
<b>Madame le Docteur LE BARON Marie</b>	<b>Assesseur</b>
<b>Monsieur le Docteur FABRE-AUBRESPY Maxime</b>	<b>Assesseur</b>
<b>Monsieur le Docteur CERLIER Alexandre</b>	<b>Assesseur</b>





**Faculté des sciences  
médicales et paramédicales**

Aix-Marseille Université

**Impact écologique de la réalisation d'une prothèse totale de genou :  
analyse du cycle de vie de la matière première jusqu'aux implants définitifs**

# **T H È S E**

**Présentée et publiquement soutenue devant**

**LA FACULTÉ DES SCIENCES MÉDICALES ET PARAMÉDICALES**

**DE MARSEILLE**

**Le 3 Décembre 2021**

**Par Madame Camille DELAIE**

**Née le 21 août 1993 à Meudon (92)**

Pour obtenir le grade de Docteur en Médecine

**D.E.S. de CHIRURGIE ORTHOPÉDIQUE ET TRAUMATOLOGIQUE**

**Membres du Jury de la Thèse :**

<b>Monsieur le Professeur ARGENSON Jean-Noël</b>	<b>Président</b>
<b>Monsieur le Professeur OLLIVIER Matthieu</b>	<b>Directeur</b>
<b>Monsieur le Professeur FLECHER Xavier</b>	<b>Assesseur</b>
<b>Madame le Docteur LE BARON Marie</b>	<b>Assesseur</b>
<b>Monsieur le Docteur FABRE-AUBRESPY Maxime</b>	<b>Assesseur</b>
<b>Monsieur le Docteur CERLIER Alexandre</b>	<b>Assesseur</b>

## FACULTÉ DES SCIENCES MÉDICALES & PARAMÉDICALES

<b>Doyen</b>	:	<b>Pr. Georges LEONETTI</b>
Vice-Doyen aux affaires générales	:	Pr. Patrick DESSI
Vice-Doyen aux professions paramédicales	:	Pr. Philippe BERBIS
Conseiller	:	Pr. Patrick VILLANI

### **Asseseurs :**

➤ aux études	:	Pr. Kathia CHAUMOITRE
➤ à la recherche	:	Pr. Jean-Louis MEGE
➤ à l'unité mixte de formation continue en santé	:	Pr. Justin MICHEL
➤ pour le secteur NORD	:	Pr. Stéphane BERDAH
➤ Groupements Hospitaliers de territoire	:	Pr. Jean-Noël ARGENSON
➤ aux masters	:	Pr. Pascal ADALIAN

### **Chargés de mission :**

➤ sciences humaines et sociales	:	Pr. Pierre LE COZ
➤ relations internationales	:	Pr. Stéphane RANQUE
➤ DU/DIU	:	Pr. Véronique VITTON
➤ DPC, disciplines médicales & biologiques	:	Pr. Frédéric CASTINETTI
➤ DPC, disciplines chirurgicales	:	Dr. Thomas GRAILLON

## ÉCOLE DE MEDECINE

<b>Directeur</b>	:	<b>Pr. Jean-Michel VITON</b>
------------------	---	------------------------------

### **Chargés de mission**

▪ PACES – Post-PACES	:	Pr. Régis GUIEU
▪ DFGSM	:	Pr. Anne-Laure PELISSIER
▪ DFASM	:	Pr. Marie-Aleth RICHARD
▪ DFASM	:	Pr. Marc BARTHET
▪ Préparation aux ECN	:	Dr Aurélie DAUMAS
▪ DES spécialités	:	Pr. Pierre-Edouard FOURNIER
▪ DES stages hospitaliers	:	Pr. Benjamin BLONDEL
▪ DES MG	:	Pr. Christophe BARTOLI
▪ Démographie médicale	:	Dr. Noémie RESSEGUIER
▪ Etudiant	:	Elise DOMINJON

## ÉCOLE DE DE MAIEUTIQUE

**Directrice** : **Madame Carole ZAKARIAN**

**Chargés de mission**

- 1<sup>er</sup> cycle : Madame Estelle BOISSIER
- 2<sup>ème</sup> cycle : Madame Cécile NINA

## ÉCOLE DES SCIENCES DE LA RÉADAPTATION

**Directeur** : **Monsieur Philippe SAUVAGEON**

**Chargés de mission**

- Masso- kinésithérapie 1<sup>er</sup> cycle : Madame Béatrice CAORS
- Masso-kinésithérapie 2<sup>ème</sup> cycle : Madame Joannie HENRY
- Mutualisation des enseignements : Madame Géraldine DEPRES

## ÉCOLE DES SCIENCES INFIRMIERES

**Directeur** : **Monsieur Sébastien COLSON**

**Chargés de mission**

- Chargée de mission : Madame Sandrine MAYEN RODRIGUES
- Chargé de mission : Monsieur Christophe ROMAN

## PROFESSEURS HONORAIRES

MM	AGOSTINI Serge	MM	DEVIN Robert
	ALDIGHERI René		DEVRED Philippe
	ALESSANDRINI Pierre		DJIANE Pierre
	ALLIEZ Bernard		DONNET Vincent
	AQUARON Robert		DUCASSOU Jacques
	ARGEME Maxime		DUFOUR Michel
	ASSADOURIAN Robert		DUMON Henri
	AUFFRAY Jean-Pierre		ENJALBERT Alain
	AUTILLO-TOUATI Amapola		FAUGERE Gérard
	AZORIN Jean-Michel		FAVRE Roger
	BAILLE Yves		FIECHI Marius
	BARDOT Jacques		FARNARIER Georges
	BARDOT André		FIGARELLA Jacques
	BERARD Pierre		FONTES Michel
	BERGOIN Maurice		FRANCES Yves
	BERLAND Yvon		FRANCOIS Georges
	BERNARD Dominique		FUENTES Pierre
	BERNARD Jean-Louis		GABRIEL Bernard
	BERNARD Jean-Paul		GALINIER Louis
	BERNARD Pierre-Marie		GALLAIS Hervé
	BERTRAND Edmond		GAMERRE Marc
	BISSET Jean-Pierre		GARCIN Michel
	BLANC Bernard		GARNIER Jean-Marc
	BLANC Jean-Louis		GAUTHIER André
	BOLLINI Gérard		GERARD Raymond
	BONGRAND Pierre		GEROLAMI-SANTANDREA André
	BONNEAU Henri		GIUDICELLI Sébastien
	BONNOIT Jean		GOUDARD Alain
	BORY Michel		GOUIN François
	BOTTA Alain		GRILLO Jean-Marie
	BOTTA-FRIDLUND Danielle		GRIMAUD Jean-Charles
	BOUBLI Léon		GRISOLI François
	BOURGADE Augustin		GROULIER Pierre
	BOUVENOT Gilles		GUYS Jean-Michel
	BOUYALA Jean-Marie		HADIDA/SAYAG Jacqueline
	BREMOND Georges		HASSOUN Jacques
	BRICOT René		HEIM Marc
	BRUNET Christian		HOUEL Jean
	BUREAU Henri		HUGUET Jean-François
	CAMBOULIVES Jean		JAQUET Philippe
	CANNONI Maurice		JAMMES Yves
	CARTOUZOU Guy		JOUVE Paulette
	CAU Pierre		JUHAN Claude
	CHABOT Jean-Michel		JUIN Pierre
	CHAMLIAN Albert		KAPHAN Gérard
	CHARPIN Denis		KASBARIAN Michel
	CHARREL Michel		KLEISBAUER Jean-Pierre
	CHAUVEL Patrick		LACHARD Jean
	CHOUX Maurice		LAFFARGUE Pierre
	CIANFARANI François		LAUGIER René
	CLAVERIE Jean-Michel		LE TREUT Yves
	CLEMENT Robert		LEGRE Régis
	COMBALBERT André		LEVY Samuel
	CONTE-DEVOLX Bernard		LOUCHET Edmond
	CORRIOL Jacques		LOUIS René
	COULANGE Christian		LUCIANI Jean-Marie
	CURVALE Georges		MAGALON Guy
	DALMAS Henri		MAGNAN Jacques
	DE MICO Philippe		MALLAN- MANCINI Josette

## PROFESSEURS HONORAIRES

DELPERO Jean-Robert  
DESSEIN Alain  
DELARQUE Alain

MALMEJAC Claude  
MARANINCHI Dominique  
MARTIN Claude

## PROFESSEURS HONORAIRES

MM	MATTEI Jean François	UNAL Daniel
	MERCIER Claude	VAGUE Philippe
	MICHOTEY Georges	VAGUE/JUHAN Irène
	MIRANDA François	VANUXEM Paul
	MONFORT Gérard	VERVLOET Daniel
	MONGES André	VIALETTES Bernard
	MONGIN Maurice	WEILLER Pierre-Jean
	MUNDLER Olivier	
	NAZARIAN Serge	
	NICOLI René	
	NOIRCLERC Michel	
	OLMER Michel	
	OREHEK Jean	
	PAPY Jean-Jacques	
	PAULIN Raymond	
	PELOUX Yves	
	PENAUD Antony	
	PENE Pierre	
	PIANA Lucien	
	PICAUD Robert	
	PIGNOL Fernand	
	POGGI Louis	
	POITOUT Dominique	
	PONCET Michel	
	POUGET Jean	
	PRIVAT Yvan	
	QUILICHINI Francis	
	RANQUE Jacques	
	RANQUE Philippe	
	RAOULT Didier	
	RICHAUD Christian	
	RIDINGS Bernard	
	ROCHAT Hervé	
	ROHNER Jean-Jacques	
	ROUX Hubert	
	ROUX Michel	
	RUFO Marcel	
	SAHEL José	
	SALAMON Georges	
	SALDUCCI Jacques	
	SAMBUC Roland	
	SAN MARCO Jean-Louis	
	SANKALE Marc	
	SARACCO Jacques	
	SARLES Jacques	
	SARLES - PHILIP Nicole	
	SASTRE Bernard	
	SCHIANO Alain	
	SCOTTO Jean-Claude	
	SEBAHOUN Gérard	
	SEITZ Jean-François	
	SERMENT Gérard	
	SOULAYROL René	
	TAMALET Jacques	
	TARANGER-CHARPIN Colette	
	THIRION Xavier	
	THOMASSIN Jean-Marc	

## EMERITAT

### 2008

M. le Professeur	LEVY Samuel	31/08/2011
Mme le Professeur	JUHAN-VAGUE Irène	31/08/2011
M. le Professeur	PONCET Michel	31/08/2011
M. le Professeur	KASBARIAN Michel	31/08/2011
M. le Professeur	ROBERTOUX Pierre	31/08/2011

### 2009

M. le Professeur	DJIANE Pierre	31/08/2011
M. le Professeur	VERVLOET Daniel	31/08/2012

### 2010

M. le Professeur	MAGNAN Jacques	31/12/2014
------------------	----------------	------------

### 2011

M. le Professeur	DI MARINO Vincent	31/08/2015
M. le Professeur	MARTIN Pierre	31/08/2015
M. le Professeur	METRAS Dominique	31/08/2015

### 2012

M. le Professeur	AUBANIAC Jean-Manuel	31/08/2015
M. le Professeur	BOUVENOT Gilles	31/08/2015
M. le Professeur	CAMBOULIVES Jean	31/08/2015
M. le Professeur	FAVRE Roger	31/08/2015
M. le Professeur	MATTEI Jean-François	31/08/2015
M. le Professeur	OLIVER Charles	31/08/2015
M. le Professeur	VERVLOET Daniel	31/08/2015

### 2013

M. le Professeur	BRANCHEREAU Alain	31/08/2016
M. le Professeur	CARAYON Pierre	31/08/2016
M. le Professeur	COZZONE Patrick	31/08/2016
M. le Professeur	DELMONT Jean	31/08/2016
M. le Professeur	HENRY Jean-François	31/08/2016
M. le Professeur	LE GUICHAOUA Marie-Roberte	31/08/2016
M. le Professeur	RUFO Marcel	31/08/2016
M. le Professeur	SEBAHOUN Gérard	31/08/2016

### 2014

M. le Professeur	FUENTES Pierre	31/08/2017
M. le Professeur	GAMERRE Marc	31/08/2017
M. le Professeur	MAGALON Guy	31/08/2017
M. le Professeur	PERAGUT Jean-Claude	31/08/2017
M. le Professeur	WEILLER Pierre-Jean	31/08/2017

### 2015

M. le Professeur	COULANGE Christian	31/08/2018
M. le Professeur	COURAND François	31/08/2018
M. le Professeur	FAVRE Roger	31/08/2016
M. le Professeur	MATTEI Jean-François	31/08/2016
M. le Professeur	OLIVER Charles	31/08/2016
M. le Professeur	VERVLOET Daniel	31/08/2016

## EMERITAT

### 2016

M. le Professeur	BONGRAND Pierre	31/08/2019
M. le Professeur	BOUVENOT Gilles	31/08/2017
M. le Professeur	BRUNET Christian	31/08/2019
M. le Professeur	CAU Pierre	31/08/2019
M. le Professeur	COZZONE Patrick	31/08/2017
M. le Professeur	FAVRE Roger	31/08/2017
M. le Professeur	FONTES Michel	31/08/2019
M. le Professeur	JAMMES Yves	31/08/2019
M. le Professeur	NAZARIAN Serge	31/08/2019
M. le Professeur	OLIVER Charles	31/08/2017
M. le Professeur	POITOUT Dominique	31/08/2019
M. le Professeur	SEBAHOUN Gérard	31/08/2017
M. le Professeur	VIALETTES Bernard	31/08/2019

### 2017

M. le Professeur	ALESSANDRINI Pierre	31/08/2020
M. le Professeur	BOUVENOT Gilles	31/08/2018
M. le Professeur	CHAUVEL Patrick	31/08/2020
M. le Professeur	COZZONE Pierre	31/08/2018
M. le Professeur	DELMONT Jean	31/08/2018
M. le Professeur	FAVRE Roger	31/08/2018
M. le Professeur	OLIVER Charles	31/08/2018
M. le Professeur	SEBBAHOUN Gérard	31/08/2018

### 2018

M. le Professeur	MARANINCHI Dominique	31/08/2021
M. le Professeur	BOUVENOT Gilles	31/08/2019
M. le Professeur	COZZONE Pierre	31/08/2019
M. le Professeur	DELMONT Jean	31/08/2019
M. le Professeur	FAVRE Roger	31/08/2019
M. le Professeur	OLIVER Charles	31/08/2019
M. le Professeur	RIDINGS Bernard	31/08/2021

### 2019

M. le Professeur	BERLAND Yvon	31/08/2022
M. le Professeur	CHARPIN Denis	31/08/2022
M. le Professeur	CLAVERIE Jean-Michel	31/08/2022
M. le Professeur	FRANCES Yves	31/08/2022
M. le Professeur	CAU Pierre	31/08/2020
M. le Professeur	COZZONE Patrick	31/08/2020
M. le Professeur	DELMONT Jean	31/08/2020
M. le Professeur	FAVRE Roger	31/08/2020
M. le Professeur	FONTES Michel	31/08/2020
M. le Professeur	MAGALON Guy	31/08/2020
M. le Professeur	NAZARIAN Serge	31/08/2020
M. le Professeur	OLIVER Charles	31/08/2020
M. le Professeur	WEILLER Pierre-Jean	31/08/2020

### 2020

M. le Professeur	DELPERO Jean-Robert	31/08/2023
M. le Professeur	GRIMAUD Jean-Charles	31/08/2023
M. le Professeur	SAMBUC Roland	31/08/2023
M. le Professeur	SEITZ Jean-François	31/08/2023
M. le Professeur	BERLAND Yvon	31/08/2022
M. le Professeur	CHARPIN Denis	31/08/2022
M. le Professeur	CLAVERIE Jean-Michel	31/08/2022
M. le Professeur	FRANCES Yves	31/08/2022
M. le Professeur	BONGRAND Pierre	31/08/2021
M. le Professeur	COZZONE Patrick	31/08/2021

## EMERITAT

M. le Professeur	FAVRE Roger	31/08/2021
M. le Professeur	FONTES Michel	31/08/2021
M. le Professeur	NAZARIAN Serge	31/08/2021
M. le Professeur	WEILLER Pierre-Jean	31/08/2021

2021

M. le Professeur	BOUBLI Léon	31/08/2024
M. le Professeur	LEGRE Régis	31/08/2024
M. le Professeur	RAOULT Didier	31/08/2024
M. le Professeur	DELPERO Jean-Robert	31/08/2023
M. le Professeur	GRIMAUD Jean-Charles	31/08/2023
M. le Professeur	SAMBUC Roland	31/08/2023
M. le Professeur	SEITZ Jean-François	31/08/2023
M. le Professeur	BERLAND Yvon	31/08/2022
M. le Professeur	CHARPIN Denis	31/08/2022
M. le Professeur	CLAVERIE Jean-Michel	31/08/2022
M. le Professeur	FRANCES Yves	31/08/2022
M. le Professeur	BONGRAND Pierre	31/08/2022
M. le Professeur	BRUNET Christian	31/08/2022
M. le Professeur	COZZONE Patrick	31/08/2022
M. le Professeur	FAVRE Roger	31/08/2022
M. le Professeur	FONTES Michel	31/08/2022
M. le Professeur	NAZARIAN Serge	31/08/2022
M. le Professeur	OLIVER Charles	31/08/2022

<b>1967</b>	
MM. les Professeurs	DADI (Italie) CID DOS SANTOS (Portugal)
<b>1974</b>	
MM. les Professeurs	MAC ILWAIN (Grande-Bretagne) T.A. LAMBO (Suisse)
<b>1975</b>	
MM. les Professeurs	O. SWENSON (U.S.A.) Lord J.WALTON of DETCHANT (Grande-Bretagne)
<b>1976</b>	
MM. les Professeurs	P. FRANCHIMONT (Belgique) Z.J. BOWERS (U.S.A.)
<b>1977</b>	
MM. les Professeurs	C. GAJDUSEK-Prix Nobel (U.S.A.) C.GIBBS (U.S.A.) J. DACIE (Grande-Bretagne)
<b>1978</b>	
M. le Président	F. HOUPHOUET-BOIGNY (Côte d'Ivoire)
<b>1980</b>	
MM. les Professeurs	A. MARGULIS (U.S.A.) R.D. ADAMS (U.S.A.)
<b>1981</b>	
MM. les Professeurs	H. RAPPAPORT (U.S.A.) M. SCHOU (Danemark) M. AMENT (U.S.A.) Sir A. HUXLEY (Grande-Bretagne) S. REFSUM (Norvège)
<b>1982</b>	
M. le Professeur	W.H. HENDREN (U.S.A.)
<b>1985</b>	
MM. les Professeurs	S. MASSRY (U.S.A.) KLINSMANN (R.D.A.)
<b>1986</b>	
MM. les Professeurs	E. MIHICH (U.S.A.) T. MUNSAT (U.S.A.) LIANA BOLIS (Suisse) L.P. ROWLAND (U.S.A.)
<b>1987</b>	
M. le Professeur	P.J. DYCK (U.S.A.)
<b>1988</b>	
MM. les Professeurs	R. BERGUER (U.S.A.) W.K. ENGEL (U.S.A.) V. ASKANAS (U.S.A.) J. WEHSTER KIRKLIN (U.S.A.) A. DAVIGNON (Canada) A. BETTARELLO (Brésil)
<b>1989</b>	
M. le Professeur	P. MUSTACCHI (U.S.A.)

<b>1990</b>	
MM. les Professeurs	J.G. MC LEOD (Australie) J. PORTER (U.S.A.)
<b>1991</b>	
MM. les Professeurs	J. Edward MC DADE (U.S.A.) W. BURGDORFER (U.S.A.)
<b>1992</b>	
MM. les Professeurs	H.G. SCHWARZACHER (Autriche) D. CARSON (U.S.A.) T. YAMAMURO (Japon)
<b>1994</b>	
MM. les Professeurs	G. KARPATI (Canada) W.J. KOLFF (U.S.A.)
<b>1995</b>	
MM. les Professeurs	D. WALKER (U.S.A.) M. MULLER (Suisse) V. BONOMINI (Italie)
<b>1997</b>	
MM. les Professeurs	C. DINARELLO (U.S.A.) D. STULBERG (U.S.A.) A. MEIKLE DAVISON (Grande-Bretagne) P.I. BRANEMARK (Suède)
<b>1998</b>	
MM. les Professeurs	O. JARDETSKY (U.S.A.)
<b>1999</b>	
MM. les Professeurs	J. BOTELLA LLUSIA (Espagne) D. COLLEN (Belgique) S. DIMAURO (U. S. A.)
<b>2000</b>	
MM. les Professeurs	D. SPIEGEL (U. S. A.) C. R. CONTI (U.S.A.)
<b>2001</b>	
MM. les Professeurs	P-B. BENNET (U. S. A.) G. HUGUES (Grande Bretagne) J-J. O'CONNOR (Grande Bretagne)
<b>2002</b>	
MM. les Professeurs	M. ABEDI (Canada) K. DAI (Chine)
<b>2003</b>	
M. le Professeur Sir	T. MARRIE (Canada) G.K. RADDI (Grande Bretagne)
<b>2004</b>	
M. le Professeur	M. DAKE (U.S.A.)
<b>2005</b>	
M. le Professeur	L. CAVALLI-SFORZA (U.S.A.)
<b>2006</b>	
M. le Professeur	A. R. CASTANEDA (U.S.A.)

**2007**

M. le Professeur

S. KAUFMANN (Allemagne)

PROFESSEURS DES UNIVERSITES-PRATICIENS HOSPITALIERS

AGOSTINI FERRANDES Aubert	CHIARONI Jacques
<i>ALBANESE Jacques Surnombre</i>	CHINOT Olivier
ALIMI Yves	CHOSSEGROS Cyrille
AMABILE Philippe	COLLART Frédéric
AMBROSI Pierre	COSTELLO Régis
ANDRE Nicolas	COURBIERE Blandine
ARGENSON Jean-Noël	COWEN Didier
ASTOUL Philippe	CRAVELLO Ludovic
ATTARIAN Shahram	CUISSET Thomas
AUDOUIN Bertrand	DA FONSECA David
AUQUIER Pascal	DAHAN-ALCARAZ Laetitia
AVIERINOS Jean-François	DANIEL Laurent
AZULAY Jean-Philippe	DARMON Patrice
BAILLY Daniel	DAUMAS Aurélie
BARLESI Fabrice	DAVID Thierry
BARLIER-SETTI Anne	D'ERCOLE Claude
BARLOGIS Vincent	D'JOURNO Xavier
BARTHET Marc	DEHARO Jean-Claude
BARTOLI Christophe	DELAPORTE Emmanuel
BARTOLI Jean-Michel	DENIS Danièle
BARTOLI Michel	DISDIER Patrick
BARTOLOMEI Fabrice	DODDOLI Christophe
BASTIDE Cyrille	DRANCOURT Michel
BELIARD-LASSERRE Sophie	DUBUS Jean-Christophe
BENSOUSSAN Laurent	DUFFAUD Florence
BERBIS Philippe	DUFOUR Henry
BERBIS Julie	DURAND Jean-Marc
BERDAH Stéphane	DUSSOL Bertrand
BEROUD Christophe	EBBO Mikaël
BERTRAND Baptiste	EUSEBIO Alexandre
BERTUCCI François	FABRE Alexandre
BEYER-BERJOT Laura	FAKHRY Nicolas
BLAISE Didier	FAURE Alice
BLIN Olivier	FELICIAN Olivier
BLONDEL Benjamin	FENOLLAR Florence
BOISSIER Romain	FIGARELLA/BRANGER Dominique
BONIN/GUILLAUME Sylvie	FLECHER Xavier
BONELLO Laurent	FOUILLOUX Virginie
BONNET Jean-Louis	FOURNIER Pierre-Edouard
BOUFI Mourad	FRANCESCHI Frédéric
BOYER Laurent	FUENTES Stéphane
BREGÉON Fabienne	GABERT Jean
BRETELLE Florence	GABORIT Bénédicte
BROUQUI Philippe	GAINNIER Marc
BRUDER Nicolas	GARCIA Stéphane
BRUE Thierry	GARIBOLDI Vlad
BRUNET Philippe	GAUDART Jean
BURTEY Stéphane	GAUDY-MARQUESTE Caroline
CARCOPINO-TUSOLI Xavier	GENTILE Stéphanie
CASANOVA Dominique	GERBEAUX Patrick
CASTINETTI Frédéric	GEROLAMI/SANTANDREA René
CECCALDI Mathieu	GILBERT/ALESSI Marie-Christine
CHAGNAUD Christophe	GIORGI Roch
CHAMBOST Hervé	GIOVANNI Antoine
CHAMPSAUR Pierre	GIRARD Nadine
CHANEZ Pascal	GIRAUD/CHABROL Brigitte
CHARAFFE-JAUFFRET Emmanuelle	GONCALVES Anthony
CHARREL Rémi	GRANEL/REY Brigitte
CHAUMOITRE Kathia	GRANDVAL Philippe
	GREILLIER Laurent

PROFESSEURS DES UNIVERSITES-PRATICIENS HOSPITALIERS

AMABILE Philippe	COLLART Frédéric	GUIS Sandrine
AMBROSI Pierre	COSTELLO Régis	GUYE Maxime
ANDRE Nicolas	COURBIERE Blandine	GUYOT Laurent
ARGENSON Jean-Noël	COWEN Didier	<i>GUY'S Jean-Michel Retraite le 24/09/2021</i>
ASTOUL Philippe	CRAVELLO Ludovic	HABIB Gilbert
ATTARIAN Shahram	CUISSET Thomas	HARDWIGSEN Jean
AUDOUIN Bertrand	DA FONSECA David	HARLE Jean-Robert
AUQUIER Pascal	DAHAN-ALCARAZ Laetitia	HOUVENAEGHEL Gilles
AVIERINOS Jean-François	DANIEL Laurent	JACQUIER Alexis
AZULAY Jean-Philippe	DARMON Patrice	JOURDE-CHICHE Noémie
BAILLY Daniel	DAUMAS Aurélie	JOUBE Jean-Luc
BARLESI Fabrice	DAVID Thierry	KAPLANSKI Gilles
BARLIER-SETTI Anne	D'ERCOLE Claude	KARSENTY Gilles
BARLOGIS Vincent	D'JOURNO Xavier	<i>KERBAUL François détachement</i>
BARTHET Marc	DEHARO Jean-Claude	KRAHN Martin
BARTOLI Christophe	DELAPORTE Emmanuel	LAFFORGUE Pierre
BARTOLI Jean-Michel	DENIS Danièle	LAGIER Jean-Christophe
BARTOLI Michel	DISDIER Patrick	LAMBAUDIE Eric
BARTOLOMEI Fabrice	DODDOLI Christophe	LANCON Christophe
BASTIDE Cyrille	DRANCOURT Michel	LA SCOLA Bernard
BELIARD-LASSERRE Sophie	DUBUS Jean-Christophe	LAUNAY Franck
BENSOUSSAN Laurent	DUFFAUD Florence	LAVIEILLE Jean-Pierre
BERBIS Philippe	DUFOUR Henry	LE CORROLLER Thomas
BERBIS Julie	DURAND Jean-Marc	LECHEVALLIER Eric
BERDAH Stéphane	DUSSOL Bertrand	LEHUCHER-MICHEL Marie-Pascale
BEROUD Christophe	EBBO Mikael	LEONE Marc
BERTRAND Baptiste	EUSEBIO Alexandre	LEONETTI Georges
BERTUCCI François	FABRE Alexandre	LEPIDI Hubert
BEYER-BERJOT Laura	FAKHRY Nicolas	LEVY Nicolas
BLAISE Didier	FAURE Alice	MACE Loïc
BLIN Olivier	FELICIAN Olivier	MAGNAN Pierre-Edouard
BLONDEL Benjamin	FENOLLAR Florence	MANCINI Julien
BOISSIER Romain	FIGARELLA/BRANGER Dominique	MEGE Jean-Louis
BONIN/GUILLAUME Sylvie	FLECHER Xavier	MERROT Thierry
BONELLO Laurent	FOUILLOUX Virginie	METZLER/GUILLEMAIN Catherine
BONNET Jean-Louis	FOURNIER Pierre-Edouard	MEYER/DUTOUR Anne
BOUFI Mourad	FRANCESCHI Frédéric	MICCALEF/ROLL Joëlle
BOYER Laurent	FUENTES Stéphane	MICHEL Fabrice
BREGEON Fabienne	GABERT Jean	MICHEL Gérard
BRETELLE Florence	GABORIT Bénédicte	MICHEL Justin
BROUQUI Philippe	GAINNIER Marc	MICHELET Pierre
BRUDER Nicolas	GARCIA Stéphane	MILH Mathieu
BRUE Thierry	GARIBOLDI Vlad	MILLION Matthieu
BRUNET Philippe	GAUDART Jean	MOAL Valérie
BURTEY Stéphane	GAUDY-MARQUESTE Caroline	MORANGE Pierre-Emmanuel
CARCOPINO-TUSOLI Xavier	GENTILE Stéphanie	MOULIN Guy
CASANOVA Dominique	GERBEAUX Patrick	MOUTARDIER Vincent
CASTINETTI Frédéric	GEROLAMI/SANTANDREA René	NAUDIN Jean
CECCALDI Mathieu	GILBERT/ALESSI Marie-Christine	NICOLAS DE LAMBALLERIE Xavier
CHAGNAUD Christophe	GIORGI Roch	NICOLLAS Richard
CHAMBOST Hervé	GIOVANNI Antoine	NGUYEN Karine
CHAMPSAUR Pierre	GIRARD Nadine	OLIVE Daniel
CHANEZ Pascal	GIRAUD/CHABROL Brigitte	OLLIVIER Matthieu
CHARAFFE-JAUFFRET Emmanuelle	GONCALVES Anthony	OUAFIK L'Houcine
CHARREL Rémi	GRANEL/REY Brigitte	OVAERT-REGGIO Caroline
CHAUMOITRE Kathia	GRANDVAL Philippe	PAGANELLI Franck
	GREILLIER Laurent	<i>PANUEL Michel Surnombre</i>

PROFESSEURS DES UNIVERSITES-PRATICIENS HOSPITALIERS

PAPAZIAN Laurent	ROLL Patrice	VALERO René
PAROLA Philippe	ROSSI Dominique	VAROQUAUX Arthur Damien
PELISSIER-ALICOT Anne-Laure	ROSSI Pascal	VELLY Lionel
PELLETIER Jean	ROUDIER Jean	VEY Norbert
PERRIN Jeanne	SALAS Sébastien	VIDAL Vincent
PESENTI Sébastien	SARLON-BARTOLI Gabrielle	VIENS Patrice
PETIT Philippe	SCAVARDA Didier	VILLANI Patrick
PHAM Thao	SCHLEINITZ Nicolas	VITON Jean-Michel
PIERCECCHI/MARTI Marie-Dominique	SEBAG Frédéric	VITTON Véronique
PIQUET Philippe	SIELEZNEFF Igor	<i>VIEHWEGER Heide Elke détachement</i>
PIRRO Nicolas	SIMON Nicolas	VIVIER Eric
POINSO François	STEIN Andréas	XERRI Luc
RACCAH Denis	SUISSA Laurent	ZIELEZKIEWICZ Laurent
RANQUE Stéphane	TAIEB David	
REGIS Jean	THOMAS Pascal	
REYNAUD/GAUBERT Martine	THUNY Franck	
REYNAUD Rachel	TOSELLO Barthélémy	
RICHARD/LALLEMAND Marie-Alet	TREBUCHON-DA FONSECA Agnès	
RICHERI Raphaëlle	<i>TRIGLIA Jean-Michel Surnombre</i>	
ROCHE Pierre-Hugues	TROPIANO Patrick	
ROCH Antoine	TSIMARATOS Michel	
ROCHWERGER Richard	TURRINI Olivier	

**PROFESSEUR DES UNIVERSITES**

ADALIAN Pascal  
AGHABABIAN Valérie  
BELIN Pascal  
CHABANNON Christian  
CHABRIERE Eric  
FERON François  
LE COZ Pierre  
LEVASSEUR Anthony  
RANJEVA Jean-Philippe  
SOBOL Hagay

**PROFESSEUR CERTIFIE**

FRAISSE-MANGIALOMINI Jeanne

**PROFESSEUR DES UNIVERSITES ASSOCIE à MI-TEMPS**

REVIS Joana

**PROFESSEUR DES UNIVERSITES MEDECINE GENERALE**

GENTILE Gaëtan

**PROFESSEUR DES UNIVERSITES ASSOCIE à TEMPS PLEIN DES DISCIPLINES MEDICALES**

BOUSSUGES Alain

**PROFESSEUR DES UNIVERSITES ASSOCIE à MI-TEMPS DES DISCIPLINES MEDICALES**

DUTAU Hervé

# MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES-PRATICIENS HOSPITALIERS

AHERFI Sarah	GELSI/BOYER Véronique	ROBERT Thomas
ANGELAKIS Emmanouil ( <i>disponibilité</i> )	GIUSIANO Bernard	ROMANET Pauline
ATLAN Catherine ( <i>disponibilité</i> )	GIUSIANO COURCAMBECK Sophie	SABATIER Renaud
BEGE Thierry	GONZALEZ Jean-Michel	SARI-MINODIER Irène
BENYAMINE Audrey	GOURIET Frédérique	SAVEANU Alexandru
BIRNBAUM David	GRAILLON Thomas	SECQ Véronique
BONINI Francesca	GUERIN Carole	SOLER Raphael
BOUCRAUT Joseph	GUENOUN MEYSSIGNAC Daphné	STELLMANN Jan-Patrick
BOULAMERY Audrey	GUIDON Catherine	SUCHON Pierre
BOULLU/CIOCCA Sandrine	GUIVARCH Jokthan	TABOURET Emeline
BOUSSEN Salah Michel	HAUTIER Aurélie	TOGA Isabelle
BUFFAT Christophe	HRAIECH Sami	TOMASINI Pascale
CAMILLERI Serge	IBRAHIM KOSTA Manal	TROUDE Lucas
CARRON Romain	JALOUX Charlotte	TROUSSE Delphine
CASSAGNE Carole	JARROT Pierre-André	TUCHTAN-TORRENTS Lucile
CERMOLACCE Michel	KASPI-PEZZOLI Elise	VELY Frédéric
CHAUDET Hervé	L'OLLIVIER Coralie	VENTON Geoffroy
CHRETIEN Anne-Sophie	LABIT-BOUVIER Corinne	VION-DURY Jean
COZE Carole	LAFAGE/POCHITALOFF-HUVALE Marina	ZATTARA/CANNONI Hélène
CUNY Thomas	LAGARDE Stanislas	
DADOUN Frédéric ( <i>disponibilité</i> )	LAGIER Aude ( <i>disponibilité</i> )	
DALES Jean-Philippe	LAGOUANELLE/SIMEONI Marie-Claude	
DARIEL Anne	LAMBERT Isabelle	
DEGEORGES/VITTE Joëlle ( <i>disponibilité</i> )	LENOIR Marien	
DEHARO Pierre	LEVY/MOZZICONACCI Annie	
DELLIAUX Stéphane	LOOSVELD Marie	
DELTEIL Clémence	MAAROUF Adil	
DESPLAT/JEGO Sophie	MACAGNO Nicolas	
DEVILLIER Raynier	MARLINGE Marion	
DUBOURG Grégory	MAUES DE PAULA André	
DUCONSEIL Pauline	MOTTOLA GHIGO Giovanna	
DUFOUR Jean-Charles	MEGE Diane	
ELDIN Carole	MOTTOLA GHIGO Giovanna	
FOLETTI Jean- Marc	NOUGAIREDE Antoine	
FRANKEL Diane	PAULMYER/LACROIX Odile	
FROMNOT Julien	RADULESCO Thomas	
GASTALDI Marguerite	RESSEGUIER Noémie	
GAUDRY Marine	ROBERT Philippe	

## MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

(mono-appartenants)

ABU ZAINEH Mohammad	DESNUES Benoît	RUEL Jérôme
BARBACARU/PERLES T. A.	MARANINCHI Marie	THOLLON Lionel
BERLAND Caroline	MERHEJ/CHAUVEAU Vicky	THIRION Sylvie
BOYER Sylvie	MINVIELLE/DEVICTOR Bénédicte	VERNA Emeline
COLSON Sébastien	POGGI Marjorie	
DEGIOANNI/SALLE Anna	POUGET Benoît	

## MAITRE DE CONFERENCES DES UNIVERSITES DE MEDECINE GENERALE

CASANOVA Ludovic

**MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES DE  
MEDECINE GENERALE à MI-TEMPS**

BARGIER Jacques  
FIERLING Thomas  
FORTE Jenny  
JANCZEWSKI Aurélie  
NUSSLI Nicolas  
ROUSSEAU-DURAND Raphaëlle  
THERY Didier

**MAITRE DE CONFERENCES ASSOCIE à MI-TEMPS**

BOURRIQUEN Maryline  
EVANS-VIALLAT Catherine  
LAZZAROTTO Sébastien  
LUCAS Guillaume  
MATHIEU Marion  
MAYENS-RODRIGUES Sandrine  
MELLINAS Marie  
ROMAN Christophe  
TRINQUET Laure

**PROFESSEURS DES UNIVERSITES et MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES -  
PRATICIENS HOSPITALI PROFESSEURS ASSOCIES, MAITRES DE CONFERENCES DES  
UNIVERSITES mono-appartenants**

**ANATOMIE 4201**

CHAMPSAUR Pierre (PU-PH)  
LE CORROLLER Thomas (PU-PH)  
PIRRO Nicolas (PU-PH)

GUENOUN-MEYSSIGNAC Daphné (MCU-PH)  
LAGIER Aude (MCU-PH) *disponibilité*

THOLLON Lionel (MCF) (60ème section)

**ANATOMIE ET CYTOLOGIE PATHOLOGIQUES 4203**

CHARAFE/JAUFFRET Emmanuelle (PU-PH)  
DANIEL Laurent (PU-PH)  
FIGARELLA/BRANGER Dominique (PU-PH)  
GARCIA Stéphane (PU-PH)  
XERRI Luc (PU-PH)

DALES Jean-Philippe (MCU-PH)  
GIUSIANO COURCAMBECK Sophie (MCU PH)  
LABIT/BOUVIER Corinne (MCU-PH)  
MACAGNO Nicolas (MCU-PH)  
MAUES DE PAULA André (MCU-PH)  
SECQ Véronique (MCU-PH)

**ANESTHESIOLOGIE ET REANIMATION CHIRURGICALE ;  
MEDECINE URGENCE 4801**

ALBANESE Jacques (PU-PH) *Surnombre*  
BRUDER Nicolas (PU-PH)  
LEONE Marc (PU-PH)  
MICHEL Fabrice (PU-PH)  
VELLY Lionel (PU-PH)  
ZIELEZKIEWICZ Laurent (PU-PH)

BOUSSEN Salah Michel (MCU-PH)  
GUIDON Catherine (MCU-PH)

**ANGLAIS 11**

FRAISSE-MANGIALOMINI Jeanne (PRCE)

**BIOLOGIE ET MEDECINE DU DEVELOPPEMENT  
ET DE LA REPRODUCTION ; GYNECOLOGIE MEDICALE 5405**

METZLER/GUILLEMAIN Catherine (PU-PH)  
PERRIN Jeanne (PU-PH)

**ANTHROPOLOGIE 20**

ADALIAN Pascal (PR)

DEGIOANNI/SALLE Anna (MCF)  
POUGET Benoît (MCF)  
VERNA Emeline (MCF)

**BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE ; HYGIENE HOSPITALIERE 4501**

CHARREL Rémi (PU PH)  
DRANCOURT Michel (PU-PH)  
FENOLLAR Florence (PU-PH)  
FOURNIER Pierre-Edouard (PU-PH)  
NICOLAS DE LAMBALLERIE Xavier (PU-PH)  
LA SCOLA Bernard (PU-PH)

AHERFI Sarah (MCU-PH)  
ANGELAKIS Emmanouil (MCU-PH) *disponibilité*  
DUBOURG Grégory (MCU-PH)  
GOURIET Frédérique (MCU-PH)  
NOUGAIREDE Antoine (MCU-PH)  
NINOVE Laetitia (MCU-PH)

CHABRIERE Eric (PR) (64ème section)

LEVASSEUR Anthony (PR) (64ème section)  
DESNUES Benoit (MCF) ( 65ème section )  
MERHEJ/CHAUVEAU Vicky (MCF) (87ème section)

**BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE 4401**

BARLIER/SETTI Anne (PU-PH)  
GABERT Jean (PU-PH)  
GUIEU Régis (PU-PH)  
OUAFIK L'Houcine (PU-PH)

BUFFAT Christophe (MCU-PH)  
FROMNOT Julien (MCU-PH)  
MARLINGE Marion (MCU-PH)  
MOTTOLA GHIGO Giovanna (MCU-PH)  
ROMANET Pauline (MCU-PH)  
SAVEANU Alexandru (MCU-PH)

**BIOLOGIE CELLULAIRE 4403**

ROLL Patrice (PU-PH)

FRANKEL Diane (MCU-PH)  
GASTALDI Marguerite (MCU-PH)  
KASPI-PEZZOLI Elise (MCU-PH)  
LEVY-MOZZICONNACCI Annie (MCU-PH)

**BIOPHYSIQUE ET MEDECINE NUCLEAIRE 4301**

GUEDJ Eric (PU-PH)  
 GUYE Maxime (PU-PH)  
 TAIEB David (PU-PH)

BELIN Pascal (PR) (69ème section)  
 RANJEVA Jean-Philippe (PR) (69ème section)

CAMMILLERI Serge (MCU-PH)  
 VION-DURY Jean (MCU-PH)

BARBACARU/PERLES Téodora Adriana (MCF) (69ème section)

**BIostatISTIQUES, InFORMATIQUE MEDICALE  
ET TECHNOLOGIES DE COMMUNICATION 4604**

GAUDART Jean (PU-PH)  
 GIORGI Roch (PU-PH)  
 MANCINI Julien (PU-PH)

CHAUDET Hervé (MCU-PH)  
 DUFOUR Jean-Charles (MCU-PH)  
 GIUSIANO Bernard (MCU-PH)

ABU ZAINEH Mohammad (MCF) (5ème section)  
 BOYER Sylvie (MCF) (5ème section)

**CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE ET TRAUMATOLOGIQUE 5002**

ARGENSON Jean-Noël (PU-PH)  
 BLONDEL Benjamin (PU-PH)  
 FLECHER Xavier (PU PH)  
 OLLIVIER Matthieu (PU-PH)  
 ROCHWERGER Richard (PU-PH)  
 TROPIANO Patrick (PU-PH)

**CANCEROLOGIE ; RADIOTHERAPIE 4702**

BERTUCCI François (PU-PH)  
 CHINOT Olivier (PU-PH)  
 COWEN Didier (PU-PH)  
 DUFFAUD Florence (PU-PH)  
 GONCALVES Anthony (PU-PH)  
 HOUVENAEGHEL Gilles (PU-PH)  
 LAMBAUDIE Eric (PU-PH)  
 PADOVANI Laetitia (PH-PH)  
 SALAS Sébastien (PU-PH)  
 VIENS Patrice (PU-PH)

SABATIER Renaud (MCU-PH)  
 TABOURET Emeline (MCU-PH)

**CARDIOLOGIE 5102**

AVIERINOS Jean-François (PU-PH)  
 BONELLO Laurent (PU PH) BONNET Jean-Louis (PU-PH)  
 CUISSET Thomas (PU-PH) DEHARO Jean-Claude (PU-PH)  
 FRANCESCHI Frédéric (PU-PH) HABIB Gilbert (PU-PH)  
 PAGANELLI Franck (PU-PH) THUNY Franck (PU-PH)

DEHARO Pierre (MCU PH)

**CHIRURGIE VISCERALE ET DIGESTIVE 5202**

BERDAH Stéphane (PU-PH)  
 BEYER-BERJOT Laura (PU-PH)  
 HARDWIGSEN Jean (PU-PH)  
 MOUTARDIER Vincent (PU-PH)  
 SEBAG Frédéric (PU-PH)  
 SIELEZNEFF Igor (PU-PH)  
 TURRINI Olivier (PU-PH)

BEGE Thierry (MCU-PH)  
 BIRNBAUM David (MCU-PH)  
 DUCONSEIL Pauline (MCU-PH)  
 GUERIN Carole (MCU PH)  
 MEGE Diane (MCU-PH)

**CHIRURGIE INFANTILE 5402**

*GUYS Jean-Michel (PU-PH) Retraite le 24/09/2021*  
 FAURE Alice (PU PH)  
 JOUVE Jean-Luc (PU-PH)  
 LAUNAY Franck (PU-PH)  
 MERROT Thierry (PU-PH)  
 PESENTI Sébastien (PU-PH)  
 VIEHWEGER Heide Elke (PU-PH) détachement

DARIEL Anne (MCU-PH)

**CHIRURGIE MAXILLO-FACIALE ET STOMATOLOGIE 5503**

CHOSSEGROS Cyrille (PU-PH)  
 GUYOT Laurent (PU-PH)

FOLETTI Jean-Marc (MCU-PH)

**CHIRURGIE THORACIQUE ET CARDIOVASCULAIRE 5103**

COLLART Frédéric (PU-PH)  
 D'JOURNO Xavier (PU-PH)  
 DODDOLI Christophe (PU-PH)  
 FOUILLOUX Virginie (PU-PH)  
 GARIBOLDI Vlad (PU-PH)  
 MACE Loïc (PU-PH)  
 THOMAS Pascal (PU-PH)

LENOIR Marien (MCU-PH)  
 TROUSSE Delphine (MCU-PH)

**CHIRURGIE PLASTIQUE, RECONSTRUCTRICE ET ESTHETIQUE ; BRÛLOGIE 5004**

BERTRAND Baptiste (PU-PH)  
 CASANOVA Dominique (PU-PH)

HAUTIER Aurélie (MCU-PH)  
 JALOUX Charlotte (MCU PH)

**CHIRURGIE VASCULAIRE ; MEDECINE VASCULAIRE 5104**

ALIMI Yves (PU-PH)  
 AMABILE Philippe (PU-PH)  
 BARTOLI Michel (PU-PH)  
 BOUFI Mourad (PU-PH)  
 MAGNAN Pierre-Edouard (PU-PH)  
 PIQUET Philippe (PU-PH)  
 SARLON-BARTOLI Gabrielle (PU PH)

GAUDRY Marine (MCU PH)  
 SOLER Raphael (MCU-PH)

**GASTROENTEROLOGIE ; HEPATOLOGIE ; ADDICTOLOGIE 5201**

BARTHET Marc (PU-PH)  
 DAHAN-ALCARAZ Laetitia (PU-PH)  
 GEROLAMI-SANTANDREA René (PU-PH)  
 GRANDVAL Philippe (PU-PH)  
 VITTON Véronique (PU-PH)

**HISTOLOGIE, EMBRYOLOGIE ET CYTOGENETIQUE 4202**

LEPIDI Hubert (PU-PH)

PAULMYER/LACROIX Odile (MCU-PH)

GONZALEZ Jean-Michel (MCU-PH)

**GENETIQUE 4704****DERMATOLOGIE - VENEREOLOGIE 5003**

BERBIS Philippe (PU-PH)  
 DELAPORTE Emmanuel (PU-PH)  
 GAUDY/MARQUESTE Caroline (PU-PH)  
 GROB Jean-Jacques (PU-PH)  
 RICHARD/LALLEMAND Marie-Aleth (PU-PH)

BEROUD Christophe (PU-PH)  
 KRAHN Martin (PU-PH)  
 LEVY Nicolas (PU-PH)  
 NGYUEN Karine (PU-PH)  
  
 ZATTARA/CANNONI Hélène (MCU-PH)

**DUSI**

COLSON Sébastien (MCF)

BOURRIQUEN Maryline (MAST)  
 EVANS-VIALLAT Catherine (MAST)  
 LUCAS Guillaume (MAST)  
 MAYEN-RODRIGUES Sandrine (MAST)  
 MELLINAS Marie (MAST)  
 ROMAN Christophe (MAST)  
 TRINQUET Laure (MAST)

**GYNECOLOGIE-OBSTETRIQUE ; GYNECOLOGIE MEDICALE 5403**

AGOSTINI Aubert (PU-PH)  
 BRETTELLE Florence (PU-PH)  
 CARCOPINO-TUSOLI Xavier (PU-PH)  
 COURBIERE Blandine (PU-PH)  
 CRAVELLO Ludovic (PU-PH)  
 D'ERCOLE Claude (PU-PH)

**ENDOCRINOLOGIE ,DIABETE ET MALADIES METABOLIQUES ; GYNECOLOGIE MEDICALE 5404**

BRUE Thierry (PU-PH)  
 CASTINETTI Frédéric (PU-PH)

CUNY Thomas (MCU PH)

**EPIDEMIOLOGIE, ECONOMIE DE LA SANTE ET PREVENTION**

4601

AUQUIER Pascal (PU-PH)  
BERBIS Julie (PU-PH)  
BOYER Laurent (PU-PH)  
GENTILE Stéphanie (PU-PH)

LAGOUANELLE/SIMEONI Marie-Claude (MCU-PH)  
RESSEGUIER Noémie (MCU-PH)

MINVIELLE/DEVICTOR Bénédicte (MCF)(06ème section)

**IMMUNOLOGIE 4703I**

KAPLANSKI Gilles (PU-PH)  
MEGE Jean-Louis (PU-PH)  
OLIVE Daniel (PU-PH)  
VIVIER Eric (PU-PH)

FERON François (PR) (69ème section)

BOUCRAUT Joseph (MCU-PH)  
CHRETIEN Anne-Sophie (MCU PH)  
DEGEORGES/VITTE Joëlle (MCU-PH)  
DESPLAT/JEGO Sophie (MCU-PH)  
JARROT Pierre-André (MCU PH)  
ROBERT Philippe (MCU-PH)  
VELY Frédéric (MCU-PH)

**MALADIES INFECTIEUSES ; MALADIES TROPICALES 4503**

BROUQUI Philippe (PU-PH)  
LAGIER Jean-Christophe (PU-PH)  
MILLION Matthieu (PU-PH)  
PAROLA Philippe (PU-PH)  
STEIN Andréas (PU-PH)

ELDIN Carole (MCU-PH)

**MEDECINE D'URGENCE 4805**

GERBEAUX Patrick (PU PH)  
*KERBAUL François (PU-PH) détachement*  
MICHELET Pierre (PU-PH)

**MEDECINE INTERNE ; GERIATRIE ET BIOLOGIE DU  
VIEILLISSEMENT ; ADDICTOLOGIE 5301**

BONIN/GUILLAUME Sylvie (PU-PH)      BENYAMINE Audrey (MCU-PH)  
DISDIER Patrick (PU-PH)  
DURAND Jean-Marc (PU-PH)  
EBBO Mikael (PU-PH)  
GRANEL/REY Brigitte (PU-PH)  
HARLE Jean-Robert (PU-PH)  
ROSSI Pascal (PU-PH)  
SCHLEINITZ Nicolas (PU-PH)

**HEMATOLOGIE ; TRANSFUSION 4701**

BLAISE Didier (PU-PH)  
COSTELLO Régis (PU-PH)  
CHIARONI Jacques (PU-PH)  
GILBERT/ALESSI Marie-Christine (PU-PH)  
MORANGE Pierre-Emmanuel (PU-PH)  
VEY Norbert (PU-PH)

DEVILLIER Raynier (MCU PH)  
GELSI/BOYER Véronique (MCU-PH)  
IBRAHIM KOSTA Manal (MCU PH)  
LAFAGE/POCHITALOFF-HUVALE Marina (MCU-PH)  
LOOSVELD Marie (MCU-PH)  
SUCHON Pierre (MCU-PH)  
VENTON (MCU-PH)

POGGI Marjorie (MCF) (64ème section)

**MEDECINE LEGALE ET DROIT DE LA SANTE 4603**

BARTOLI Christophe (PU-PH)  
LEONETTI Georges (PU-PH)  
PELLISSIER-ALICOT Anne-Laure (PU-PH)  
PIERCECCHI-MARTI Marie-Dominique (PU-PH)

DELTEIL Clémence (MCU PH)  
TUCHTAN-TORRENTS Lucile (MCU-PH)

BERLAND Caroline (MCF) (1ère section)

**MEDECINE PHYSIQUE ET DE READAPTATION 4905**

BENSOUSSAN Laurent (PU-PH)  
VITON Jean-Michel (PU-PH)

**MEDECINE ET SANTE AU TRAVAIL 4602**

LEHUCHER/MICHEL Marie-Pascale (PU-PH)

SARI/MINODIER Irène (MCU-PH)

**MEDECINE GENERALE 5303**

GENTILE Gaëtan (PR Méd. Gén. Temps plein)

CASANOVA Ludovic (MCF Méd. Gén. Temps plein)

BARGIER Jacques (MCF associé Méd. Gén. À mi-temps)

FIERLING Thomas (MCF associé Méd. Gén. À mi-temps)

FORTE Jenny (MCF associé Méd. Gén. À mi-temps)

JANCZEWSKI Aurélie (MCF associé Méd. Gén. À mi-temps)

NUSSLI Nicolas (MCF associé Méd. Gén. À mi-temps)

ROUSSEAU-DURAND Raphaëlle

(MCF associé Méd. Gén. À mi-temps)

THERY Didier (MCF associé Méd. Gén. À mi-temps)

(nomination au 1/10/2019)

**NUTRITION 4404**

BELIARD Sophie (PU-PH)

DARMON Patrice (PU-PH)

RACCAH Denis (PU-PH)

VALERO René (PU-PH)

*ATLAN Catherine (MCU-PH) disponibilité*

MARANINCHI Marie (MCF) (66ème section)

**ONCOLOGIE 65 (BIOLOGIE CELLULAIRE)**

CHABANNON Christian (PR) (66ème section)

SOBOL Hagay (PR) (65ème section)

**OPHTALMOLOGIE 5502**

DAVID Thierry (PU-PH)

DENIS Danièle (PU-PH)

**OTO-RHINO-LARYNGOLOGIE 5501**

DESSI Patrick (PU-PH)

FAKHRY Nicolas (PU-PH)

GIOVANNI Antoine (PU-PH)

LAVIEILLE Jean-Pierre (PU-PH)

MICHEL Justin (PU-PH)

NICOLLAS Richard (PU-PH)

*TRIGLIA Jean-Michel (PU-PH) Surnombre*

RADULESCO Thomas (MCU-PH)

REVIS Joana (PAST) (Orthophonie) (7ème Section)

**NEPHROLOGIE 5203**

BRUNET Philippe (PU-PH)

BURTEY Stéphanne (PU-PH)

DUSSOL Bertrand (PU-PH)

JOURDE CHICHE Noémie (PU PH)

MOAL Valérie (PU-PH)

ROBERT Thomas (MCU-PH)

**NEUROCHIRURGIE 4902**

DUFOUR Henry (PU-PH)

FUENTES Stéphane (PU-PH)

REGIS Jean (PU-PH)

ROCHE Pierre-Hugues (PU-PH)

SCAVARDA Didier (PU-PH)

CARRON Romain (MCU PH)

GRAILLON Thomas (MCU PH)

TROUDE Lucas (MCU-PH)

**NEUROLOGIE 4901**

ATTARIAN Sharham (PU PH)

AUDOIN Bertrand (PU-PH)

AZULAY Jean-Philippe (PU-PH)

CECCALDI Mathieu (PU-PH)

EUSEBIO Alexandre (PU-PH)

FELICIAN Olivier (PU-PH)

PELLETIER Jean (PU-PH)

SUISSA Laurent (PU-PH)

MAAROUF Adil (MCU-PH)

**PEDOPSYCHIATRIE; ADDICTOLOGIE 4904**

DA FONSECA David (PU-PH)

POINSO François (PU-PH)

GUIVARCH Jokthan (MCU-PH)

**PHARMACOLOGIE FONDAMENTALE -  
PHARMACOLOGIE CLINIQUE; ADDICTOLOGIE 4803**

BLIN Olivier (PU-PH)

MICALLEF/ROLL Joëlle (PU-PH)

SIMON Nicolas (PU-PH)

BOULAMERY Audrey (MCU-PH)

RANQUE Stéphane (PU-PH)

LE COZ Pierre (PR) (17ème section)

CASSAGNE Carole (MCU-PH)

MATHIEU Marion (MAST)

L'OLLIVIER Coralie (MCU-PH)

TOGA Isabelle (MCU-PH)

### PHYSIOLOGIE 4402

### PEDIATRIE 5401

ANDRE Nicolas (PU-PH)

BARTOLOMEI Fabrice (PU-PH)

BARLOGIS Vincent (PU-PH)

BREGEON Fabienne (PU-PH)

CHAMBOST Hervé (PU-PH)

GABORIT Bénédicte (PU-PH)

DUBUS Jean-Christophe (PU-PH)

MEYER/DUTOUR Anne (PU-PH)

FABRE Alexandre (PU-PH)

TREBUCHON/DA FONSECA Agnès (PU-PH)

GIRAUD/CHABROL Brigitte (PU-PH)

BOUSSUGES Alain (PR associé à temps plein)

MICHEL Gérard (PU-PH)

BONINI Francesca (MCU-PH)

MILH Mathieu (PU-PH)

BOULLU/CIOCCA Sandrine (MCU-PH)

OVAERT-REGGIO Caroline (PU-PH)

*DADOUN Frédéric (MCU-PH) (disponibilité)*

REYNAUD Rachel (PU-PH)

DELLIAUX Stéphane (MCU-PH)

TOSELLO Barthélémy (PU-PH)

LAGARDE Stanislas (MCU-PH)

TSIMARATOS Michel (PU-PH)

LAMBERT Isabelle (MCU-PH)

COZE Carole (MCU-PH)

RUEL Jérôme (MCF) (69ème section)

THIRION Sylvie (MCF) (66ème section)

### PSYCHIATRIE D'ADULTES ; ADDICTOLOGIE 4903

### PNEUMOLOGIE; ADDICTOLOGIE 5101

BAILLY Daniel (PU-PH)

ASTOUL Philippe (PU-PH)

LANCON Christophe (PU-PH)

BARLESI Fabrice (PU-PH)

NAUDIN Jean (PU-PH)

CHANEZ Pascal (PU-PH)

RICHERI Raphaëlle (PU-PH)

GREILLIER Laurent (PU PH)

CERMOLACCE Michel (MCU-PH)

REYNAUD/GAUBERT Martine (PU-PH)

### PSYCHOLOGIE - PSYCHOLOGIE CLINIQUE, PSYCHOLOGIE SOCIALE

TOMASINI Pascale (MCU-PH)

AGHABABIAN Valérie (PR)

DUTAU Hervé ( Pr Associé des universités à 1/2 temps)

LAZZAROTTO Sébastien (MAST)

### RADIOLOGIE ET IMAGERIE MEDICALE 4302

### RHUMATOLOGIE 5001

BARTOLI Jean-Michel (PU-PH)

GUIS Sandrine (PU-PH)

CHAGNAUD Christophe (PU-PH)

LAFFORGUE Pierre (PU-PH)

CHAUMOITRE Kathia (PU-PH)

PHAM Thao (PU-PH)

GIRARD Nadine (PU-PH)

ROUDIER Jean (PU-PH)

JACQUIER Alexis (PU-PH)

MOULIN Guy (PU-PH)

*PANUEL Michel (PU-PH) surnombre*

PETIT Philippe (PU-PH)

VAROQUAUX Arthur Damien (PU-PH)

VIDAL Vincent (PU-PH)

### THERAPEUTIQUE; MEDECINE D'URGENCE; ADDICTOLOGIE 4804

STELLMANN Jan-Patrick (MCU-PH)

AMBROSI Pierre (PU-PH)

DAUMAS Aurélie (PU-PH)

VILLANI Patrick (PU-PH)

GAINNIER Marc (PU-PH)  
PAPAZIAN Laurent (PU-PH)  
ROCH Antoine (PU-PH)

HRAIECH Sami (MCU-PH)

BASTIDE Cyrille (PU-PH)  
BOISSIER Romain (PU-PH)  
KARSENTY Gilles (PU-PH)  
LECHEVALLIER Eric (PU-PH)  
ROSSI Dominique (PU-PH)

**A Monsieur le Professeur Jean-Noël ARGENSON,**

Vous me faites honneur en acceptant de présider ce jury de thèse. Votre rigueur professionnelle, ainsi que votre pouvoir fédérateur, ont permis de façonner un service et une école de l'orthopédie à Marseille que beaucoup nous envient. Vous faites partie des personnes qui m'inspirent le plus de respect.

Merci pour votre investissement quotidien pour la formation de vos internes, pour votre écoute et de me permettre ces quelques mois de voyage avant, je l'espère, de continuer ma formation dans votre service.

**A Monsieur le Professeur Xavier FLECHER,**

Je suis plus qu'honorée que vous soyez présent dans mon jury pour juger mon travail. J'ai, dès mon premier semestre d'interne, été réellement impressionnée par vos qualités chirurgicales et humaines ainsi que par votre sérénité à toute épreuve. Vous êtes de ceux qui donnent envie de se surpasser pour ne jamais les décevoir.

Nos discussions, pour réfléchir à l'amélioration des conditions de travail des internes, n'ont fait que conforter l'admiration que je vous porte.

**A Monsieur le Professeur Matthieu OLLIVIER,**

Ton énergie débordante, tes playlists musicales éclectiques mais surtout ta passion communicative pour la chirurgie du genou ont fait écho et m'ont motivée à suivre la voie de la chirurgie du membre inférieur.

Merci de m'avoir proposé ce sujet de thèse qui m'a évidemment tout de suite emballée, de m'avoir guidée, motivée pendant ces presque deux années de travail, et d'avoir remué ciel et terre pour m'aider à obtenir les informations qui me manquaient. Ce travail de thèse n'est qu'un début, Greta Thunberg n'a qu'à bien se tenir.

**A Madame le Docteur Marie LE BARON,**

Je suis vraiment heureuse que tu aies accepté de faire partie de mon jury de thèse. Avec toi, l'orthopédie féminine marseillaise ne pouvait être mieux représentée. J'admire ta force de caractère, ta rigueur, mais aussi ta douceur à l'égard des personnes aux côtés de qui tu œuvres.

Merci pour ta confiance ce semestre. Travailler à tes côtés était un plaisir, j'espère avoir l'occasion de le faire à nouveau.

**A Monsieur le Docteur Maxime FABRE-AUBRESPY,**

J'ai toujours été très impressionnée par ton aisance chirurgicale, tout paraît si simple quand on te regarde opérer ! J'espère maîtriser un jour la chirurgie prothétique du genou aussi bien que toi.

En tant que chirurgien se déplaçant à vélo électrique et comme moi bourguignon de souche, je suis vraiment enchantée que tu juges mon travail de thèse. Promis, à mon pot il y aura du Céline Dion.

**A Monsieur le Docteur Alexandre CERLIER,**

En tant que co-initiateur de ce projet, je vous remercie de bien vouloir siéger parmi les membres de mon jury de thèse et de juger mon travail. En espérant que celui-ci vous apporte les réponses aux questions que vous vous posiez.

A Madame **Anne-Marie FRUTEAU DE LACLOS**,

Vous avez été un guide précieux tout au long de ce travail. Vous avez su me donner une autre vision de ce qu'est la recherche et me montrer que mon travail de thèse avait également son importance. Merci pour tout ce temps que vous m'avez accordée et pour votre écoute.

A Madame **Caroline LAFONT**,

Pour votre gentillesse, pour avoir compris l'urgence de ma requête et tenté de répondre au plus vite à mes questions.

A Monsieur **Guillaume JOUANNE**,

De m'avoir expliqué et permis d'utiliser votre logiciel d'ACV sans lequel cette thèse n'aurait jamais abouti !

Au **Docteur BERTHAULT-PERES**,

Qui m'a ouvert les portes de la pharmacie pour réaliser toutes mes pesées ultra précises !

Au **Docteur Nicole FRANCOIS**,

Grâce à qui la stérilisation n'a plus de secrets pour moi.

A **Victor**,

Le meilleur marin du monde qui rêvait aussi d'être Jack Sparrow. Sans toi je n'aurais jamais pu obtenir ces informations !! Encore merci et vivement que tu reviennes à Marseille.

A tous les chefs aux côtés de qui j'ai eu la chance d'évoluer ces quatre années.

A Toulon :

Au **Docteur Marc DUPOND**, à notre passé militaire commun qui a mené à quelques paillardes au bloc. Le souvenir de votre boîte en LEGO orange est gravé. J'espère vous croiser à nouveau rapidement, au bloc ou sur une plage à Cassis.

Au **Docteur Jean-Charles GRILLO**, avec qui j'ai réalisé mes premières arthroscopies d'épaule.

Au **Docteur André CHIDIAC**, merci pour ta bienveillance tout au long de mon semestre.

A Nord, à deux reprises :

Au **Docteur Pascal MAMAN**, qui rend les lundis si dynamiques !! Tu m'as énormément appris, notamment en traumatologie, j'espère continuer longtemps à me demander ce que tu aurais fait et à ne pas avoir peur !

Au **Docteur Mathieu CERMOLACCE**, d'abord co interne puis en tant que chef, tu fais partie des personnes qui ont le plus inspiré le chirurgien que je suis, je l'espère, en train de devenir. Merci pour ta bonne humeur sans faille, de m'avoir conforté dans l'idée que la chirurgie c'est un travail d'équipe avec tous ceux qui nous entourent au bloc et d'avoir un peu démystifié la chirurgie du pied !!

Au **Docteur Matthieu CHIVOT**, pour tout ce que tu m'as appris ce semestre mais aussi pour tous ces toastés fromages en terrasse à raconter plein de bêtises. Je sais que tu lis Mona Chollet en cachette.

Au **Docteur Pauline MATHON**, tu as été ma cheffe de manière brève ce semestre mais j'ai apprécié tous ces moments. Prends soin de toi.

Au **Docteur Richard VOLPI**, avec qui j'ai fait ma première PTG mais aussi mon premier tour de paddle.

Au **Docteur Jean-Camille MATTEI**, et ta playlist intégrale de Coldplay.

A Aix-en-Provence :

Au **Docteur Matthieu TURCAT**, ma première PTH m'a parue si facile !

Au **Docteur Vincent BERENGER**, parfois ours mais au fond si sympa.

Au **Docteur Delphine AMSELLEM**, j'ai eu la chance d'être une de tes premières internes et tu as été une assistante hors pair !

Au **Docteur Olivier DUFOUR** qui m'a donné envie d'un jour encadrer le Paris-Dakar !

En pédiatrie à la Timone :

Au **Docteur Emilie Peltier**, à qui je me suis tant identifiée et confiée. Tu as réussi à rendre la chirurgie de la scoliose presque captivante, et j'aurais pu choisir l'orthopédie après toutes les journées passées au bloc avec toi ! Tellement contente de te revoir à chaque fois que l'on se croise. Il faut absolument qu'on arrive à prévoir ce fameux apéro !

Au **Professeur Sébastien PESENTI**, tu as largement participé, avec Emilie, à égayer ce semestre loin des adultes ! Merci pour ces cafés dans votre antre, et (pas vraiment) désolée de ne pas avoir pu mener à bout ce travail sur les mucopolysaccharidiques...

Au **Professeur Jean-Luc JOUVE**, vous m'avez toujours impressionnée par la maîtrise chirurgicale exceptionnelle que vous avez. Le monde de la pédiatrie perd un maître avec votre départ de la chefferie.

Au **Docteur Elie CHOUFANI**, maître de la ligamento du genou chez l'enfant

En chirurgie du rachis à la Timone :

Au **Docteur Solène PROST**, tu m'as accueillie lors de mon arrivée à Marseille et j'étais vraiment heureuse de te retrouver comme assistante. Merci pour toutes ces journées de traumatologie et pour ce super semestre prolongé avec les gardes à l'ambu !

Au **Professeur Benjamin BLONDEL**, vous m'avez montré que la chirurgie rachidienne n'était pas que souffrance pour l'interne qui assiste mais bien une chirurgie passionnante.

Au **Professeur Patrick TROPIANO**, maître de la voie antérieure. Merci pour votre enseignement.

A Sainte Marguerite :

Au **Docteur Damien LAMI**, même si cela va mieux après un semestre de vendredis à tes côtés au bloc, tu m'impressionnes toujours autant par ta prestance et ton aisance chirurgicale. Merci pour tout ce que tu m'as appris.

Au **Docteur Pierre-Olivier PINELLI**, grâce à l'accent corse, les étapes des voies d'abord résonnent en moi ! Merci pour ce cours de pilotage et d'avoir eu confiance en ma capacité à ne pas nous précipiter sur les calanques.

En chirurgie de la main à la Timone :

Au **Professeur Régis LEGRE**, merci infiniment pour ce semestre, qui je pense restera le meilleur de tout mon internat. J'ai un grand respect tant pour votre habileté chirurgicale que pour votre façon d'être toujours juste et à l'écoute de votre équipe. Vous manquerez à beaucoup de monde maintenant que vous quittez le navire. En espérant vous recroiser sur des peaux de phoques !

Au **Docteur Alice MAYOLI**, je t'ai rencontrée pour la première fois quand je n'étais même pas encore bébé interne ! Tu m'as fait confiance tout ce semestre ensemble, et on peut dire qu'on aura bien travaillé mais aussi beaucoup rigolé.

Au **Docteur Najib KACHOUH**, non je t'assure je n'ai pas de problèmes d'audition ! Toujours sérieux au travail mais aussi présent pour faire le clown et la fête. Merci pour tes conseils que j'ai déjà mis en pratique promis !!

Au **Docteur Sébastien VIAUD**, toi qui comprends qu'un orthopédiste ne peut pas aimer faire des lambeaux... ! Merci pour la découverte du meilleur rooftop de la Timone lors de tes innombrables pauses clopes.

A mon quatuor d'orthopédie. **Nico**, que je ne devrais peut-être pas remercier de toujours m'embarquer dans ses folies... Mais heureuse que tu reviennes enfin à Marseille pour t'installer avec ta belle **Eva** dans votre appartement de folie. Hâte de nos prochaines aventures. **Arthur**, homme plus que connecté et gentillesse incarnée. J'ai de la chance d'avoir pu passer un an et demi de stages avec un co interne qui est aussi un ami. **JB**, toi qui doutes encore que tu es le plus brillant. LPGCDLAPHM, mais surtout un ami sincère avec une bonne touche de folie douce. **Flo**, qui m'aide à exporter ici la classe lyonnaise. Heureuse que tu sois mon binôme de chirurgie du membre inf dans ce gang de fragiles. Sans oublier **Bernard**, il est loin le temps de notre binôme d'assaut et papotage au coin du feu de camp.

Je me sens tellement chanceuse de vous avoir rencontrés en arrivant à Marseille et qu'on soit toujours restés soudés. Vivement les apéros Trivial Poursuite !

**Marie**, petit bout de femme qui sait ce qu'elle veut et arrive à tout mener de front. Je t'admire tellement !! J'ai adoré travailler avec toi ce semestre, tu es toujours positive et également là pour les autres. Mais je suis surtout super heureuse d'avoir rencontré une amie. A nouveau tu pars loin, hâte de ton retour à Marseille avec Victor ton matelot, qui m'a bien sauvée mais surtout qu'on apprécie beaucoup avec Ticu :)

A mes autres co internes, avec qui j'ai passé de si bons moments. **Olivier**, alias Professeur Ben Bozon, toujours présent quand il s'agit de faire la fête. **Lucas**, mon soutien-gorge blanc n'a plus jamais été le même... **Jean Charles**, qui va bientôt être un super papa. **Paul** Levet, mon tout premier co-interne !! **Guy**, toujours de bonne humeur. **Julien**, mon petit juju qui devient déjà si grand. L'AMOS est entre de bonnes mains. **Quentin**, avec qui j'ai adoré partager ce semestre ! **Steph**, semestre mouvementé mais je sais que tu es quelqu'un de bien. **Baptiste**, bien cool ce semestre, hâte de te recroiser à Sainte. **Christophe**, une belle découverte l'été dernier, je suis sûre que tu es un CCA au top ! Sans oublier **Henri, Samuel, Julie, Kenny, Valentina, Mathilde, Kitisack, Raphael, Romain, Paul Laidet** et sa passion pour les classifications, **Emile** et tous les autres...

Aux infirmières et aides-soignantes en ortho à **Sainte Musse**, je n'ai pas tenu parole et ne suis toujours pas revenue vous voir... Mais vous êtes dans mon cœur et je suis si heureuse de voir tous ces bébés qui poussent et qui grandissent. Vous me manquez.

Aux secrétaires de Nord, **Joelle, Fabienne** et **Cindy**, merci pour les pauses thé glacé et les moments de décompression !! C'est vous mes pref', ne changez rien.

Aux Ibodes du **bloc ortho à Nord**, vous êtes la meilleure team et c'était vraiment génial de vous retrouver ce semestre.

Aux infirmiers du 3A et 3B à Nord. Mention spéciale à **Mae** ma Mounette et à **Denise** qui rend les nuits de garde toujours plus agréables !

A **Nath** et **Cricri**, les meilleures cadres que je connaisse.

Aux infirmières de la consultation de Sainte Marguerite. **Anne** j'espère qu'on retournera courir ensemble un de ces quatre !!

A toute l'équipe du bloc Ortho Rachis Main de la **Timone** avec qui j'ai adoré travailler pendant presque 2 ans.

Aux infirmiers du 3<sup>ème</sup> de la Timone qui ont survécu à notre semestre sans interne de salle.

A **Libera**, ma représentante préférée. Celle grâce à qui les fixateurs articulaires n'ont plus de secret pour moi !! Tu nous accompagnes depuis notre premier semestre, et c'est toujours un grand plaisir de te voir au bloc comme aux thèses.

A **Eric** Lapasse, qui m'a connue toute bébé interne. Toujours heureuse d'avoir de tes nouvelles, bien dommage que tu ne viennes pas nous voir à l'APHM.

A **Morgane**, toi qui passes souvent nous faire des coucous et qui est si dévouée pour les patients (et attentionnée pour les internes aux lendemains difficiles !).

A **Rémy**, toujours très professionnel mais surtout quelqu'un de vraiment sympathique !

A **Yves** Dumanois, aux côtés de qui je ferai un jour, je l'espère, ma première PTG à Sainte Marguerite !!

A **Anachou** et **Diana**, mes plus anciennes amies, mon retour aux sources. Nos vies ont pris des chemins différents et pourtant rien ne change.

A mes gueuses. Le temps qui passe semble prouver que rien ne peut nous séparer.

Ma **Jojo**, petit télétubbies rose, tu manques déjà à ma vie Marseillaise et à mes soirées footing maintenant disparues... Tu sais que tu es chez toi à la maison, jamais tu ne nous déranges ! Garde ce sourire à grandes dents et cette bonne humeur débordante.

Ma **Lolo**, enfin de retour à Marseille avec Riva the Queen. Tes « Au panier » me manquaient ! Toi qui nous suis toujours dans nos escapades sportives sans râler trop fort, mais qui est surtout une amie si douce et présente quoi qu'il arrive. N'oublie pas que je suis aussi là pour toi.

Ma **Melki**, ta folie douce n'a d'égale que ta loquacité ! Tellement de moments partagés depuis cette époque au Bat 14, à camper dans la montagne ou à refaire le monde. Notre touche de spiritualité. Heureusement aussi que tu es là pour partager ma passion du rugby !

Mon **Popo**, à notre mini colloq à la boate, nos vendredis soir chez Hippopotamus que j'aurais du mal à assumer maintenant, les Nuits Sonores, ton moov de la tête après quelques verres que j'aime tant. Je t'attends dans le Sud, mais tarde pas trop quand même j'ai si hâte de t'avoir près de moi !

**Claire mon chou**, ma plus fidèle acolyte pour enchaîner les rhums mais surtout ma confidente toutes ces années. Pardon de ne jamais être venue jusqu'à Rouen, promis je vais me rattraper et venir souvent dans votre villa des « Marseillais à BJ ».

Ma **Laura**, apprendre à te connaître aura été la plus belle chose que votre coloc lyonnaise m'ait apportée. T'es vraiment celle qui me fait le plus rire de toutes je crois ! Je suis fière de toi et de ton courage ces derniers mois.

Ma **Anaïs**, la plus belle de toutes les blondes mais aussi mon binôme de choc pour les activités sportives ! Tellement triste qu'on n'ait pas pu te rejoindre à la Réunion... Merci pour ta bienveillance envers nous toutes et pour les rhums arrangés !!

J'ai l'impression d'avoir grandi avec vous. Vous êtes les sœurs que je n'ai jamais eues. Je rêve qu'un jour on vive à nouveau toutes dans la même ville.

Mention spéciale à vos zouzes, **TT**, **Alex**, **Séba**, **Juan**, **Thib**, **Abalo** et **Maxou**, que j'aime presque autant que vous. Merci de rendre mes copines heureuses, vivement les prochaines vacances en famille !!!

Aux founes, ma troisième famille. Merci d'apporter à ma vie tous ces moments hauts en couleurs, en rires et en amour. **Roxane**, **Clotilde**, **Lou**, **Anastasia**, **Mélina**, **Julie-Anne**.

**Mimi**, devenue ma coloc après une soirée sur ce fameux rooftop lyonnais mais surtout une des personnes qui compte le plus pour moi. T'avoir dans ma vie a fait de moi quelqu'un de meilleur. **Kiki**, la plus cagole de nous toutes mais ça te va si bien. Même si on se voit peu en ce moment, tu es une amie qui compte énormément pour moi. Ma **Julie**, notre guerrière de la forêt amazonienne, tu me manques tant maintenant que tu vis à Castel. **Marie** et **Céline**, les plus incroyables de toutes les mamans. **Popi**, toujours le mot pour taquiner mais surtout pour reconforter.

A ma **Juliette** d'amour, mon coup de foudre, mon artiste. Merci d'avoir toujours été là, tu es tellement importante dans ma vie. Et merci pour la relecture. Sans oublier **Gabi** qui sait tant me faire rire. Vous êtes des piliers pour moi. Vivement que cette thèse soit écrite pour le retour des apéros Koh Lanta !!

A ma **Mujgan**, toi qui as su me séduire avec des photos de chats et une barre de pole dance. Tes vocaux matinaux sont toujours des réconforts dans les journées pas drôles. Vous êtes avec **Youri** des amis précieux, et je suis si heureuse d'être une Témoin de votre mariage ! Merci pour le petit chauffage d'appoint by the way ;)

A mon **Thibthib**, parce qu'un Thibaud c'est bien mais deux c'est mieux ! Hyper actif et parfois insaisissable, mais toujours présent pour les moments importants. Avec **Marjo**, vous nous quittez pour BJ city, mais on espère bien venir squatter la piscine olympique. Encore merci pour ces chouettes vacances à l'île d'Yeu et surtout pour tous ces moments de love depuis 4 ans.

A ma **Morgui**, mon acolyte depuis le tout début de cet internat à Toulon, toujours partante pour une petite gaufre ou un ciné sur nos repos de garde. Une âme remplie de douceur, amoureuse des belles choses, qui m'apaise et me fait tant de bien.

A **Arnaud**, ton grand zen et surtout ton grand cœur, spécialiste du port de charges lourdes, et **Anaïs**, si douce, toujours attentive aux autres et si investie pour les femmes. Tellement hâte de rencontrer votre mini vous !

A mes **Popsi** et **Marine**, toutes ces soirées au petit Pav', à l'internat, à l'Escalié. Mais passées nos fiestas endiablées, vous êtes devenues de vraies amies. Toujours heureuse de vous retrouver pour des apéros entre bébés.

A **Alice**, **Gilles**, **Juliette** et **Victor**, les meilleurs voisins de la terre. Les mois de confinement nous ont offerts ces heures de partage et de nouer cette belle amitié. Vous nous manquez ainsi qu'aux chattes !

A **Marie** et **Julien**, ces petits brunchs improvisés sur notre rooftop, ces apéros qui finissaient parfois au petit matin avec Marie... Un vrai bonheur de partager tous ces moments avec vous. Vous êtes des personnes géniales, des vrais rayons de soleil.

A **Laure**, **Léa**, **Guillaume**, **Yann** et **Pierre**, qui ont fait en sorte que la ZAD ne meurt jamais. A ces incroyables soirées et ces repas plus intimistes.

A **Sixtine** et **Serros**, les navigateurs de l'extrême, toujours partants pour boire des verres entre copains !

A **Madeleine**, **Arthur** et **Marcel**, qui sont entrés dans ma vie il y a peu mais prennent déjà une place importante.

A **Loïc**, fervent défenseur des fourmis géantes provençales, et **Ornella**, qui est d'une bienveillance sans égale envers tous ceux qui l'entourent. Vous êtes le genre d'amis qu'on est toujours heureux de croiser.

A **Flo** et **Matou**, les plus marseillais des dijonnais, je regrette qu'on ne vous voit pas plus souvent !

A toute la **team** des **Dijonnais**, que j'ai vraiment appris à connaître cet été. Une semaine mémorable, merci de m'avoir accueillie à bras ouverts !! Tous plus super les uns que les autres, Thib a vraiment de la chance de vous avoir.

A **Raph** et **Pumba**, duo d'amis chic et choc que j'adore. Raph, si inspirante tant par ton implication de chirurgienne que par ton incroyable sens de l'esthétique. Pumba, ta folie et ta gentillesse me manquent.

A mes parents, qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenue dans les moments parfois difficiles. C'est grâce à vous que j'en suis arrivée là. **Maman**, toi à qui j'ai PRESQUE toujours tout raconté, tu m'as entre autres choses donné ce goût si fort pour la lecture ! Merci aussi de m'avoir laissée te voler tes chaussures toutes ces années. **Papa**, de qui je tiens, je crois, ce caractère affirmé. Tu m'as appris à donner le meilleur de moi-même. Merci pour tous les conseils en bricolage, dont je vais avoir encore bien besoin !

Mes compagnons de course à pied préférés. Vous êtes la preuve que l'amour peut durer toute une vie. Je vous aime tant.

A mon « petit » frère, mon **Yoyo**. Je suis si admirative de ton courage et ta volonté. Toutes ces heures passées à se déguiser ou à construire des maisons en Lego pour nos Playmobil sont des souvenirs chers à mon cœur. Maintenant c'est ta maison du bonheur avec **Alexanne** que tu construis, je vous souhaite d'être les plus heureux, vous le méritez.

A **Brigitte** et **Jean-Jacques**. Vos visites marseillaises sont toujours un immense plaisir. Il n'est pas étonnant que Thibaud soit une si belle personne quand on vous connaît.

A **Camille** que j'admire, **Pierre** (merci pour ton anglais parfait !), **Agathe** et **Pauline**, merci de m'avoir accueillie dans votre famille.

A **Pépé**, **Mémé** et **Papi**, que je ne vois malheureusement pas assez souvent, surtout depuis ce covid... Merci pour toutes ces vacances quand on était petits !

A **TATA** et **tonton** et leur ménagerie, ainsi que mes **cousines** avec qui j'ai tant ris lors de nos Noël tous ensemble.

A **Karine** ma Tata de cœur, **Will** et votre **princesse**.

Aux **4 F** qui font aussi un peu partie de la famille.

Et enfin à mon **Ticu**.

Depuis plus de trois ans, pas une journée ne passe sans que je mesure la chance que j'ai de t'avoir à mes côtés. Ton amour pour les chats et les plantes, tes attentions, tes soupes de butternut et tes pâtes brisées, ta bienveillance, font de toi l'homme parfait !! Merci de toujours me suivre dans mes idées parfois farfelues, de me soutenir quand ça ne va pas, de ne jamais me juger. Je suis tellement heureuse qu'on ait acheté cette maison qui nous ressemble tant et j'ai hâte qu'on s'envole quelques mois au soleil pour devenir des véliplanchistes professionnels. A ces beaux projets et au reste de notre vie tous les deux. Je t'aime.

Sans oublier **Cannelle** et **Quinoa**, pour leur soutien ronronnant sans faille lors de ces longues soirées à travailler, et **Havana** qui nommera bientôt notre belle maison...

# Table des matières

<b>1. Introduction .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Première partie : description .....</b>	<b>7</b>
2.1 La prothèse totale de genou .....	7
2.1.1 Epidémiologie .....	7
2.1.2 Indications .....	7
2.1.3 Historique .....	9
2.1.4 Les différents types de prothèse totale de genou.....	9
2.1.5 Les différentes voies d'abord .....	11
2.1.6 Protocole de notre service .....	13
2.2 La méthode d'analyse du cycle de vie.....	15
2.2.1 Définition .....	15
2.2.2 Méthode de calcul .....	16
2.2.3 Les différents types d'impacts.....	20
<b>3. Analyse du cycle de vie d'une prothèse totale de genou .....</b>	<b>25</b>
3.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude .....	25
3.1.1 Objectifs de l'étude .....	25
3.1.2 Champ de l'étude .....	25
3.1.3 Choix méthodologiques.....	26
3.1.4 Bases de données utilisées.....	27
3.2 Inventaire et recueil des données.....	30
3.2.1 Inventaire .....	30
3.2.2 Audit .....	31
3.3 Les implants prothétiques.....	31
3.3.1 Lieu de fabrication de la prothèse.....	32
3.3.2 L'implant fémoral .....	32
3.3.3 L'implant tibial et la tige d'extension .....	35
3.3.4 L'insert en polyéthylène et le bouton rotulien.....	37
3.3.5 Emballages.....	38
3.3.6 Transport du produit fini et distribution .....	40
3.4 Instruments chirurgicaux et ancillaires de pose.....	41
3.4.1 Matériel nécessaire à la chirurgie.....	41
3.4.2 Composition .....	42
3.4.3 Poids carbone total et pour une unité fonctionnelle .....	43
3.4.4 Transport et stérilisation .....	43
3.5 Consommables à usage unique.....	45
3.5.1 Équipement du personnel et détergence manuelle.....	45
3.5.2 Données nécessaires au calcul des impacts .....	46
3.6 Consommation électrique du bloc opératoire .....	47
3.6.1 Temps moyen d'occupation du bloc.....	47
3.6.2 Données générales .....	47
3.6.3 Calcul de la consommation pour une intervention .....	48
3.7 Traitement des déchets .....	49
3.7.1 Implants prothétiques .....	49
3.7.2 Emballages et consommables .....	49
3.8 Déplacements humains.....	50
3.8.1 Personnel médical et paramédical .....	50
3.8.2 Patients.....	51

<b>4. Résumé sous forme d'article.....</b>	<b>52</b>
<b>5. Résultats : analyse des impacts.....</b>	<b>56</b>
5.1 Objectif principal : empreinte carbone globale du cycle de vie de la PTG .....	56
5.2 Objectif secondaire : empreinte carbone par catégorie .....	56
5.2.1 Fabrication de la prothèse.....	57
5.2.2 Déplacements.....	58
5.2.3 Chirurgie .....	58
5.2.4 Traitement des déchets.....	59
5.3 Autres impacts .....	59
<b>6. Discussion.....</b>	<b>61</b>
6.1 Interprétation des résultats .....	61
6.2 Limites de l'étude.....	63
6.3 Comment s'améliorer ?.....	64
<b>7. Conclusion .....</b>	<b>67</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>68</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>71</b>

## Abréviations

ACV LCA : analyse du cycle de vie

CCK condylar constrained knee

DAOM déchets assimilables aux ordures ménagères

DASRI déchets liés aux activités de soin à risque infectieux

GES gaz à effet de serre

LCA ligament croisé antérieur

LCP ligament croisé postérieur

NY New-York

OMS Organisation mondiale de la Santé

PE polyéthylène

PEHD polyéthylène haute densité

PP polypropylène

PS postéro-stabilisée (prothèse)

PTG prothèse totale de genou

TTA tubérosité tibiale antérieure

## Préambule

Au cours des quatre dernières années, de nombreux évènements ont signé un authentique changement dans ma vie. Entre mon déménagement dans la ville de Marseille afin de débiter mon internat de chirurgie orthopédique et d'importantes rencontres humaines, une prise de conscience réelle des menaces sur l'environnement qui m'entoure, associée à une volonté de participer à sa préservation, est née. Ainsi, j'ai progressivement modifié mon mode de vie pour minimiser autant que possible, à mon échelle, mon impact sur la planète et ce réchauffement climatique dont on parle tant. J'essaie, au quotidien, de sensibiliser les personnes qui m'entourent, et j'aime à penser que certaines petites graines, plantées lors de discussions, ont porté leurs fruits, ouvrant les yeux à d'autres que moi sur l'importance et la portée parfois de nos petits gestes du quotidien.

S'est en parallèle posée la question de mon impact au travail. En tant que chirurgienne, la consommation énergétique et de matériaux semble énorme. Nous le constatons tous au quotidien : poubelles remplies à la fin d'une intervention, avec de nombreux matériaux à usage unique et des emballages à n'en plus finir.

La proposition du Professeur Matthieu OLLIVIER d'une thèse traitant de l'écologie, et plus particulièrement de **l'impact carbone d'une prothèse totale du genou** m'a alors séduite.

Le but de ce sujet n'est pas de critiquer cette intervention permettant d'améliorer la vie quotidienne des patients, mais d'alerter le personnel médical, paramédical, ingénieurs et laboratoires de prothèse sur les conséquences écologiques de cette intervention et donc, sur la nécessité de chercher des solutions permettant de diminuer ces dernières, préserver la planète, et par conséquent notre santé.

# 1. Introduction

Les répercussions négatives des activités humaines sur la santé de la population mondiale sont doubles. D'une part, le réchauffement climatique, causé par l'émission des gaz à effet de serre (GES), laisse supposer une augmentation globale de la température de 2°C d'ici à 2050, d'après les dernières estimations réalisées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GEIC) (1). Les conséquences seraient multiples : acidification des sols, élévation du niveau des océans avec des déplacements de population ainsi que des sécheresses ou précipitations accrues, menaçant la sécurité alimentaire et en eau des populations les plus défavorisées, augmentation des zones tropicales et donc de l'incidence des maladies infectieuses, vagues de chaleur plus nombreuses et plus longues (2). D'autre part, bien qu'étroitement liée au réchauffement climatique, la pollution atmosphérique en elle-même représente une menace. D'après l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), il s'agit d'une des principales causes de maladies et de décès prématurés dans le monde au XXI<sup>e</sup> siècle (3,4). En 2016, on estimait à 4,6 millions le nombre de décès prématurés liés à la pollution de l'air extérieur, principalement à la suite de maladies cardiovasculaires (58 %), de BPCO ou d'infections aiguës des voies respiratoires inférieures (18 %) et de cancers du poumon (6 %) (3).

Les experts scientifiques tirent la sonnette d'alarme : il faut tout faire pour réduire nos émissions exerçant une influence sur l'ensemble de la biodiversité, du climat ainsi que sur notre santé. Dès 2009, la commission « *The Lancet sur le climat et la santé* » appelait les scientifiques et professionnels de santé à réaliser une analyse critique et une remise en question de certaines de leurs activités afin de réduire leur impact écologique et d'adopter un rôle prépondérant dans la réponse face à la menace sanitaire provoquée par le changement climatique (4).

En effet, le secteur de la santé représente en lui-même une source majeure de pollution et de GES. Une étude publiée en 2018 retrouvait que les soins de santé australiens contribuaient à environ 7% des émissions de CO<sub>2</sub> du pays, dont la moitié provenait des hôpitaux (5). Les données sont comparables avec celles des systèmes de santé en Angleterre et aux Etats-Unis avec respectivement 4% et 10% des GES (6). En ce qui concerne la France, aucune étude

robuste n'a, à ce jour, été menée. Selon un rapport publié en 2019 par *Health Care Without Harm*, l'ordre de grandeur pour notre pays, pour l'année 2014, serait d'environ 4.6% des émissions totales du pays. De par l'importante consommation électrique requise pour la filtration de l'air et le maintien à une température optimale, l'utilisation de gaz anesthésiques ainsi que les nombreux matériaux nécessaires ou encore les déchets produits, on estime que l'activité chirurgicale au bloc opératoire représenterait à elle seule 20 à 30% des émissions de GES des systèmes de santé (7).

Même si la littérature reste assez peu fournie sur l'empreinte écologique des pratiques chirurgicales, certains auteurs se sont déjà penchés sur la question avec l'étude du cycle de vie de certains dispositifs médicaux ou interventions chirurgicales. Les articles les plus nombreux concernent la chirurgie de la cataracte par phacoémulsification, avec des résultats allant de 6 kgCO<sub>2</sub> eq. par chirurgie dans un centre d'ophtalmologie de pointe en Inde (8) à 181 kgCO<sub>2</sub> eq. par chirurgie dans un service en Grande Bretagne (9), énorme différence expliquée par une optimisation maximale des salles de bloc opératoire et l'utilisation d'une grande quantité de matériel réutilisable. L'étude britannique stipulait que plus de la moitié (53%) des émissions directes ou indirectes de carbone étaient dues à l'approvisionnement en matériel chirurgical et pharmaceutique (9) (10). En effet, des études comparatives de l'impact carbone entre matériel réutilisable et matériel à usage unique, concernant par exemple les masques laryngés (11) ou les laryngoscopes (12), suggèrent qu'il est moindre pour le matériel réutilisable, ce malgré le coup énergétique de la re stérilisation.

Une autre étude réalisée aux Etats Unis en 2014, portant sur différentes techniques d'hystérectomie, montrait un résultat moyen de 561 kgCO<sub>2</sub> par intervention avec une large partie émise par la production du matériel chirurgical et par les gaz anesthésiques (13). Aucune étude concernant l'impact écologique de la chirurgie prothétique en orthopédie n'a, à ce jour, été publiée, alors qu'elle semble être la chirurgie nécessitant le plus de matériel.

Rien qu'en France, 90 000 chirurgies de prothèses totales de genou sont réalisées chaque année. Il s'agit d'une des interventions les plus pratiquées en chirurgie orthopédique, que ce soit à l'hôpital public ou dans les cliniques du secteur privé.

Nous avons donc voulu, à travers l'étude du cycle de vie de la réalisation d'une prothèse totale de genou, mesurer les différents impacts écologiques que cela représente, identifier les facteurs facilement modifiables et motiver les différents protagonistes à œuvrer pour une minimisation de ces conséquences.

## 2. Première partie : description

### 2.1 La prothèse totale de genou

#### 2.1.1 Épidémiologie

La chirurgie de prothèse totale de genou, également appelée **arthroplastie totale de genou**, est une intervention parmi les plus fréquemment réalisées, que ce soit dans les hôpitaux publics ayant un service de chirurgie orthopédique ou dans les cliniques du secteur privé. Suivant le vieillissement croissant de la population française, le nombre de prothèses réalisées en France chaque année est en constante augmentation. Il est passé de 60 320 interventions en 2008 à plus de **90 000 en 2020** (données de l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé).

Selon une étude descriptive, publiée en 2020, de l'évolution épidémiologique avec réalisation de projections, une **augmentation de 30 à 150%** est attendue d'ici à 2050, soit la réalisation de 130 000 à 250 000 prothèses totales du genou par an en France (14).

#### 2.1.2 Indications

L'arthroplastie totale de genou consiste au **remplacement de l'articulation** fémoro-tibiale sur les compartiments interne et externe, le plus souvent associé à un resurfaçage de l'articulation fémoro-patellaire. L'indication la plus courante (90%) est **l'arthrose primaire** de genou touchant au minimum 2 compartiments articulaires parmi le fémoro-tibial interne, externe et le fémoro-patellaire, symptomatique malgré un traitement médical bien conduit. Le diagnostic est généralement fait dans le cadre de **gonalgies** le plus souvent mécaniques,

parfois à caractère inflammatoire lors de certaines poussées, conduisant à la réalisation de radiologies du genou de face, de profil, en schuss et des incidences sur l'articulation fémoro-patellaire. Les **signes radiologiques** classiques sont le pincement artriculaire, l'ostéocondensation sous chondrale, la présence de géodes et d'ostéophytes.



Figure 1 : radiographie d'un genou arthrosique

Cette chirurgie peut également être réalisée dans le cadre de pathologies inflammatoires (telles que la polyarthrite rhumatoïde ou la spondylarthrite ankylosante), tumorales ou traumatiques.

Toutes ces pathologies entraînent une **destruction**, progressive ou brutale, **du cartilage artriculaire**, source de douleur, de raideur et d'atteinte fonctionnelle.

La chirurgie de remplacement prothétique est donc une **chirurgie fonctionnelle**. Elle a pour but de diminuer les douleurs et de redonner au patient des amplitudes articulaires correctes et compatibles avec une vie normale, rejoignant le concept d'années de vie en bonne santé.

### 2.1.3 Historique

C'est en 1890 que le chirurgien Themistocles Glück réalisa la première implantation prothétique dans un genou, consistant à l'interposition d'un implant en ivoire dans un contexte de tuberculose. Cette dernière plutôt anecdotique, se solda par un échec.

Après d'autres tentatives (Campbell en 1940, les frères Judet en 1947), il faut attendre les années 1970-1980 pour voir apparaître l'ancêtre des prothèses totales de genou telles que nous les connaissons aujourd'hui. D'abord unicompartimentales (Gunston en 1972) ou à charnière (Gschwend en 1970), ces prothèses se descellaient très fréquemment, du fait de l'importance des contraintes qui leur étaient appliquées, et donnaient des résultats fonctionnels assez mauvais.

Freeman-Swanson propose la première prothèse semi contrainte en 1970, avec résection des deux ligaments croisés. John N. Insall s'en inspirera en 1974 pour développer sa prothèse Total Condylar. Il faudra attendre 1980 pour voir apparaître la prothèse avec postéro-stabilisation par came, dont le design est toujours utilisé à ce jour. S'ensuivront de nouvelles propositions et progrès, avec par exemple la prothèse de Hungerford, Krackow et Kenna, avec conservation du ligament croisé antérieur et ancillaire de pose standardisée, puis l'apparition de la modularité des implants en fonction de la taille des patients, le plateau rotatoire etc...

### 2.1.4 Les différents types de prothèse totale de genou

Malgré les nombreux modèles de prothèse totale de genou existants sur le marché actuel, toutes respectent le **même schéma** : un implant tibial, un implant fémoral, un implant en polyéthylène interposé entre les deux et le plus souvent un bouton rotulien pour le resurfaçage de la rotule. Le challenge de la mise en place de la prothèse est de respecter la stabilité de l'espace en flexion et en extension ainsi que **l'équilibrage ligamentaire**.

Elles peuvent ensuite être classées selon différents critères : la contrainte appliquée, la fixité du plateau tibial, le type de fixation des implants.

#### 2.1.4.1 Selon la contrainte

- **prothèses non contraintes** (prothèses bi-croisées) : avec conservation des deux ligaments croisés. Le ligament croisé antérieur étant fréquemment non fonctionnel dans les arthroses évoluées et symptomatiques, elles sont assez peu utilisées.
- **prothèses postéro-conservées** (PC) : le ligament croisé postérieur (LCP) est laissé intact. La cinématique est proche du genou natif mais la réalisation est plus difficile car la conservation du LCP complexifie l'exposition de l'articulation.
- **prothèses postéro-stabilisées** (PS) : les deux ligaments croisés sont sacrifiés. Il existe quatre types de prothèses PS, en fonction de l'élément qui permet la stabilisation postérieure et le rollback : par système plot-came, par plateau ultra congruent, par 3<sup>ème</sup> condyle et par médial pivot.
- **prothèses à contrainte frontale augmentée CCK (condylar constrained knee)** : leur stabilité en varus et valgus est meilleure que pour les prothèses non contraintes. Elles peuvent donc être réalisées chez des patients avec déficience ligamentaire modérée des plans collatéraux.
- **prothèses à charnière rotatoire** : niveau de contrainte le plus élevé. Permet de s'affranchir totalement de la fonctionnalité des plans ligamentaires collatéraux. Elles sont utilisées dans les chirurgies de reprise avec perte de substance osseuse majeure, dans les résections tumorales, les grands récurvatum ou encore l'insuffisance capsulaire postérieure.

#### 2.1.4.2 Selon le plateau tibial

On différencie le **plateau tibial fixe**, avec une embase tibiale et un polyéthylène tous les deux fixes, du **plateau tibial mobile**. Celui-ci est utilisé pour les prothèses avec 3<sup>ème</sup> condyle ou ultra-congruente. Le plateau possède une mobilité de translation antéro-postérieure, rotatoire ou mixte. Il permet une meilleure répartition des contraintes sur le polyéthylène et donc une usure moindre de celui-ci.

#### 2.1.4.3 Selon le type de fixation

La fixation des implants fémoral et tibial peut être réalisée avec du **ciment**, technique gold standard, sans ciment par **ostéointégration** à l'aide de revêtements ostéoconducteurs comme l'hydroxyapatite, le titanium poreux ou le tantale poreux, ou enfin de manière **hybride** avec un fémur fixé sans ciment et une embase tibiale cimentée.

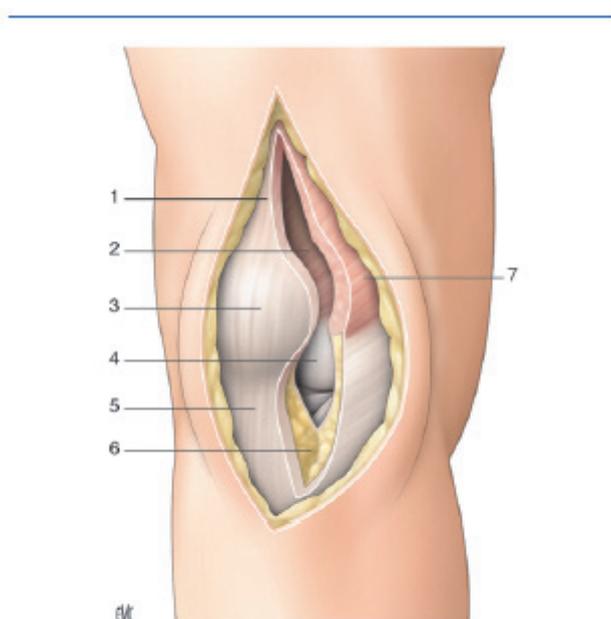
## 2.1.5 Les différentes voies d'abord

### 2.1.5.1 Voies d'abord médiales

#### 2.1.5.1.1 Voie para patellaire médiane

L'incision cutanée et sous cutanée est antéro-médiale et verticale, de 10 à 14 centimètres environ, sur genou fléchi à 90°. Elle débute 5 centimètres au-dessus du pôle proximal de la rotule et se termine 2 centimètres en dessous de la tubérosité tibiale antérieure (TTA).

L'arthrotomie est verticale. Elle débute dans le tendon quadricipital à 1 centimètre de son bord médial, en dehors de l'insertion du muscle vaste médial, s'incurve et se poursuit vers le bas à 2 centimètres du bord interne de la rotule et du tendon rotulien.



**Figure 2.** Arthrotomie médiale. 1. Tendon quadricipital; 2. cul-de-sac quadricipital; 3. patella; 4. condyle fémoral médial; 5. tendon patellaire; 6. ligament adipeux de Hoffa; 7. muscle vaste médial.

Figure 2 : voie d'abord para patellaire médiane

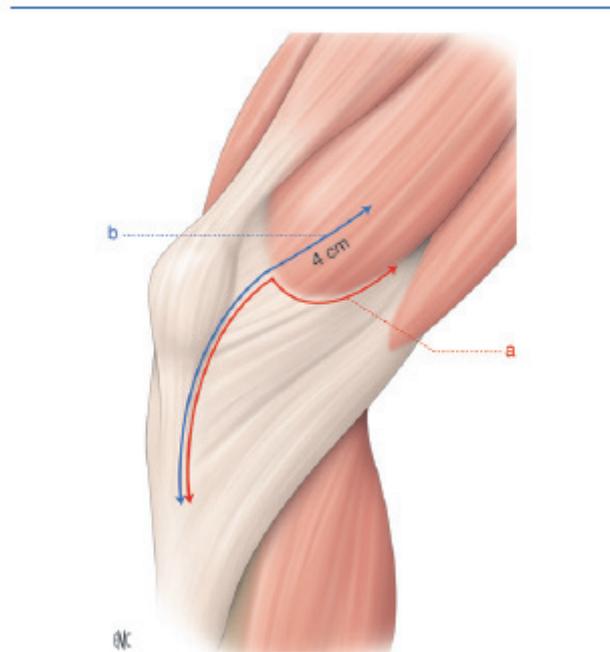
#### 2.1.5.1.2 Voie subvastus

L'incision cutanée est également antéro-médiale et verticale, mais la partie supérieure de l'incision est légèrement plus médiane que dans la voie para patellaire.

L'arthrotomie est réalisée en « L » inversé, après décollement du bord inférieur du muscle vaste médial du septum intermusculaire, section de l'insertion horizontale du vaste médial et réclinement du muscle en externe à l'aide d'un écarteur.

#### 2.1.5.1.3 Voie midvastus

L'incision cutanée est la même que pour la voie subvastus. L'arthrotomie est également réalisée en « L » inversé mais cette fois l'incision, pour accéder à la capsule, passe en plein corps musculaire du vaste médial.



**Figure 6.** Variation de l'abord médial. a. Voie subvastus; b. voie midvastus.

#### Figure 3 : variantes de la voie d'abord médiane

#### 2.1.5.2 Voies d'abord latérales

Utilisées plutôt lors de déformations en valgus du genou.

##### 2.1.5.2.1 Voie antéro latérale

L'incision cutanée et sous cutanée est médiane ou légèrement latérale. Elle s'étend de 5 centimètres au-dessus du bord supérieur de la patella à 2 centimètres en dessous de la TTA. L'ouverture de l'articulation débute au niveau du tendon quadricipital, en dedans de l'insertion du muscle vaste latéral puis s'incurve en incisant le rétinaculum 2 centimètres en dehors de la rotule et du tendon rotulien. Une ostéotomie de la TTA est le plus souvent nécessaire pour luxer la rotule en dedans et avoir une bonne visualisation de toute l'articulation.

#### 2.1.5.2.2 Voie de Keblish

Elle est peu utilisée, essentiellement lors des déformations avec **valgus important**. L'incision cutanée et sous cutanée est la même que précédemment, souvent plus étendue en proximal. En revanche, l'incision du retinaculum se fait en réalisant une plastie frontale en « Z » (dans son épaisseur), permettant d'allonger les tissus mous lors de la fermeture. Un décollement sous périoste jusqu'à la TTA permet de luxer la rotule en dedans. Ce même décollement est réalisé d'avant en arrière, à partir du tubercule de Gerdy, pour terminer l'exposition articulaire.

### 2.1.6 Protocole de notre service

#### 2.1.6.1 Type prothèse

Parce qu'elle est la prothèse la plus utilisée dans le service du Professeur ARGENSON, nous avons choisi de cibler notre étude sur une **prothèse postéro-stabilisée par système plot-came** avec plateau fixe et **cimentation** des implants, mise en place chez des patients présentant une gonarthrose primaire résistante au traitement médical.



Figure 4 : implants morphométriques d'une prothèse totale de genou postéro-stabilisée

#### 2.1.6.2 Installation du patient

Le patient est installé en décubitus dorsal soit sous anesthésie générale, soit sous **rachis-anesthésie**.

Le genou opéré est placé à 90° de flexion, maintenu dans cette position par une cale latérale et une cale sous le pied empêchant que celui-ci ne glisse vers l'avant.

### 2.1.6.3 Technique opératoire

L'incision est **antéro-médiale**. La voie d'abord varie selon les chirurgiens du service.

La rotule est réclinée ou éversée en externe, puis est réalisé :

- Résection du LCA et du LCP. Résection des deux ménisques.
- Mise en place d'un HOHMAN au bord latéral du tibia, et d'un VOLKMANN au bord médial du tibia. Résection des ostéophytes de l'échancrure inter-condylienne.
- Mise en place du guide de coupe tibiale avec visée extra-médullaire. Vérification du niveau de coupe au niveau du tibia proximal avec un palpeur.
- Mise en place du guide de coupe fémorale distale avec visée intra-médullaire. Vérification du niveau de coupe au niveau du fémur distal à l'aide d'une faux.
- Réalisation de la coupe tibiale proximale et de la coupe fémorale distale. Contrôle des écarts en extension, à l'aide d'un spacer.
- Mesure de la taille de l'implant fémoral et détermination de la rotation. Mise en place du guide de coupe fémorale, 4 en 1. Vérification des écarts en flexion, à 90°, à l'aide d'un spacer.
- Réalisation des coupes à la scie oscillante : la coupe antérieure, les condyles postérieurs, puis les chanfreins antérieurs et postérieurs.
- Résection des ostéophytes condyliens postérieurs après distraction à l'aide d'un davier de MEHARY.
- Réalisation de la boîte fémorale.
- Finalisation du tibia à l'aide d'une mèche, puis d'un compacteur d'os spongieux.
- Resurfaçage de la rotule à l'aide de l'ancillaire dédié. Épaisseur restante : 14 mm. Choix de la taille du bouton rotulien d'essai. Testing ligamentaire satisfaisant dans le plan frontal et sagittal et de la course rotulienne. Absence de flessum. Tracking rotulien satisfaisant.
- Lavage pulsé haute pression.
- Réalisation des infiltrations locales.
- Cimentation des implants définitifs.
- Fermeture plan par plan sur un drain de Redon aspiratif selon le protocole du service. Agrafes sur la peau.

## 2.2 La méthode d'analyse du cycle de vie

### 2.2.1 Définition

L'**analyse du cycle de vie (ACV)** ou Life Cycle Assessment en anglais, est l'outil le plus abouti en matière d'évaluation globale et multicritère des **impacts environnementaux** associés à toutes les étapes de la vie d'un produit ou d'un service, soit de l'extraction des matières premières à l'élimination ou au recyclage de celui-ci, en passant par le traitement des matériaux, la fabrication, la distribution, l'utilisation, la réparation et l'entretien. Cette méthode normalisée et systémique permet de mesurer les effets quantifiables de produits ou de services sur l'environnement, à travers plusieurs critères d'analyse des flux entrants et sortants. Ces concepts sont à la base de la double approche « cycle de vie » et « multicritère » (15).

La finalité première de cette approche est d'aider à la prise de décisions, à travers un bilan simple ou comparatif des impacts d'un produit ou d'un service, des priorités d'actions à mettre en œuvre pour l'**amélioration** sur les impacts environnementaux, qui seront décrits par la suite.

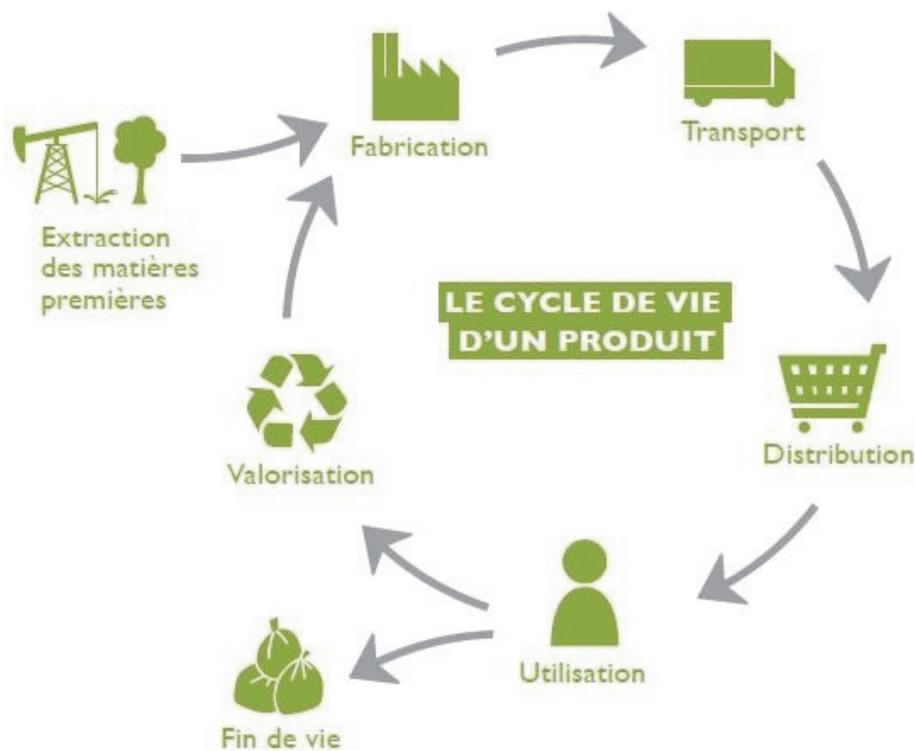


Figure 5 : schéma descriptif du principe de l'ACV

### 2.2.2 Méthode de calcul

L'ACV recense et quantifie, tout au long de la vie des produits, les flux physiques de matières et d'énergies associés aux activités humaines. Elle en évalue les conséquences potentielles puis interprète les résultats obtenus en fonction de ses objectifs initiaux. La normalisation internationale ISO (**normes ISO 14040 et 14044** en ce qui nous concerne) a largement participé au développement méthodologique de l'ACV, permettant d'en faire un outil de calcul robuste, performant et uniformisé.

La méthodologie de l'analyse du cycle de vie s'articule autour de **quatre étapes**, à la fois distinctes et interdépendantes :

- La définition des objectifs et du champ de l'étude
- L'inventaire des émissions et extractions
- Le calcul et l'évaluation des impacts
- L'interprétation des résultats.

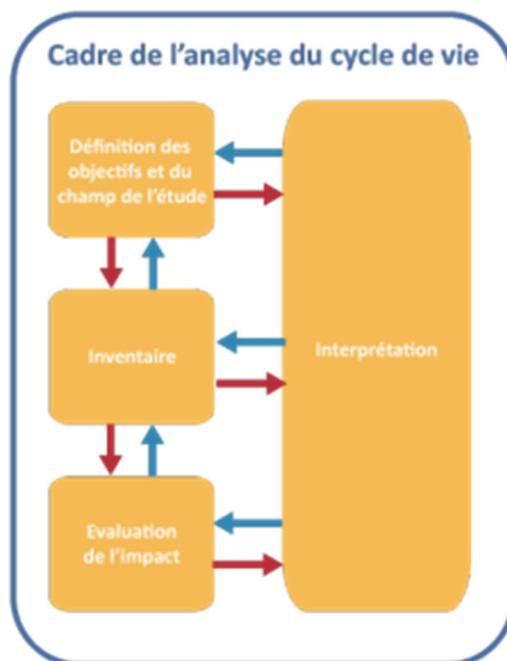


Figure 6 : méthodologie d'une ACV en 4 étapes

#### 2.2.2.1 *La définition des objectifs et du champ de l'étude*

Cette première étape permet de **définir** quels sont **les objectifs** de l'ACV, en précisant quelle sera son application future. Elle est essentielle pour garantir la qualité de l'étude. La cible de l'étude (interne ou externe à l'entreprise) est précisée à ce stade, ainsi que la manière dont seront divulgués les résultats (pour des affirmations comparatives par exemple). **Le champ de l'étude** doit, par ailleurs, préciser les fonctions du produit étudié, l'unité fonctionnelle choisie (voir ci-dessous), les hypothèses retenues, les frontières du système étudié ainsi que les limites de l'étude.

C'est aussi à ce stade que les différentes règles pour les calculs appliqués à l'étude seront arrêtées.

**L'unité fonctionnelle** est l'unité de mesure utilisée pour évaluer le service rendu par le produit. En effet, prendre pour unité de mesure le produit en lui-même ne permet pas de réaliser ensuite une **comparaison** fiable entre plusieurs produits. C'est bien la fonction de ces produits qui doit être ramenée à une unité comparable. Par exemple, comparer les répercussions écologiques de la fabrication d'un train ou d'une voiture a peu de sens. En revanche, on peut comparer l'influence du déplacement d'une personne sur un trajet de 300 km, en fonction de l'utilisation du train ou de la voiture.

D'une manière générale, l'unité fonctionnelle doit contenir une composante fonctionnelle, un critère de performance et une durée.

#### 2.2.2.2 *Inventaire des émissions et extractions*

Cette étape consiste à dresser **l'inventaire de tous les flux entrants et sortants** associés au produit étudié, puis à réaliser le recueil de toutes les données nécessaires au calcul des impacts en les rapportant toujours à l'échelle de l'unité fonctionnelle. Pour les flux entrants, il s'agira de données comme l'utilisation des sols, l'extraction des matières premières et de l'énergie utilisée. Les flux sortants correspondent aux différentes émissions mesurables qui vont être émises dans l'air, le sol et l'eau.

Cet inventaire peut être réalisé manuellement, à l'aide d'un tableur, ou avec l'aide d'un **logiciel d'ACV**. Ce type de logiciel, en intégrant des bases de données répertoriant les différents flux entrants et sortants connus de matières premières, énergies ou procédés industriels déjà étudiés, permet de simplifier le recueil des données.

### 2.2.2.3 Le calcul et l'évaluation des impacts

Toutes les données et tous les flux sortants de l'inventaire vont être **transformés** en une série **d'impacts potentiels**, à l'aide d'outils informatiques le plus souvent ou par calcul grâce aux données et à des facteurs multiplicatifs déjà présents dans la littérature.

Ainsi, pour rendre plus clair et compréhensible la lecture de ce travail, prenons l'exemple du cycle de vie d'une gomme en caoutchouc. Les flux entrants vont être :

- les matières premières : le caoutchouc de la gomme, le carton de son emballage ;
- l'énergie nécessaire à tous les processus de fabrication de la matière première, de la gomme elle-même et au fonctionnement des transports pour l'approvisionnement et la distribution.

Les flux sortants vont être :

- le produit en lui-même, ici la gomme ;
- les déchets générés à chaque étape du cycle de vie ;
- toutes les émissions générées à chaque étape du cycle de vie, comme des particules de CO<sub>2</sub> ou d'autres gaz dans l'atmosphère (souffre, méthane), des particules de Fer, de Plomb, de Phosphate, Bicarbonate etc...

Chaque flux va ensuite être classé dans les différentes catégories intermédiaires, elles-mêmes ensuite réparties entre les catégories de dommages.

En résumé, **les impacts sont donc des catégories de flux sortants regroupés**, à l'exception de ceux concernant la consommation de ressources qui regroupent plutôt des flux entrants de matières premières.

On utilise en général dans les ACV deux types de **catégorisation** des impacts :

- les catégories **intermédiaires orientées problèmes** (midpoint), comme l'émission de gaz à effet de serre ou l'acidification ;
- les catégories orientées **dommages**, encore plus globales (endpoint), comme l'influence sur la santé ou les risques pour les écosystèmes, qui sont en quelque sorte un regroupement de différents midpoints conduisant au même dommage final.

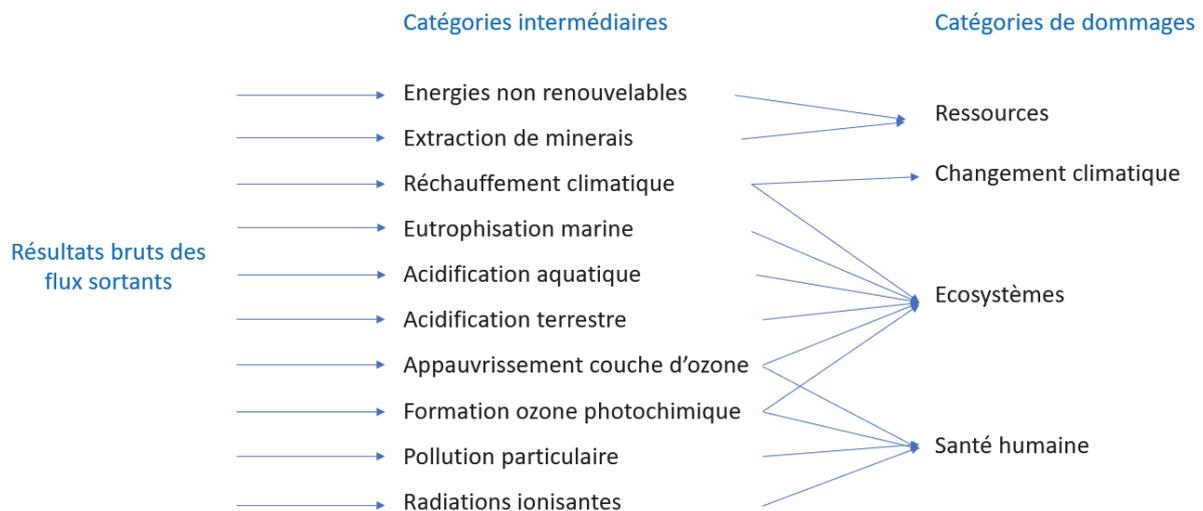


Figure 7 : schéma de la méthode de catégorisation des impacts

Avec l'utilisation d'un logiciel d'ACV, on obtient des résultats bruts sous forme le plus souvent de tableaux ou de graphiques, quantifiant les différents impacts pour chaque catégorie ou étape du processus étudié.

Il est important de ne pas calculer uniquement la portée sur le réchauffement climatique, mais de prendre en compte les autres conséquences possibles, comme l'acidification des océans ou l'appauvrissement des ressources, permettant lorsqu'on réalise des modifications sur le cycle de vie d'un produit, de ne pas faire ce que l'on appelle des **transferts d'impacts**. En effet, le choix d'une autre méthode de production ou d'une autre matière première pourra entraîner une diminution d'un type d'impact mais une augmentation d'autres.

#### 2.2.2.4 Interprétation des résultats

Dans cette dernière étape, on analyse tous les résultats obtenus pour en tirer des conclusions. On peut réaliser l'analyse de la contribution d'un certain procédé ou d'une certaine étape du cycle de vie, exprimée en pourcentage. Ceci va permettre d'évaluer quels intrants et quels processus sont les principales sources de l'impact environnemental.

Cette interprétation doit être **critique**, mettant en avant les limites et incertitudes de l'analyse réalisée. En effet, le recueil de données permet rarement d'obtenir une liste exhaustive de tous les flux. Il faut donc vérifier que le retentissement des approximations et hypothèses réalisées sur les résultats est tolérable et justifier les choix effectués.

## 2.2.3 Les différents types d'impacts

### 2.2.3.1 Émission de gaz à effet de serre et changement climatique

Les **gaz dits à effet** de serre ou GES jouent un rôle essentiel dans la régulation du climat. En absorbant et réémettant une partie des rayons solaires infrarouges, ils sont à l'origine de l'effet de serre (16). Sans eux, la température moyenne sur Terre serait de  $-18^{\circ}\text{C}$  au lieu de  $+14^{\circ}\text{C}$  et la vie n'existerait peut-être pas (17). Ils sont d'origine **naturelle**, présents sous forme de vapeur d'eau (nuages), ou **anthropique** liée aux activités humaines, notamment par l'utilisation des énergies fossiles.

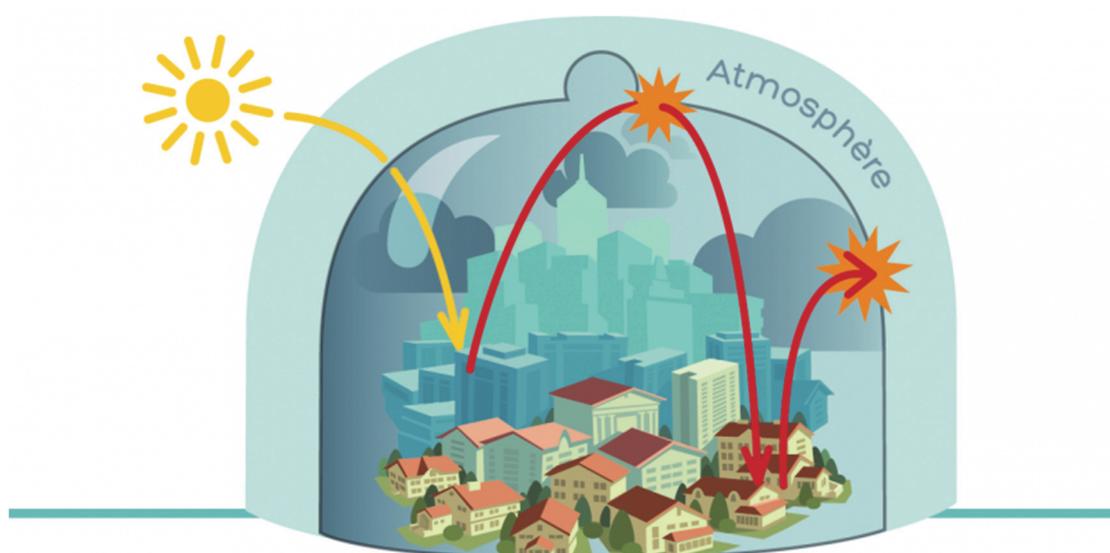


Figure 8 : l'effet de serre

C'est cette **augmentation**, depuis la révolution industrielle, des émissions de GES d'origine humaine, qui est responsable du **réchauffement climatique**, par piégeage d'une plus grande quantité des rayonnements infrarouges dont l'excédent est habituellement évacué en dehors de notre atmosphère.

L'énergie supplémentaire ainsi acquise par la planète se distribue surtout vers les océans (91%), la surface des continents (5%), est utilisée pour la fonte des glaces (3%) et seulement 1% est stockée dans l'atmosphère (1).

Signé en 1997 et entré en vigueur en 2005, le **protocole de Kyoto** est un accord international qui vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Sept gaz ont été ciblés comme principaux responsables :

- le **dioxyde de carbone** CO<sub>2</sub>. Il représente environ 2/3 des GES émis par les activités humaines et c'est la raison pour laquelle on rapporte souvent l'effet des autres gaz à effet de serre en équivalent CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> eq.). Sa durée de vie dans l'atmosphère est supérieure à 100 ans,
- le **méthane** CH<sub>4</sub>. Il provient essentiellement des élevages de ruminants, des décharges d'ordures et des exploitations pétrolières. Sa durée de vie est de 12 ans. 1 kg de CH<sub>4</sub> émis dans l'atmosphère est équivalent à 28 kg de CO<sub>2</sub>,
- le **protoxyde d'azote** N<sub>2</sub>O. Il provient des engrais azotés et de certains procédés chimiques. Sa durée de vie est de 120 ans environ. 1kg est équivalent à 265 kg CO<sub>2</sub> eq,
- les **chlorofluorocarbones** CFC,
- les **hydrofluorocarbones** HFC,
- les **perfluorocarbones** PFC,
- l'**hexafluorure de soufre** SF<sub>6</sub>,
- le **trifluorure d'azote** NF<sub>3</sub>, ajouté à la liste en 2013 (17).

#### 2.2.3.2 *Pollution par émission de particules*

Les **matières particulaires de substances inorganiques** sont un indicateur indirect courant de la pollution de l'air. Elles affectent plus de personnes que n'importe quel autre polluant. Les principaux composants en sont les sulfates, les nitrates, l'ammoniaque, le chlorure de sodium, le carbone, les matières minérales et l'eau. Elles sont formées d'un mélange complexe de particules solides et liquides, de substances organiques et minérales en suspension dans l'air. Si les particules d'un diamètre n'excédant pas 10 µ (≤ PM10) peuvent pénétrer et se loger profondément à l'intérieur des poumons, celles dont le diamètre est inférieur ou égal à 2,5 µ (≤ PM2.5) sont encore plus nocives pour la santé. Elles peuvent franchir la barrière pulmonaire et entrer dans la circulation sanguine. La pollution de l'air, à l'intérieur des locaux comme à l'extérieur, est un problème majeur de **santé environnementale** touchant aussi bien les pays à revenu faible, intermédiaire ou élevé.

On dispose de plus en plus de faits démontrant les liens entre la pollution de l'air ambiant et le **risque cardiovasculaire**, dont des études dans des zones très polluées. Les conclusions d'une évaluation menée en 2013 par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) de l'OMS ont montré que la pollution de l'air extérieur était **carcinogène**, les matières particulaires étant le polluant associé le plus étroitement à une incidence accrue de cancers,

en particulier du poumon (3). Un lien de causalité a également été établi entre la pollution atmosphérique et l'augmentation du nombre de cancers des voies urinaires et de la vessie. Le respect de **valeurs seuils** préconisées par l'OMS pourrait permettre de réduire l'incidence des pathologies en lien avec la pollution de l'air.

### 2.2.3.3 Acidification de l'air et des océans

Comme expliqué précédemment, une grande partie des émissions de CO<sub>2</sub> se dissout dans les océans et est responsable d'une réaction chimique entraînant la formation **d'acide carbonique et d'ions hydrogènes**. En résulte une diminution du pH des océans, que l'on appelle acidification.

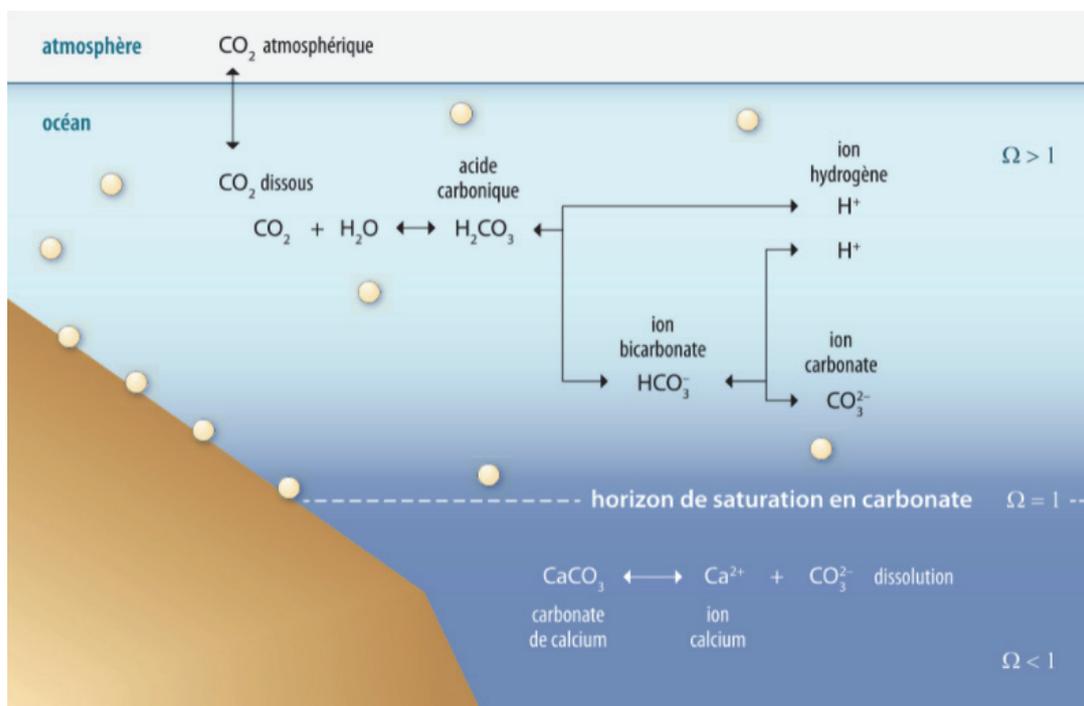


Figure 9 : réactions chimiques de l'acidification des océans (Crédit photo Encyclopædia UniversalisFrance)

Si ce phénomène de capture du CO<sub>2</sub> contribue à modérer le réchauffement climatique, il est en revanche néfaste sur les **écosystèmes marins**, perturbant la fabrication des squelettes et autres structures calcaires, avec des répercussions majeures sur les mollusques et récifs coraliens, qui sont des piliers de ces écosystèmes (18).

Il se mesure en kg de molécule d'H<sup>+</sup> équivalente.

#### 2.2.3.4 Eutrophisation de l'eau

Il s'agit d'un phénomène naturel correspondant à l'augmentation de la production de matière organique. Néanmoins, l'augmentation excessive de la concentration marine en nutriments tels que **l'azote et le phosphore**, liée principalement à la pollution de l'eau par le phosphore des lessives et les engrais azotés, entraîne un déséquilibre du milieu aquatique avec pour conséquence la prolifération de certains végétaux. Ces modifications sont à l'origine d'une perturbation de la dynamique du plancton et de toute la chaîne alimentaire, avec des conséquences là aussi sur les écosystèmes marins, ainsi que l'émergence de nouveaux types d'algues pouvant être nuisibles, voire toxiques (19).

Cet impact se mesure en Phosphates équivalents.

#### 2.2.3.5 Épuisement des ressources non renouvelables

Cet impact évalue la consommation des **ressources naturelles non renouvelables** comprenant une pondération de ces ressources en fonction de leur rareté et de la vitesse de leur exploitation. Plus la ressource est considérée comme rare et exploitée, plus la valeur de l'indicateur augmente et plus le produit contribue à l'épuisement des ressources (à l'exception de la ressource en eau considérée à travers un indicateur dédié).

Il se mesure en kg d'Sb (antimoine) équivalent. L'**antimoine** est un minerai dont la ressource est considérée comme médiane en termes de disponibilité et d'exploitation. Une valeur de 1 lui est attribuée par convention. Une valeur supérieure à 1 pour une ressource indique que l'on consomme une ressource plus rare que l'antimoine.

#### 2.2.3.6 Appauvrissement de la couche d'ozone

Les molécules d'ozone O<sub>3</sub>, formant la **couche d'ozone**, jouent un rôle de filtrage des rayons ultraviolets dangereux (UV-B) pour l'homme, connus pour être cancérogènes. Jusqu'en 1987, année de mise en place du **protocole de Montréal**, les émissions de chlorofluorocarbures (CFC) et hydrochlorofluorocarbures, contenus en grande partie dans les aérosols, réfrigérateurs et climatisations, ont contribué à l'appauvrissement de la couche d'ozone. En effet, ces CFC et apparentés, via l'action des atomes de Chlore, entraînent la destruction des atomes d'O<sub>3</sub> et donc de la couche d'ozone. Le protocole de Montréal a permis une prise de conscience planétaire et l'interdiction de l'usage des principaux produits responsables,

permettant ce qui semble être une diminution de ce « trou ». Néanmoins, les émissions dans l'air d'autres composés non concernés par le protocole et susceptibles de réagir avec les molécules d'ozone présentes dans la stratosphère existent. Le bilan de ces émissions est mesuré en CFC équivalents.

#### 2.2.3.7 *Impacts humains*

Au-delà des répercussions sur la **santé humaine**, à travers les émissions de particules, produits chimiques, perturbateurs endocriniens, qui vont avoir une interaction physiologique directe avec nos cellules, nos activités peuvent avoir beaucoup d'autres conséquences. Nous avons évoqué en introduction les possibilités de difficultés d'accès aux **ressources alimentaires** et en eau potable, les déplacements de populations et **catastrophes climatiques** qui découlent des autres impacts écologiques. Mais il faut également mentionner d'autres effets qu'il est nécessaire de prendre en considération : la pénibilité et la dangerosité du travail, le stress et la pression exercés devant une rentabilité et une productivité toujours plus importantes, ou encore l'**exploitation**, souvent dans des conditions que nous jugerions intolérables, de populations largement sous payées dans des pays en voie de développement, dans le but de réduire les coûts de production et de maximiser les profits des grands industriels.

### 3. Analyse du cycle de vie d'une prothèse totale de genou

#### 3.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude

##### 3.1.1 Objectifs de l'étude

Nous avons voulu nous poser la question de notre **impact écologique au bloc opératoire** en tant que chirurgiens orthopédiques. Ce travail de recherche était ciblé sur une intervention précise, à savoir la réalisation d'une prothèse totale de genou de première intention, dans le cadre d'une gonarthrose primaire, selon le protocole de service du Professeur ARGENSON, au sein du Centre Hospitalo-Universitaire de Sainte-Marguerite à Marseille.

À travers une étude du **cycle de vie de la prothèse totale de genou**, notre objectif principal était de trouver un chiffre **d'équivalent de kg CO<sub>2</sub>**, attendu comme élevé et marquant, rapporté à un trajet en avion entre Paris et Marseille, afin d'éveiller les consciences du personnel au bloc opératoire du retentissement quotidien que nous avons sur notre planète.

Parmi les objectifs secondaires de cette étude, nous souhaitons mettre en lumière les **différents impacts** qu'une telle chirurgie peut avoir, y compris sur notre santé, identifier les étapes qui ont le plus de poids et celles qui sont les plus **accessibles** pour ouvrir des perspectives et pistes d'amélioration pour le futur, à court terme directement dans notre bloc opératoire et à plus long terme en travaillant avec tous les acteurs concernés, pour favoriser le **développement durable** au bloc opératoire et plus généralement à l'hôpital.

##### 3.1.2 Champ de l'étude

La **fonction** d'une prothèse totale de genou est d'être mise en place chirurgicalement chez un patient atteint le plus souvent de gonarthrose, afin de lui permettre de marcher sans douleur et de retrouver une articulation fonctionnelle.

L'**unité fonctionnelle** choisie pour notre ACV était de réaliser la chirurgie d'une seule prothèse totale de genou postéro-stabilisée morphométrique, ayant une durée d'usage de minimum 10 ans.

Les **frontières** de notre analyse incluait :

- les émissions générées par la fabrication et l'approvisionnement des implants prothétiques,
- celles de tous les consommables utilisés lors de la chirurgie ainsi que la gestion de leur fin de vie,
- la production et la stérilisation des ancillaires de pose et des instruments chirurgicaux,
- la consommation électrique pour le fonctionnement du bloc opératoire,
- le déplacement de tous les protagonistes nécessaires depuis leur domicile jusqu'à l'hôpital.

Par choix, car nous pensions que l'influence était peu significative ou que leur participation au cycle de vie avait été identifiée trop tardivement, nous n'avons pas inclus dans notre analyse l'anesthésie et l'antalgie per-opératoire, le nettoyage du bloc opératoire après chaque intervention, le traitement des déchets liquides provenant du rinçage et de l'aspiration per opératoire, le stockage des données concernant le patient sur un serveur informatique sécurisé, l'antalgie post opératoire et le séjour en service d'hospitalisation conventionnelle, le service de blanchisserie pour les draps et les tenues de bloc opératoire ainsi que la construction de l'hôpital.

Toutes les informations nécessaires à notre calcul intégral du cycle de vie de la prothèse dans les frontières de notre étude n'étaient pas forcément disponibles. Certaines données manquantes ont donc été remplacées par des **hypothèses** qui seront détaillées à chaque étape concernée. D'autres, pour lesquelles des hypothèses étaient trop complexes à mettre en place ou source de trop d'erreurs potentielles, ont été **exclus** de notre analyse.

### 3.1.3 Choix méthodologiques

Ce travail préliminaire ayant vocation première à un travail de recherche pour la soutenance d'une thèse de doctorat en médecine, nous avons fait le choix de réaliser seuls l'intégralité de l'étude, depuis le recueil de données, le calcul des impacts et l'interprétation des résultats. Selon la robustesse finale de ce premier travail, nous avons pour ambition l'écriture d'un article afin de publier nos résultats et de les diffuser à une échelle plus vaste que celle de notre service.

### 3.1.4 Bases de données utilisées

#### 3.1.4.1 L'ADEME

**Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie**, ou Agence de la transition écologique dans ses communications, l'ADEME est un établissement public **français**, sous la tutelle du Ministère de la transition écologique et du Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, créé en 1991.

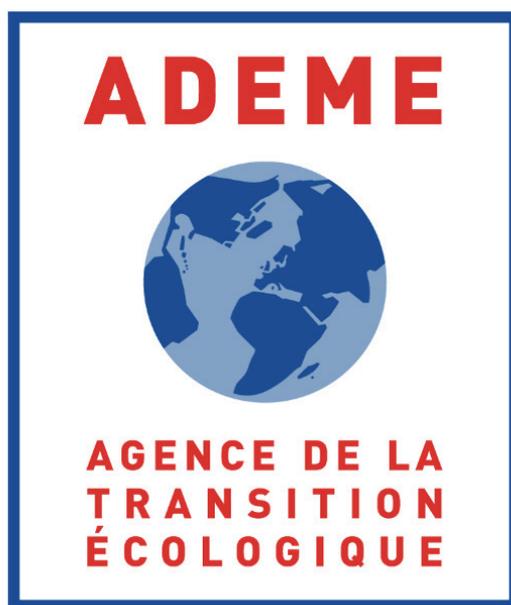


Figure 10 : nouveau logo de l'ADEME

Engagée dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources, elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques, pour mobiliser citoyens, acteurs économiques et territoires afin de progresser vers une société plus économe en ressources, plus sobre en carbone et plus harmonieuse. Elle œuvre dans différents domaines d'interventions tels que l'énergie, l'économie circulaire, l'alimentation, la mobilité, la qualité de l'air ou encore l'adaptation au changement climatique. Elle agit en ce sens au travers de différentes interventions telles que la diffusion de **campagnes de communication**, le financement de programmes de recherche, le **conseil** d'entreprises qui veulent effectuer une transition écologique ou encore l'élaboration **d'outils méthodologiques**.

#### 3.1.4.2 Base IMPACTS et Bilan Produit

L'ADEME, pour faciliter et encourager les entreprises à effectuer leur transition écologique, a mis au point une base de données nécessaire au calcul de l'empreinte environnementale des produits de grande consommation qui sont vendus en France : la **Base IMPACTS**. En association, elle met à disposition l'outil de calcul Bilan Produit, qui est un outil d'aide à l'éco-conception utilisant les données de la base.

Celles-ci ne sont pas exhaustives et plutôt centrées sur des problématiques liées au mobilier, à l'habillement ou encore à l'alimentation et elles ne nous ont donc pas permis de réaliser tous nos calculs.

#### 3.1.4.3 Ecoinvent et EcoDesign Studio

D'origine européenne, la base de données **Ecoinvent** est la plus complète disponible. Elle est intégrée à la plupart des logiciels ayant pour vocation la réalisation d'ACV.

La société Altermaker, qui crée des logiciels, a mis au point le logiciel **EcoDesign Studio**. Il s'agit d'un logiciel d'éco-conception puissant, accessible directement depuis internet, utilisant notamment les bases de données Ecoinvent, Base IMPACT et FDE01-008. Sa conception plus **ergonomique** que la plupart des autres logiciels rend son utilisation aisée et rapide à comprendre. Tout comme l'utilisation de la base Ecoinvent, la licence d'utilisation a un coût non négligeable (en centaines d'euros). Heureusement, pour des travaux de formation et de recherche universitaire, ses créateurs permettent la mise à disposition gratuite et illimitée du logiciel pour une durée d'une semaine.

Nous avons donc, après étude des différents matériaux et procédés disponibles dans la base de données Ecoinvent, réalisé nos calculs lors de cette semaine d'utilisation gratuite.

#### 3.1.4.4 Impacts par transport

Pour le calcul des impacts par **transport**, sont inclus dans les bases de données :

- les répercussions de la fabrication du mode de transport,
- l'énergie qui sert à le faire fonctionner.

Cependant, pour le transport d'une marchandise, on ne peut calculer les impacts en prenant simplement en compte les flux de fabrication et l'énergie nécessaires pour effectuer le trajet.

Cela reviendrait à penser que le cargo ou poids-lourd transportent seulement le produit étudié. Le logiciel réalise donc les calculs en prenant en compte le **poids du produit transporté**, afin de pondérer les résultats par rapport au poids total théorique de la marchandise, quantifiée en tonnes, qui peut être transportée lors de ce même trajet.

#### 3.1.4.5 Estimation des distances

Lors de l'analyse du cycle de vie, les flux concernant les transports de matières premières puis des produits finis, doivent être entrés dans les logiciels sous forme de **distance parcourue** en kilomètres, associée au type de fret utilisé : voie ferroviaire, cargo maritime ou aérien, transport routier.

Pour cela, après avoir identifié les différents lieux, quand les données étaient disponibles, d'extraction des matières premières, de production, d'utilisation et de traitement des déchets, nous avons réalisé le calcul de chaque distance parcourue.

Concernant le transport terrestre, le transport routier étant largement majoritaire, parmi les différents modes disponibles, dans les pays concernés par nos données, c'est celui qui a été inclus dans nos calculs. Nos données kilométriques ont été estimées à l'aide de l'application **Google Map**.

Le transport long courrier de marchandises peut se faire par cargo maritime ou par avion-cargo. Le transport maritime, largement majoritaire en termes de tonnes transportées chaque année, a été choisi pour réaliser nos calculs. Les ports de départ et d'arrivée ont été sélectionnés en choisissant le plus gros **port marchand** de chaque pays concerné. Les estimations de distance, données en milles marins puis converties en kilomètres (1 mille marin représentant environ 1,8 km) ont été calculées et communiquées par un **officier de la marine marchande**, travaillant sur des navires poseurs de câbles sous-marins.

## 3.2 Inventaire et recueil des données

### 3.2.1 Inventaire

En accord avec le concept standardisé d'ACV, d'après les normes ISO 14 040 et suivant les conseils donnés après une première prise de contact avec une des référentes en Eco conception de l'agence régionale de l'ADEME basée à Marseille, nous avons dans un premier temps réalisé l'**inventaire** de tous les flux entrants directs et indirects permettant la réalisation chirurgicale d'une prothèse totale de genou. La figure 11 répertorie tous les produits, procédés ou moyens humains nécessaires à la réalisation in fine de l'intervention chirurgicale ainsi que les différents flux associés à chacun d'entre eux. Cette base nous a permis de guider ensuite notre recueil de données.

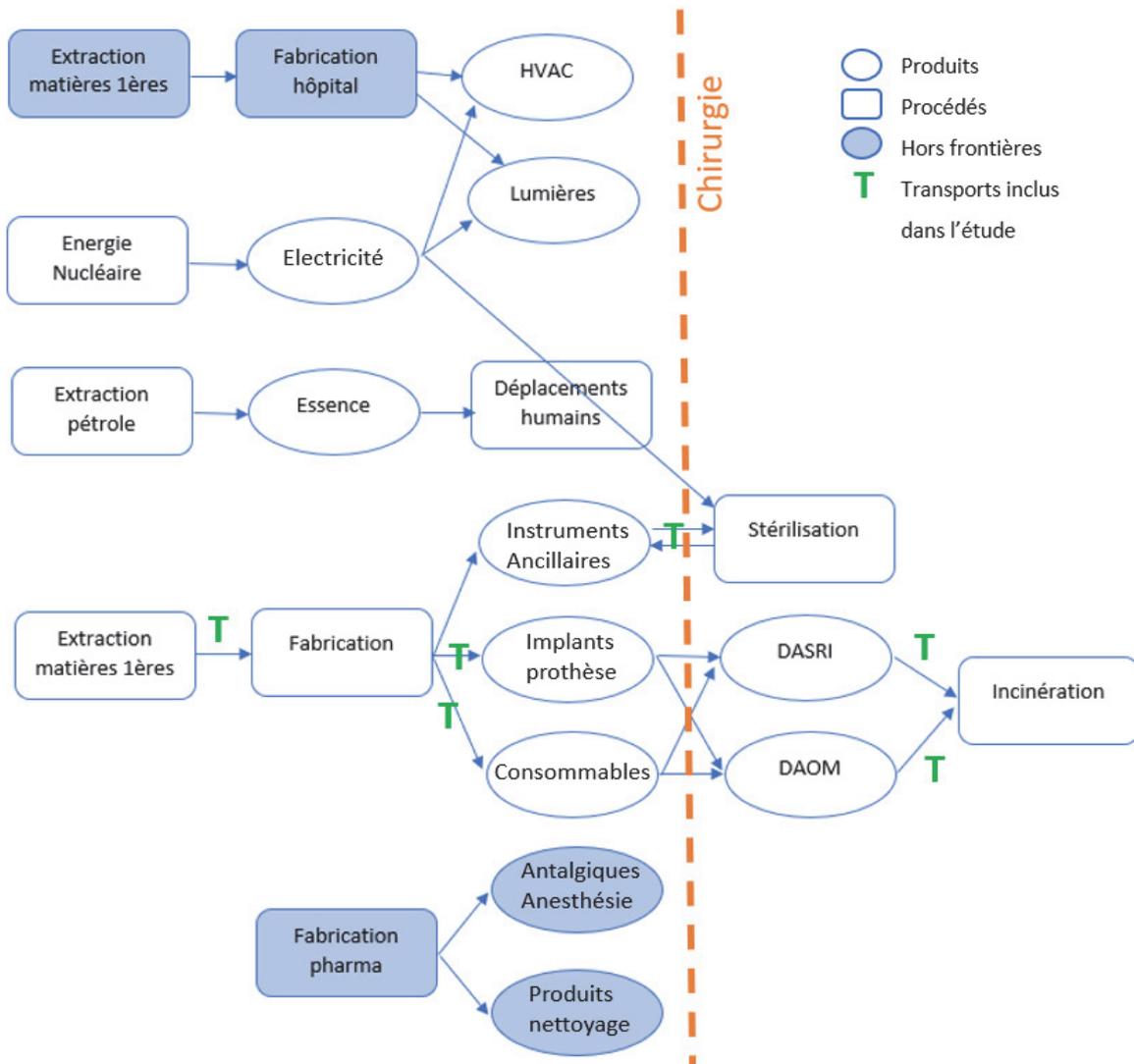


Figure 11 : schéma représentant les flux et les frontières de notre ACV. (HVAC = filtration, ventilation et climatisation du bloc)

### 3.2.2 Audit

Un **audit** de toutes les prothèses totales de genou de première intention réalisées dans notre bloc opératoire de chirurgie orthopédique de l'hôpital Sainte Marguerite, quel que soit le chirurgien sénior, a été réalisé sur la période du 12 au 21 octobre 2020, soit un total de **17 PTG**. Les données concernant le type d'implant mis en place, le nombre d'unités nécessaires de chaque produit consommable, le nombre de personnes présentes dans la salle d'opération et celles habillées de manière stérile participant à la chirurgie, la durée d'intervention et le temps d'occupation de la salle d'opération, le type et la quantité de déchets produits, ont été recueillies avec réalisation de **moyennes** pour obtenir notre inventaire de référence. Ont également été enregistrés le type d'anesthésie et les antalgiques per opératoires utilisés, bien que ces données n'aient par la suite pas été incluses dans notre étude. Les données étant totalement indépendantes de l'identité des patients, nous n'avons pas eu recours à l'autorisation d'un comité d'éthique pour leur exploitation.

### 3.3 Les implants prothétiques

Pour rappel, nous avons ciblé notre analyse sur la prothèse totale de genou postéro-stabilisée avec implants morphométriques qui est utilisée par l'ensemble des chirurgiens de notre service. Pour faciliter notre recueil et nos calculs, nous nous sommes basés sur la **taille médiane** des implants disponibles, à savoir la taille 6 standard pour l'implant fémoral, la taille E pour le tibia, un polyéthylène de 10 mm (épaisseur standard) et une rotule de 32 mm de diamètre.

À la suite de notre audit, nous avons constaté que la plupart des patients avaient bénéficié du rajout d'une **tige d'extension** de 14 x 30 mm sur le composant tibial, permettant d'augmenter la résistance aux contraintes exercées sur l'embase tibiale. Nous l'avons donc incluse dans notre analyse.

### 3.3.1 Lieu de fabrication de la prothèse

Après approvisionnement en alliage des différents métaux, en plastique pour les composants polyéthylène et les emballages, la fabrication de l'ensemble des implants de la prothèse est réalisée dans l'usine américaine du fabricant, située à **Warsaw dans l'état de l'Indiana**.

### 3.3.2 L'implant fémoral

#### 3.3.2.1 Description et composition

L'implant prothétique fémoral remplace la partie distale du fémur. Il est réalisé dans un **alliage de CoCrMo** (Chrome 27-30 %, Cobalt 58-63 % et Molybdène 5-7 %) respectant la norme ISO 5832-4 ou ASTM F75.

Composition (% max)	
Aluminium	0,3
Boron	0,01
Chromium	27,0-30,0
Carbon	0,35
Cobalt	balance
Hydrogen	0,009
Iron	0,75
Manganese	1,0
Molybdenum	5,0-7,0
Nickel	1,00
Nitrogen	0,25
Oxygen	0,2
Phosphorous	0,02
Silicon	1,0
Sulfur	0,01
Tungsten	0,2

Figure 12 : composition de l'alliage CoCrMo normé ASTM F75

Le poids total de l'implant est de **251.7 grammes**, soit environ 70.3 grammes de Chrome, 150.6 grammes de Cobalt et 15 grammes de Molybdène. Les autres métaux associés à l'alliage ont été considérés comme ayant un impact négligeable compte tenu de leur faible quantité et n'ont pas été pris en compte.

Les flux associés aux différentes matières premières sont référencés dans la base de données Ecoinvent :

- « *chromium production* » ;
- « *cobalt production* » ;
- « *molybdenum production* ».

### 3.3.2.2 Procédés de fabrication

Après extraction des différentes matières premières puis un premier processus de transformation, la réalisation de l'alliage se fait par des procédés de mélanges des poudres de minerais et de fusion à très haute température.

D'après les informations que nous avons pu avoir d'un autre fabricant de prothèses totales de genou, dont la fonderie est réalisée en France, les **coulées brutes d'alliage** de CoCrMo sont majoritairement réalisées aux **États-Unis**.

L'alliage ainsi produit est vendu en barres ou lingots aux spécialistes en fonderie qui vont réaliser la fabrication de l'implant prothétique.

Les différents fabricants de PTG n'ont pas souhaité, pour des raisons de clauses de confidentialité, nous communiquer le détail des **procédés de fabrication** utilisés pour réaliser le moulage et le revêtement des implants. Néanmoins, en couplant les informations que nous avons eu de leur part avec les données disponibles sur les sites internet des fabricants des grands groupes mondiaux, nous avons pu dégager les procédés généraux de fabrication d'un implant métallique : d'abord un **moulage** des pièces par fonderie, puis des procédés de **traitement de surface**, parfois un **polissage** et enfin un **usinage** (fraisage, perçage etc.).

Certains de ces procédés étaient disponibles dans la base de données Ecoinvent, parfois très généraux ou seulement pour un autre type de métal que ceux utilisés dans l'alliage de l'implant fémoral. Nous avons pris pour hypothèse que les flux entrants et sortants étaient **similaires** pour le travail de différents métaux et nous nous sommes donc basés sur les procédés disponibles de la base de données, afin d'avoir tout de même une estimation des impacts potentiels de la phase de fabrication :

- « *metal working, average for chromium steel product manufacturing* » ;
- « *molybdenite (copper mine operation and beneficiation, sulfide ore)* » ;
- « *energy and auxilliary inputs, metal working factory, with heating from natural gaz* », le gaz naturel étant la principale source d'énergie (35 %) aux États-Unis ;
- « *casting, steel, lost-wax* » pour la phase de fonderie dans des moules ;
- « *chromium steel removed by milling, average* » pour prendre en compte des procédés d'usinage.

### 3.3.2.3 *Origine géographique des matières premières*

Devant l'impossibilité, étant donné le refus des spécialistes mondiaux de fonderie de nous communiquer les données, de connaître de manière précise le lieu d'extraction des principaux composés de l'alliage CoCrMo, nous avons recherché dans la littérature les plus gros pays producteurs pour chacun d'eux.

Nous avons basé nos informations et calculs sur un document publié par **France Stratégie** en octobre 2020, qui recense les lieux d'extraction et de raffinage des principaux métaux utilisés par l'industrie, associés aux émissions de CO<sub>2</sub> en tonne de CO<sub>2</sub> par tonne de métal (20).

Ainsi, la production de Chrome est partagée entre trois pays principaux : l'**Afrique du Sud**, la **Turquie** et le **Kazakhstan**, avec respectivement 46 %, 18 % et 13 % de la production mondiale. Une tonne de Chrome produite représente 5 tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub>.

En ce qui concerne le Cobalt, environ 64 % de la production mondiale est réalisée en **République démocratique du Congo**. Nous avons donc basé nos calculs sur du Cobalt provenant uniquement de ce pays. Une tonne produite équivaut à 3 tonnes de CO<sub>2</sub>.

Enfin, le Molybdène est produit en majorité dans trois pays : la **Chine**, le **Chili** et les **États-Unis**, avec 43 %, 20 % et 14 % de la production mondiale. Une tonne produite correspond à 11 tonnes de CO<sub>2</sub> émis.

### 3.3.2.4 *Approvisionnement en matières premières*

Nous sommes partis de l'hypothèse que le transport se faisait par cargos maritimes depuis les différents pays d'extraction jusqu'au port marchand de New York puis par camion de New-York jusqu'à Warsaw.

Pour le transport maritime, les données utilisées étaient les suivantes :

- Durban (Afrique du Sud) vers NY : 8 200 milles marins ;
- Izmir vers NY via le détroit de Gibraltar : 5 700 milles marins ;
- Pointe Noire (République du Congo) vers NY : 5 700 milles marins. Les deux principaux ports de la République démocratique du Congo, situés à Matadi, se trouvent le long du fleuve Congo et possèdent donc une profondeur limitée. Ainsi, la majeure partie des marchandises est

exportée jusqu'au port de Pointe Noire en République du Congo, permettant le transbordement de plus grands navires pour l'export mondial

- Shangai (Chine) vers NY : 11 500 milles marins ;
- Chili vers NY via détroit du Panama : 5 000 milles marins.

Pour prendre en compte la possibilité d'approvisionnement depuis les différents pays, nous avons réalisé, pour chaque matière première, une **moyenne** de la distance parcourue, **pondérée** par le pourcentage respectif de la production mondiale pour chaque pays.

Ainsi, la donnée approvisionnement par cargo a été incluse dans le logiciel avec les chiffres suivants :

- pour le Chrome : 7 227 milles marins, soit 13 008 km ;
- pour le Cobalt : originaire du Congo, 5 700 milles marins, soit 10 260 km ;
- pour le Molybdène : 7 812 milles marins, soit 14 061 km.

Pour le transport par camion, la distance calculée entre la ville de New York et celle de Warsaw est de 691 miles, soit 1 105 km.

### 3.3.3 L'implant tibial et la tige d'extension

#### 3.3.3.1 Description et composition

L'implant tibial remplace la partie proximale du tibia. Il se compose d'une surface plane et d'une petite quille. La tige d'extension, impactée et scellée sous l'implant tibial, permet de mieux répartir les contraintes exercées en distalité sur celui-ci et ainsi réduire le risque de descellement de la prothèse à moyen et long terme.

Ils sont tous les deux réalisés dans un **alliage de Titane Ti-6Al-4V** (Titane 88.5-90.5 %, Aluminium 5.5-6.5 % et Vanadium 3.5-4.5 %), respectant la norme ASTM F136.

Composition (% max)	
Aluminium	5,5-6,5
Carbon	0,08
Hydrogen	0,012
Iron	0,25
Nitrogen	0,05
Oxygen	0,13
Titanium	balance
Vanadium	3,5-4,5

Figure 13 : composition de l'alliage de titane normé ASTM F136

Le poids total est de 60.5 grammes pour l'implant tibial et 24.2 grammes pour la tige d'extension. Pour une simplification de notre calcul, nous avons considéré qu'ils étaient uniquement composés de Titane.

Les flux concernant le titane sont référencés dans la base de données sous la dénomination : « *titanium production, primary* ».

### 3.3.3.2 Procédés de fabrication

Pour la production industrielle, le titane est extrait de deux minerais dont la teneur est riche, l'**ilménite** et le **rutile**. Après une chloration à environ 1000°C, le tétrachlorure obtenu  $TiCl_4$  est réduit par du magnésium à une température de 800°C. On obtient ainsi du titane sous forme poreuse, ensuite consolidé en lingots ou directement moulé par fusion en four à arc sous vide. Le raisonnement concernant les **procédés de fabrication** réellement utilisés et ceux disponibles dans la base de données est le même que pour l'implant fémoral. Ici, nous avons inclus les procédés suivants :

- « *rutile, 95 % titanium dioxide* » ;
- « *energy and auxilliary inputs, metal working factory, with heating from natural gaz* » ;
- « *casting, steel, lost-wax* ».

### 3.3.3.3 Origine géographique des matières premières

En se basant sur les données du document de France Stratégie, il apparaît que les trois principaux pays producteurs de Titane sont l'**Australie**, l'**Afrique du Sud** et la **Chine**, se partageant respectivement 16 %, 16 % et 13 % de la production mondiale.

### 3.3.3.4 Approvisionnement en matières premières

La réflexion est la même que celle détaillée dans le sous chapitre concernant l'implant fémoral, avec un transport par cargo de :

- Durban (Afrique du Sud) vers NY : 8 200 milles marins ;
- Melbourne (Australie) vers NY : 10 450 milles marins ;
- Shangäi (Chine) vers NY : 11 500 milles marins.

La moyenne de la distance parcourue, pondérée par les pourcentages de la production mondiale, a été incluse, soit 9 953 milles marins ou **17 915 km** par navire porte-conteneurs, à laquelle nous avons ajouté les 1 105 km pour rejoindre Warsaw en camion.

### 3.3.4 L'insert en polyéthylène et le bouton rotulien

#### 3.3.4.1 Description et composition

L'insert en polyéthylène, comme son nom l'indique, ainsi que le bouton rotulien utilisé pour le resurfaçage de la rotule, sont constitués de **polyéthylène de poids moléculaire ultra élevé** ou PEHD, normé ASTM F648. Le poids de ces deux implants est respectivement de 11.3 et 7.6 grammes.

Les flux intrinsèques à la production de PEHD sont disponibles dans la base de données sous l'intitulé :

« polyethylene production, high density, granulate ».

#### 3.3.4.2 Procédés de fabrication

Les plastiques, dont le polyéthylène, sont essentiellement fabriqués à partir de la **raffinerie du pétrole**, au cours de laquelle on extrait le **naptha**. Puis celui-ci passe par des phases dites de craquage puis de polymérisation pour donner les différentes sortes de plastiques que l'on utilise, souvent sous forme de granulés, de liquides ou de poudres.

Les flux nécessaires et générés par ces procédés sont inclus dans la donnée de la matière première citée ci-dessus.

En revanche, pour lui donner sa forme définitive, notre PEHD va passer par des procédés de mise en forme par **extrusion et thermoformage**, que l'on trouve dans la base de données sous l'intitulé :

« *extrusion of plastic sheets and thermoforming* ».

#### 3.3.4.3 Origine géographique des matières premières

La **Chine** est le pays le plus gros producteur de plastiques, avec plus de 30 % de la production mondiale, suivie de près par les **États-Unis** (21). Nous n'avons pas pu savoir de manière précise où s'approvisionne le fabricant.

#### 3.3.4.4 Approvisionnement

Nous avons considéré que la probabilité d'approvisionnement était égale pour les États-Unis et la Chine. En effet, faire venir les matières premières directement des États-Unis est

largement **plus facile** puisqu'un simple transport interne par camion ou train suffit. Néanmoins, nous avons supposé que le plastique provenant de Chine était **moins cher** et donc que le fabricant était susceptible de s'approvisionner en plastique chinois.

Nous avons donc réalisé une moyenne entre les 11 500 miles qui séparent les ports de Shanghai et de NY, et le transport nul par cargo si l'approvisionnement se fait directement aux États-Unis, soit au final 10 350 km estimés.

Nous avons ajouté un transport par camion pour rejoindre l'usine de production, que nous avons estimé à 691 miles pour les deux options, soit à nouveau 1 105 km.

### 3.3.5 Emballages

#### 3.3.5.1 Description et pesée

Tous les implants sont emballés selon le **même schéma**. Ils sont protégés par différentes couches, avec un premier feuillet en plastique souple, une boîte en carton blanc contenant l'implant et une notice en papier glacé, deux emballages de plastique plus rigide et enfin un dernier film de plastique souple au contact de chaque implant.

Nous **pesé** les différents composants de l'emballage pour chacun des implants. Les mesures ont été réalisées sur des balances avec une précision au millième de gramme près. Les données sont rapportées dans le tableau ci-dessous.

Poids emballages de la prothèse (g)							
Partie	Matériaux	Implant fémoral	Implant tibial	Tige extension	PE	Rotule	Total
Total		227,45	209,7	141,5	149,6	118,4	<b>846,65</b>
carton	carton	89,3	82,6	48,5	50,6	33,5	<b>304,5</b>
film plastique 1	?	3,25	2,4	1,3	1,2	1,6	<b>9,75</b>
feuillet 1	PEHD	2,5	1,9	1,8	1,6	0,9	<b>8,7</b>
boîte plastique 1	polypropylène	35,5	26,8	27,5	22,5	11,5	<b>123,8</b>
feuillet 2	PEHD	1,8	1,4	1,3	1,7	1,1	<b>7,3</b>
boîte plastique 2	polypropylène	39,5	28,1	38,5	13,3	10	<b>129,4</b>
film plastique 2	?	3,4	1,7	1,1	0	0	<b>6,2</b>
mousse	polystyrène	5,3	4,3	0	0	0	<b>9,6</b>
notice	papier	46,9	60,5	21,5	58,7	59,8	<b>247,4</b>

Tableau 1 : poids et matières des emballages des implants prothétiques

### 3.3.5.2 Matières premières

Comme visualisé dans le tableau, nous avons caractérisé les plastiques utilisés puis réalisé la somme du poids des emballages similaires d'un implant à l'autre.

La norme veut que le type de plastique soit indiqué par un **sigle** directement sur l'emballage concerné. Celui-ci était présent sur les emballages rigides mais pas sur les films plastiques souples. Il nous était donc difficile de savoir si ces derniers étaient réalisés en polyéthylène haute densité, basse densité ou en polypropylène.

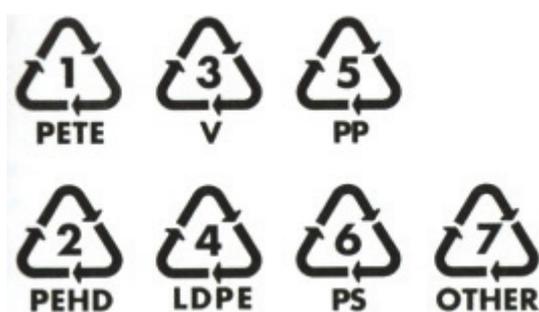


Figure 14 : sigles d'identification des plastiques les plus communs

En nous référant à la base de données de Base IMPACT, il apparaissait que les différences d'impacts sont très minces entre ces différents types de plastiques, puisque les matières premières (pétrole raffiné) et les procédés de fabrication sont plutôt proches.

Pour nos calculs, nous nous sommes donc affranchis de connaître la composition précise des plastiques souples et nous les avons inclus dans les flux associés au **polypropylène**.

Ainsi, nous avons entré dans le logiciel :

- 304.5 g de « *white lined chipboard carton production* » ;
- 247.4 g de « *paper, newsprint (paper production)* » ;
- 269.15 g de « *polypropylene, granulate* » ;
- 16 g de « *polyethylene, high density, granulate* » ;
- 9.6 g de « *polystyrene, general purpose* ».

### 3.3.5.3 Procédés de fabrication

Concernant les **procédés de fabrication** des emballages, nous avons inclus dans le logiciel d'ACV :

- « *operation, printer, laser, black/white* » pour l'impression des notices ;
- « *operation, printer, laser, colour* » pour l'impression en couleur des boîtes en carton ;
- « *extrusion of plastic sheets and thermoforming* » pour la mise en forme de l'ensemble des boîtes en plastique ;
- « *extrusion plastic film* » pour les feuillets et films plastiques souples.

### 3.3.6 Transport du produit fini et distribution

#### 3.3.6.1 Du lieu de fabrication au site de distribution européen

Comme précisé précédemment, l'usine de fabrication de la prothèse se situe à Warsaw dans l'Indiana. Le fabricant dispose de plusieurs **entrepôts de stockage** européens. Celui qui redistribue les implants jusqu'en France se trouve, lui, à **Hazeldonk**, aux Pays-Bas.

Nous avons donc découpé le trajet, effectué par tous les implants, emballage compris, en trois parties :

- un transport en poids-lourd de Warsaw jusqu'au port de New York, soit 1 105 km ;
- un transport maritime par cargo de New York au port de Rotterdam (plus grand port marchand d'Europe et situé aux Pays-Bas), soit 6 932 km ;
- un transport en poids-lourd de Rotterdam jusqu'à Hazeldonk, soit 61 km.

#### 3.3.6.2 Du site de distribution jusqu'à Marseille

Concernant la distribution de la prothèse depuis l'entrepôt de stockage jusqu'à Marseille, nous avons supposé que le transport se faisait par poids-lourd, soit une distance de 1120 km depuis Hazeldonk.

### 3.4 Instruments chirurgicaux et ancillaires de pose

#### 3.4.1 Matériel nécessaire à la chirurgie

Pour la réalisation de la chirurgie, il est nécessaire d'utiliser différents instruments chirurgicaux (porte lame, ciseaux, écarteurs, porte-aiguilles etc.) réunis dans un même conteneur, appelé « **boîte genou** ».

Est également utilisé ce que l'on appelle l'**ancillaire de pose**, qui réunit les différents guides de coupe osseuse, les instruments de mesure et tout ce qui est spécifique et indispensable pour la réalisation **standardisée** de la prothèse totale de genou. Cet ancillaire est réparti dans cinq conteneurs différents, qui sont tous ouverts à chaque intervention, même si tout le matériel de chaque conteneur n'est pas utilisé à chaque fois. En effet, les différents conteneurs rassemblent le matériel et les guides qui permettront la réalisation de la prothèse, quelle que soit la taille du fémur et du tibia du patient. Par exemple, on y trouve les guides de coupe fémorale pour toutes les tailles de fémur que l'on va mesurer en per-opératoire, et seul celui correspondant sera utilisé.

Malgré tout, l'intégralité du matériel a déjà été stérilisé et sera donc à stériliser à nouveau à la fin de l'intervention.



Figure 15 : exemple d'ancillaire de PTG

Enfin, la réalisation des coupes osseuses, après le positionnement des guides, se fait à l'aide d'une **scie moteur**, le plus souvent à batterie lithium rechargeable, rangée dans son propre conteneur et également stérilisée après l'intervention.

### 3.4.2 Composition

Les instruments chirurgicaux sont fabriqués en **acier inoxydable 316** (ou Inox), alliage de fer, de carbone et de chrome, contenant 2 à 3 % de molybdène (X5CrNiMo18) ce qui le rend particulièrement résistant à la corrosion, notamment avec l'utilisation des solvants industriels. Nous sommes partis du principe que l'ensemble des instruments et outils de l'ancillaire était en Inox 316.

Ils sont rangés dans des conteneurs qui sont pour leur part fabriqués en **Aluminium**, métal moins résistant mais permettant de réduire le poids global car nettement plus léger que l'Inox (2.7 g/cm<sup>3</sup> contre 8.0 g/cm<sup>3</sup>).

Après pesée de l'ensemble des conteneurs et du matériel, nous avons trouvé les données suivantes en kilogrammes :

- 37.3 kg d'Acier inoxydable ;
- 21 kg d'Aluminium (7 boîtes).

#### 3.4.2.1 Données database

Les données concernant les émissions associées à la production d'acier inoxydable 316 ne sont pas disponibles dans la base Ecoinvent ou Base IMPACTS. En revanche, on y trouve l'acier inoxydable **type 18/8**. Leur composition est similaire, mais c'est notamment la présence de Molybdène qui les différencie.

Nous nous sommes affranchis de cette différence en supposant que les chiffres n'étaient pas significativement différents entre les deux types d'acier inoxydable.

En ce qui concerne l'Aluminium, les données concernant sa fabrication sont quant à elles répertoriées dans les deux bases de données et nous avons pu les utiliser directement dans le logiciel pour nos calculs.

Enfin, nous avons émis l'hypothèse que la mise en forme de l'ensemble du matériel et des conteneurs était réalisée par un procédé de **forge** des métaux concernés.

Ainsi, le calcul par le logiciel a été codé par les trois entrées suivantes :

- « *aluminium alloy* » pour la production de l'Aluminium ;
- « *chromium steel 18/8* » pour la production d'Inox 316 ;
- « *forging, steel, large open-die* » pour les procédés de transformation.

Le moteur et sa batterie n'ont pas été inclus dans nos calculs.

### 3.4.3 Poids carbone total et pour une unité fonctionnelle

L'ensemble des données répertoriées ci-dessus permettent d'estimer les répercussions de la fabrication de l'ensemble du matériel chirurgical. Ce dernier n'est pas à usage unique et est réutilisé un grand nombre de fois. D'après nos recherches dans la littérature, le même instrument peut être utilisé entre 300 et 3000 fois.

Pour notre unité fonctionnelle, c'est-à-dire la réalisation d'une seule chirurgie, l'ensemble des instruments et ancillaires n'est utilisé qu'une fois. Pour notre calcul, il faut donc rapporter les flux et impacts de leur production à ceux **d'une seule utilisation**, en divisant simplement les résultats trouvés par le nombre d'utilisation.

Nous avons supposé que chaque instrument va servir environ 1000 fois, et que les conteneurs seraient renouvelés au bout de 800 utilisations, ceux-ci étant plus fragiles et soumis à des chocs. Nous avons donc divisé toutes nos données par 800 ou 1000 avant de les entrer dans le logiciel d'ACV.

### 3.4.4 Transport et stérilisation

La réutilisation de ces instruments et ancillaires nécessite la réalisation d'un processus de **stérilisation** entre chaque utilisation.

#### 3.4.4.1 Stérilisation

Le processus de nettoyage et de stérilisation débute en sortie de salle de chirurgie. Le matériel est mis à tremper dans un bain détergent pour une durée de 15 minutes, puis est frotté et nettoyé pour éliminer les résidus de sang ou autres.

Les conteneurs ainsi que le matériel sont ensuite transférés sur le lieu de stérilisation, qui ne se fait pas sur site mais est **délocalisé**.

À l'arrivée, le matériel chirurgical, les ancillaires ainsi que les conteneurs vont subir un premier temps de **lavage, désinfection et séchage**. Différentes machines sont dédiées à chaque unité. Le matériel chirurgical à proprement parler est traité par laveur ou par tunnel. Ces machines procèdent toutes les deux au lavage, à la désinfection thermique puis au séchage. Le processus global dure environ 70 minutes.

Le service de stérilisation de l'APHM est équipé des machines **WD 290 (laveur)** et WD 390 (tunnel) de la marque BELIMED. Le Laveur WD290 ayant une capacité de 350 L, il faut compter deux cycles pour le lavage de l'ensemble du matériel nécessaire à une chirurgie. La puissance rapportée par le fabricant est de **100 kW**.

En parallèle, les conteneurs en aluminium sont traités dans une autre machine, la **cabine de lavage conteneurs** WD750 M. D'une plus grande capacité, un seul cycle avec une utilisation de la moitié de la capacité totale est nécessaire pour traiter l'ensemble des conteneurs. La puissance rapportée par le fabricant est de **120 kW**.

Enfin, le matériel est trié et reconditionné dans les paniers et conteneurs correspondants, avec mise en place des filtres et des couvercles de boîte, puis passé à l'**autoclave** pour la stérilisation finale. Les autoclaves, soumis à la norme européenne NF EN 285, vont effectuer cette étape grâce à l'action stérilisante de la **vapeur d'eau**. Ce procédé dure environ 90 minutes, durant lesquelles une température maximale de plateau de 134°C va être atteinte et maintenue pendant 18 minutes.

Le site de l'APHM est équipé des autoclaves STERI 6-6 18 VS2 de la même marque BELIMED. D'une capacité de chargement de 648 L, un seul cycle est nécessaire pour la stérilisation de l'ensemble du matériel chirurgical et de l'ancillaire de pose. Le fabricant rapporte une puissance totale de **65 kW**.

Pour le calcul, nous avons utilisé la consommation électrique globale pour l'ensemble des étapes de nettoyage et de stérilisation, exprimée en kWh, dans le procédé : « *electricity production, nuclear, pressure water reactor, FR* ». Dans la base de données, l'impact de la production d'énergie pour chaque pays est pondéré par les sources de production utilisées par ce pays, permettant une estimation plus précise.

#### 3.4.4.2 Transport

La stérilisation du matériel chirurgical de l'APHM est centralisée en un seul site pour les hôpitaux universitaires Nord et Sud. Il est situé 70 chemin du Ruisseau Mirabeau dans le 15<sup>ème</sup> arrondissement de Marseille. Le matériel fait l'aller-retour jusqu'au site en camion, soit un total de 34 km pour effectuer ce trajet.

### 3.5 Consommables à usage unique

Toutes les **quantités nécessaires** de matériel à usage unique ont été calculées à la suite de notre audit, avec réalisation de moyennes sur les 17 interventions auditées, répertoriées dans le tableau 2.

Produit	Quantité	Produit	Quantité
Brosse chirurgicale	5	Casaque	5
Calot/cagoule	10	Lame froide	2
Masque	10	Aspiration + canule	1
Set paroi	2	Bistouri électrique	1
Bétadine dermique	1	Bande collante	3
Bétadine scrub	1	Petites compresses x10	1
Eau stérile (Flacon 1L)	1	Compresses intestinales	1
Gants stériles (paire)	26	x2	1
Cache périnée	1	Poignée de scialitique	2
Plaque BE	1	Ciment	2
Grandes compresses x 10	4	Cupule 500 mL	1
Jersey	1	Seringue gavage	1
Champ d'approche	1	Boîte aiguille	1
Champ en U	1	Nettoyage haute pression	1
Champ d'extrémité	1	Redon (alène + bocal)	1
Ioban	1	Fil	2
Champs de table	4	Agrafeuse	1
		Pansement	1

Tableau 2 : quantités de consommables nécessaires pour une unité fonctionnelle

#### 3.5.1 Équipement du personnel et détertion manuelle

D'après nos données, 8 personnes sont **présentes** dans la salle de bloc opératoire lors de l'intervention et 2 personnes sont nécessaires pour le nettoyage de la salle en post opératoire. Sur ces 10 personnes, 5 participent directement à la chirurgie, après une détertion mécanique et chimique des mains, puis un **habillage stérile** avec mise en place d'une casaque et d'une double paire de gants.

### 3.5.2 Données nécessaires au calcul des impacts

Après plusieurs mois à prospecter, par mail et par téléphone, auprès des différents fabricants ou revendeurs des consommables utilisés par notre hôpital, il nous est vite apparu que la plupart des données, notamment concernant le lieu de fabrication et parfois la composition même des produits, seraient difficiles, voire impossibles à obtenir.

Nous étions face à un tableau avec beaucoup de **données manquantes**. Ce tableau est disponible en Annexe 1.

#### 3.5.2.1 Matières premières

Lors de la pesée de tous les composants des consommables et de leurs emballages, nous avons constaté que la plupart, hormis certains composants dont nous connaissions la composition, étaient fabriqués en **plastiques et dérivés**.

Pour simplifier notre estimation, et dans le prolongement de la réflexion concernant les résultats similaires entre les différents types de plastiques, nous avons attribué la donnée « *polypropylene, granulate* » à tous les consommables et emballages connus pour être ou supposés être en plastique.

Pour les quelques autres, dont la **composition** était **connue**, les matières premières suivantes ont été utilisées dans la base de données :

- « *latex production* » pour les gants stériles sans leur emballage ;
- « *yarn production, cotton* » pour les compresses intestinales, grandes et petites compresses sans leur emballage ;
- « *chromium steel 18/8* » pour l'alène du redon ;
- « *steel, unalloyed* » pour l'acier carboné des lames de bistouri.

#### 3.5.2.2 Procédés de fabrication

Pour l'ensemble des consommables assimilés aux plastiques, à nouveau par manque de données et par souci de simplification, nous avons attribué le procédé « *extrusion of plastic sheets and thermoforming* ».

Le procédé « *finishing, textile, woven cotton* » a été utilisé pour la fabrication des différentes compresses en coton.

Les autres procédés n'étaient pas disponibles dans les bases de données utilisées.

### 3.5.2.3 Transports

Dans le calcul des **transports** pour l'approvisionnement des matières premières et la distribution des produits finis, d'après les données que nous avons réussi à collecter, nous sommes partis des **hypothèses** suivantes :

- 50 % des consommables sont fabriqués en Chine, 20 % en Amérique du Sud et les 30 % restants en Europe ;
- l'intégralité des matières premières, notamment les plastiques qui représentent la majeure partie des consommables, viennent de Chine ;
- donc 80 % des consommables effectuent, sous forme soit de matière première, soit de produit fini, un trajet depuis la Chine vers la France et 20 % des consommables réalisent un trajet de la Chine vers l'Amérique du Sud puis vers la France.

## 3.6 Consommation électrique du bloc opératoire

### 3.6.1 Temps moyen d'occupation du bloc

Lors de notre audit, pour chaque patient, nous avons enregistré les heures d'arrivée au bloc opératoire, d'entrée et de sortie de salle d'intervention, ainsi que de sortie de la salle de réveil. Ces données nous ont permis de réaliser une moyenne en minutes de **temps d'occupation du bloc opératoire** pour un patient opéré d'une prothèse totale de genou, soit environ **277 minutes**, temps de surveillance en salle de réveil compris.

### 3.6.2 Données générales

Nous avons ensuite contacté le service technique de l'hôpital de Sainte Marguerite pour qu'il nous communique la consommation électrique annuelle du bloc opératoire.

Malheureusement, il n'existe **pas de décompte dédié spécifiquement** au bloc, et les seules données disponibles étaient la consommation globale de tout l'hôpital. Nous avons réfléchi à l'éventualité de pondérer la consommation à la surface que représente le bloc opératoire par rapport à la surface totale de l'hôpital, mais la littérature montre bien que l'activité chirurgicale représente un secteur majeur de la consommation globale d'un hôpital et cette approximation risquait de sous-estimer largement la réalité.

Également, s'est posée la question de réaliser le décompte de la consommation de chaque appareil présent dans la salle, de la consommation des régulateurs de flux d'air, de pression

et de température, etc. Pour nous affranchir de ce recueil fastidieux, nous nous sommes basés sur une **estimation** réalisée par l'outil d'**Energieplus**, qui étudie et calcule la consommation énergétique de bâtiments du secteur tertiaire afin de proposer des alternatives moins coûteuses pour l'environnement.

Par chance, leur analyse des besoins énergétiques d'une salle d'opération se base sur un exemple d'hôpital qui disposerait de **4 salles d'opération**, avec un temps d'occupation seulement en journée de 8h à 18h, du lundi au vendredi, ce qui correspond parfaitement au mode de fonctionnement du bloc opératoire de Sainte Marguerite.

Les données de calcul sont complexes, prenant en compte la température et l'humidité de l'air extérieur par période de l'année et l'énergie nécessaire pour ramener cette température à 18°C via des méthodes combinant le chauffage, le refroidissement, l'humidification ou la déshumidification, les plages horaires où les salles sont non occupées et donc le renouvellement de l'air ralenti, ou encore la ventilation des salles incluant la perte de charge théorique. Les calculs aboutissent à une consommation annuelle par salle d'opération de 42 357 kWh pour les besoins électriques pures, de 59 505 kWh pour les besoins thermiques et 8 843 kWh pour la ventilation de la salle, soit un total de **110 705 kWh/an et par salle** (22).

### 3.6.3 Calcul de la consommation pour une intervention

En considérant une année standard de 365 jours, à laquelle nous avons soustrait les 35 jours de congés annuels, en août et pour les fêtes de fin d'année, durant lesquels le bloc est fermé et les systèmes de filtration, pression négative et ventilation, sont mis à l'arrêt, nous avons basés nos calculs sur les 330 jours où le bloc opératoire consomme de l'énergie. Cela représente un total de 7 920 heures ou **475 200 minutes**.

Le bloc opératoire de chirurgie orthopédique de Sainte Marguerite est destiné à la chirurgie programmée, avec une occupation des salles exclusivement la journée entre 7h et 19h. Même si la nuit et les week-ends les lumières, les appareils de surveillance des patients, les respirateurs et autres sont à l'arrêt, les systèmes de régulation de pression des salles et de filtration continuent de fonctionner à bas régime. Nous avons donc considéré que la consommation énergétique pour une seule minute incluait à la fois les moments où le bloc tourne à plein régime et ceux où il est en veille.

Ainsi, notre calcul a simplement consisté en la réalisation d'un produit en croix à partir du temps moyen d'occupation du bloc opératoire par un patient, incluant le temps passé en salle de réveil en post opératoire, du nombre d'heures totales sur l'année et de la consommation totale en énergie estimée sur l'année. Nous avons donc trouvé une consommation électrique moyenne de **64.5 kWh** pour la réalisation d'une prothèse totale de genou et avons utilisé cette donnée pour nos calculs à partir des bases de données.

Ce chiffre a été associé au procédé « *electricity production, nuclear, pressure water reactor, FR* » pour le calcul des émissions générées par la consommation électrique du bloc opératoire pour une seule intervention.

### 3.7 Traitement des déchets

#### 3.7.1 Implants prothétiques

Après une arthroplastie totale de genou pour une arthrose primaire, dont la réalisation et les suites opératoires seraient sans complications, les implants ont une durée de vie supérieure à **10 ans** dans plus de 90 % des cas (23). Cette intervention étant réalisée en majorité chez des personnes ayant plus de 60 ans, nous avons considéré dans notre ACV que le patient garderait sa prothèse jusqu'à la fin de sa vie et qu'il n'existait **pas de traitement de fin de vie** associé aux implants dans ce contexte.

#### 3.7.2 Emballages et consommables

Dans notre étude, les déchets à traiter regroupaient donc les multiples **emballages** des implants prothétiques détaillés précédemment, ainsi que tous les **consommables** à usage unique et leurs emballages propres. Dans notre bloc opératoire, le tri s'effectue entre les Déchets Assimilés aux Ordures Ménagères ou **DAOM** et les Déchets d'Activités de Soins à Risques Infectieux **DASRI**, les fameuses poubelles jaunes, où l'on doit jeter le matériel souillé ou dangereux (aiguilles, lames).

Lors de notre audit en 2020, les quantités pour chaque catégorie ont été mesurées par pesée à la fin de l'intervention. Puis nous avons réalisé une moyenne sur l'ensemble des 17 interventions auditées.

### 3.7.2.1 DAOM

Nous avons retrouvé une moyenne de **3.5 kilogrammes** de déchets DAOM à la fin de chaque intervention. Les DAOM sont traités par incinération simple. Après collecte, ils sont transportés par camion jusqu'au centre de traitement, situé à Fos-sur-Mer, soit un trajet de 51 km.

### 3.7.2.2 DASRI

Cette catégorie regroupe les poubelles jaunes, ainsi que les bacs en plastique contenant, en théorie, uniquement les objets tranchants ou piquants. Nos pesées mesuraient une moyenne de **7.7 kilogrammes** de DASRI par intervention.

Ces déchets partent ensuite vers un **centre de traitement spécialisé**. Soit il sera réalisé un prétraitement mécanique et thermique pour désinfecter et rendre les déchets assimilables aux ordures ménagères, soit directement une incinération dans des fours à très haute température, dédiés à cet usage.

Après collecte, les DASRI de l'AP-HM sont acheminés jusqu'au site de traitement spécialisé situé à **Vedène**, dans le Vaucluse, soit un trajet de 99 km par camion (information communiquée par l'agence Noe Concept).

### 3.7.2.3 Calcul des impacts

Le logiciel, dans l'étape fin de vie, permet d'attribuer un type de traitement à un **pourcentage** des déchets traités de cette manière.

Dans notre étude, 7.7 kg soit 68 % des déchets totaux étaient des DASRI, traités par le procédé « *hazardous waste incineration, Europe* ».

Les 32v% restants étaient traités par « *treatment of municipal solid waste, incineration, FR* ».

## 3.8 Déplacements humains

### 3.8.1 Personnel médical et paramédical

La réalisation d'une prothèse totale de genou mobilise **10 personnes** : le chirurgien sénior, l'assistant chef de clinique, le représentant du laboratoire de la prothèse, l'interne de chirurgie, l'instrumentiste, l'infirmier circulant, l'anesthésiste, l'infirmier anesthésiste et deux aides-soignants hospitaliers.

Lors de notre audit, nous avons communiqué à l'ensemble du personnel du bloc opératoire un **questionnaire anonyme** (Annexe 2) recensant leur mode de déplacement, leur éloignement géographique de l'hôpital et leur catégorie professionnelle.

Ces données, à partir du logiciel d'ACV, nous ont permis de réaliser une **moyenne** de l'influence d'un aller-retour par **catégorie professionnelle**. Nous avons ensuite calculé la somme, pondérée par le nombre de personnes mobilisées par catégorie professionnelle, des émissions du personnel présent dans la salle de bloc opératoire pour la journée. Enfin, pour rapporter le résultat à notre unité fonctionnelle, 3 interventions étant en moyenne réalisées chaque jour dans une salle de bloc, nous avons divisé le total trouvé par 3 afin d'obtenir l'impact du déplacement du personnel pour une seule intervention.

### 3.8.2 Patients

Dans notre étude, nous avons seulement inclus le trajet réalisé par le patient pour se rendre à l'hôpital **le jour de l'intervention**. Ont donc été exclus les aller-retour pour les consultations préopératoires ainsi que celles post-opératoires.

Sur les 17 patients audités, 15 venaient de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, 1 de la région Rhône-Alpes et 1 patient venait de Corse.

Nous avons pris pour hypothèse que tous les patients venant de métropole avaient été déposés en voiture par un de leur proche qui réalisait donc un aller-retour. Pour nos calculs, nous avons réalisé la somme de la distance kilométrique entre le domicile du patient et l'hôpital de Sainte Marguerite, pour chacun des 16 patients concernés, soit un total de 782 km et donc 1564 km aller-retour, permettant de calculer l'impact total pour le déplacement de ces 16 patients.

Nous avons ensuite calculé et ajouté la répercussion d'un trajet en avion pour le seul patient venant de Corse. Enfin, nous avons divisé ce résultat par 17 pour obtenir la moyenne de l'impact par patient sur nos 17 interventions auditées.

## 4. Résumé sous forme d'article

### Introduction

Les répercussions négatives des activités humaines sur la santé de la population à l'échelle mondiale sont doubles. D'une part, on trouve le réchauffement climatique, causé par l'émission des gaz à effet de serre (GES). Les dernières estimations réalisées par le GIEC, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, laissent supposer une augmentation globale de la température de 2°C d'ici à 2050 (1), avec des conséquences multiples sur l'ensemble des écosystèmes, dont nous faisons partie (2). D'autre part, la pollution atmosphérique en elle-même représente une menace. En effet, d'après l'OMS, Organisation Mondiale de la Santé, elle est une des principales causes de maladies et de décès prématurés dans le monde au XXI<sup>e</sup> siècle (3,4). En 2016, on estimait à 4.6 millions le nombre de décès prématurés liés à la pollution de l'air extérieur principalement à la suite de maladies cardiovasculaires (58 %), de BPCO ou d'infections aiguës des voies respiratoires inférieures (18 %) et de cancers du poumon (6 %) (3).

Le secteur de la santé représente en lui-même une source majeure de pollution et d'émission de GES, avec respectivement 7 %, 4 % et 10 % des émissions totales du pays pour l'Australie, l'Angleterre et les Etats-Unis (5)(6). En ce qui concerne la France, elles sont estimées à 4.6 % selon un rapport publié en 2019 par *Health Care Without Harm*, bien qu'aucune étude robuste n'ait été menée. Même si la littérature demeure relativement peu fournie sur l'empreinte écologique des pratiques chirurgicales, on estime qu'elles représenteraient à elles seules 20 à 30 % des émissions de GES des systèmes de santé (7).

Le secteur de la chirurgie possède donc un potentiel majeur de diminution de nos impacts par l'amélioration de nos pratiques. S'il reste limité, on constate néanmoins une augmentation du nombre d'études utilisant la méthode d'analyse du cycle de vie (ACV), témoignant d'un intérêt grandissant des équipes chirurgicales sur les émissions associées à leurs pratiques (8,9,13).

Cet article présente une étude ayant analysé le cycle de vie de la réalisation d'une prothèse totale de genou (PTG). Il s'agit de la première étude de ce type concernant la chirurgie orthopédique. L'arthroplastie totale de genou est l'une des interventions les plus fréquemment réalisées dans cette spécialité, en France et à travers le monde. Avec le

vieillesse des populations occidentales, le nombre de prothèses implantées ne cesse d'augmenter chaque année, avec des estimations de 130 000 à 250 000 PTG annuelles en 2050 (14). C'est également une chirurgie standardisée, nécessitant le recours à de nombreux implants et accessoires de pose. Le but de cette étude était de quantifier les conséquences environnementales générées par une telle chirurgie, identifier les facteurs les plus pourvoyeurs d'émissions et ceux facilement modifiables, pour motiver les différents protagonistes à œuvrer pour une minimisation de ces impacts.

### **Méthode expérimentale**

Cette étude est basée sur l'ACV de la réalisation d'une PTG postéro-stabilisée avec tige d'extension tibiale, implants morphométriques cimentés, par voie antéro-médiale, dans le service de chirurgie orthopédique de l'hôpital Sainte Marguerite, faisant partie du complexe hospitalo-universitaire de Marseille au sein de l'Assistance Publique, Hôpitaux de Marseille (AP-HM). Cet hôpital de 426 lits, organisé en pavillons, regroupe les services de psychiatrie, de gériatrie mais surtout des services orientés autour de la prise en charge des pathologies du mouvement, avec la création de l'Institut du Mouvement et de l'appareil Locomoteur (IML) en 2010. Nous avons choisi ce site pour son volume et son expertise dans le domaine de la chirurgie prothétique du membre inférieur. Son bloc opératoire possède quatre salles de chirurgie ainsi qu'une salle de réveil.

La méthode standardisée (normes ISO 14 040 et 14 044) d'ACV recense et quantifie, tout au long de la vie des produits, les flux physiques de matières et d'énergies associés aux activités humaines, incluant l'extraction des matières premières, la fabrication, l'utilisation, les transports nécessaires à toutes les étapes et le traitement de fin de vie (15). Elle en évalue les impacts potentiels puis interprète les résultats obtenus en fonction de ses objectifs initiaux. L'unité fonctionnelle de notre étude était : réaliser la chirurgie d'une seule prothèse totale de genou postéro-stabilisée morphométrique, ayant une durée d'usage de minimum 10 ans (23).

Les frontières de notre analyse incluaient :

- les émissions générées par la fabrication
- l'approvisionnement des implants prothétiques,
- la fabrication de tous les consommables utilisés lors de la chirurgie ainsi que la gestion de leur fin de vie,
- la production et la stérilisation des accessoires de pose et des instruments chirurgicaux,

- la consommation électrique pour le fonctionnement du bloc opératoire,
- le déplacement de tous les protagonistes nécessaires depuis leur domicile jusqu'à l'hôpital.

Les données concernant l'anesthésie et l'antalgie per-opératoire, le nettoyage du bloc opératoire après chaque intervention, le traitement des déchets liquides provenant du rinçage et de l'aspiration per opératoire, le stockage des données concernant le patient sur un serveur informatique sécurisé, l'antalgie post opératoire et le séjour en service d'hospitalisation conventionnelle, le service de blanchisserie pour les draps et les tenues de bloc opératoire ainsi que la construction de l'hôpital, n'ont pas été prises en compte dans notre étude.

### Réalisation d'un audit

Nous avons effectué un audit de toutes les PTG réalisées entre le 12 et le 20 octobre 2020, soit un total de 17 PTG réalisées par 4 chirurgiens séniors de notre équipe. Nous avons collecté les données et calculé les moyennes pour une unité fonctionnelle nous permettant d'estimer la quantité de déchets DASRI et DAOM générés par une chirurgie, la quantité de chaque consommable à usage unique utilisé, la durée d'intervention et d'occupation du bloc opératoire par le patient, la distance en kilomètres entre la résidence principale du patient et l'hôpital.

A noter que la marque et le type d'implant de la prothèse étaient toujours les mêmes. Nous avons utilisé pour nos calculs la taille médiane pour chaque implant.

Un questionnaire anonyme distribué à l'ensemble du personnel du bloc opératoire, recensant la catégorie professionnelle, le mode de transport et l'éloignement de l'hôpital, nous a permis d'estimer l'impact d'un aller-retour pour une personne de chaque catégorie professionnelle.

### Prospection et recherches

Les données concernant la composition, le lieu de fabrication et le type de fret utilisé pour les différents consommables, ont été obtenues par prospection auprès des fournisseurs de matériel médical concernés. Après un premier contact par mail, un contact téléphonique direct était souvent nécessaire pour obtenir des réponses. Les informations concernant les matières premières ainsi que les procédés de fabrication des implants prothétiques nous ont été communiquées par un laboratoire français de prothèses, même si par respect de clauses de confidentialité, ces informations restaient très générales. En revanche, l'origine des matières premières a été estimée grâce aux données de France Stratégie publiée en 2020 (20).

Toutes les données concernant la stérilisation du matériel nous ont été fournies par la pharmacienne responsable du service de stérilisation centrale de l'AP-HM. Devant l'absence de relevé de compteur sectorisé, l'estimation de la consommation annuelle électrique du bloc opératoire a été réalisée avec l'outil d'EnergiePlus, qui étudie et calcule la consommation énergétique de bâtiments du secteur tertiaire (22). Enfin, nous avons enregistré le poids de l'ensemble des constituants des consommables, de tous les emballages et de chaque implant prothétique par une pesée sur des balances pharmaceutiques, précises au centième de gramme près.

### Estimation des distances

Nous avons assimilé tous les transports court ou moyen-courriers à des trajets en camion et poids-lourds. Les distances, en kilomètres, ont été estimées grâce à l'application Google Maps. Pour le fret long-courrier, nous avons pris pour hypothèse qu'il était réalisé par cargos maritimes. Les distances entre les différents pays nous ont été communiquées par un officier de la marine marchande.

### Calcul des impacts de l'ACV

Le total final des différents retentissements environnementaux a été calculé grâce au logiciel Ecodesign Studio, fabriqué par la société française Altermaker. Il contient les bases de données Ecoinvent, la plus complète à ce jour, Base IMPACTS et FDE01-008. Nous avons transformé tous les flux entrants de notre inventaire en des matières premières, procédés et transports présents dans ces bases de données, permettant d'obtenir une estimation des différents impacts environnementaux disponibles dans le logiciel.

## 5. Résultats : analyse des impacts

### 5.1 Objectif principal : empreinte carbone globale du cycle de vie de la PTG

Après avoir reporté toutes nos données dans le logiciel d'Analyse du cycle de vie Ecodesign Studio, en sélectionnant les matières premières, procédés de fabrication et transports cités dans les chapitres précédents, nous arrivons à un total de **190.5 kg CO<sub>2</sub>** équivalents pour l'ensemble du cycle de vie de la réalisation d'une prothèse totale de genou. Cette valeur correspond à l'impact sur le **réchauffement climatique** d'une seule intervention.

### 5.2 Objectif secondaire : empreinte carbone par catégorie

Pour la présentation de nos résultats, nous avons rassemblé toutes les étapes du cycle de vie prises en compte dans notre calcul en **quatre catégories** :

- la fabrication de la **prothèse** de genou en elle-même, des matières premières à la distribution ;
- le **trajet** effectué par les patients et par le personnel ;
- la **chirurgie**, avec tout ce qui, en dehors de la prothèse, est nécessaire à sa réalisation ;
- et enfin le **traitement des déchets**.

Ces quatre catégories ont ensuite été divisées en sous-catégories pour une description plus précise des résultats.

Le diagramme suivant représente la répartition de l'empreinte carbone par catégorie, avec 53.5 kg CO<sub>2</sub> (28 %) pour la fabrication de la prothèse, 50.8 kg CO<sub>2</sub> (27 %) pour les déplacements, 57 kg CO<sub>2</sub> (30 %) pour la chirurgie et 28.6 kg CO<sub>2</sub> (15 %) pour le traitement des déchets.

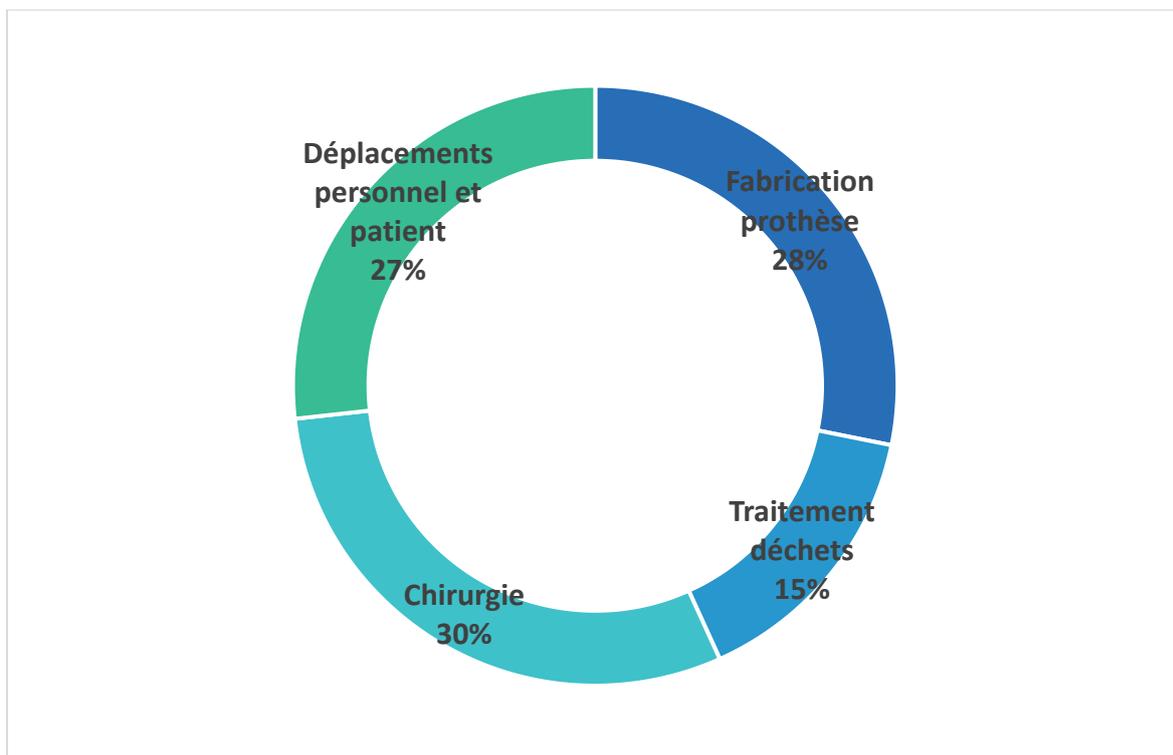


Figure 16 : empreinte carbone par catégorie (en pourcentages)

### 5.2.1 Fabrication de la prothèse

L'extraction et la fabrication des matières premières nécessaires pour les implants prothétiques représentent 10.8 kg de CO<sub>2</sub>, avec respectivement 5.8 kg CO<sub>2</sub> pour le Cobalt, 2.7 kg CO<sub>2</sub> pour le Titane, 2kg CO<sub>2</sub> pour le Chrome et enfin 0.25 kg CO<sub>2</sub> pour le Molybdène.

Pour l'approvisionnement de ces matières, il faut compter 0.11 kg CO<sub>2</sub>.

Les **procédés de fabrication** comptabilisent un total de 38.6 kg CO<sub>2</sub> pour l'ensemble des cinq implants décrits.

Enfin, on obtient un total de 0.4 kg CO<sub>2</sub> pour la distribution de la prothèse des États-Unis jusqu'à notre hôpital à Marseille, et de 3.8 kg CO<sub>2</sub> pour l'ensemble des emballages de tous les implants, matières premières et procédés de fabrication inclus.

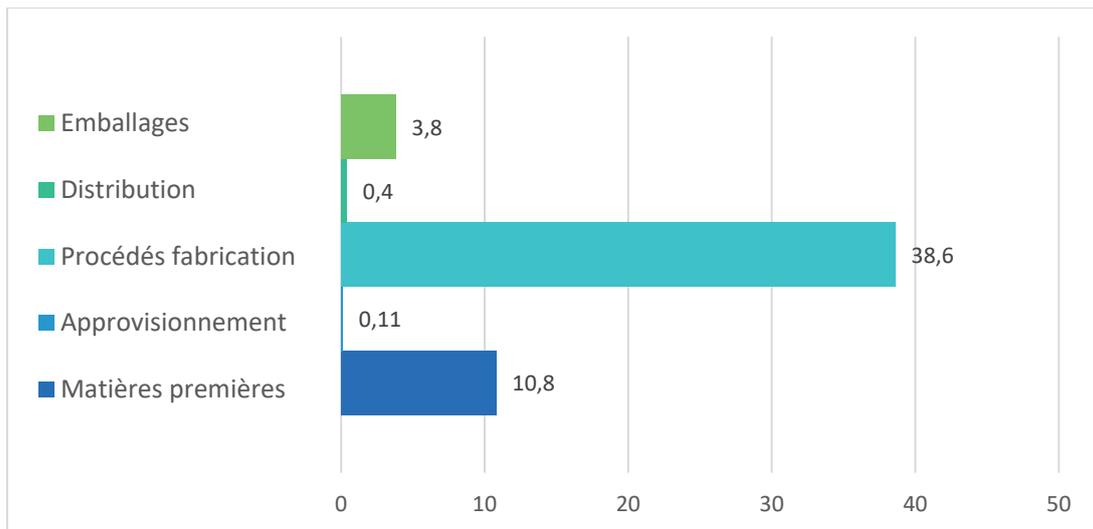


Figure 17 : impact climatique en kg CO<sub>2</sub> des différents flux de la catégorie fabrication de la prothèse

### 5.2.2 Déplacements

Nous avons retrouvé une moyenne de 31 kg CO<sub>2</sub> pour le trajet aller-retour qui permet au patient de se rendre à l'hôpital pour sa chirurgie.

En ce qui concerne le personnel médical et paramédical, l'influence de leur déplacement pour une seule chirurgie est d'environ 19 kg de CO<sub>2</sub>.

### 5.2.3 Chirurgie

L'ensemble des **consommables** représente 53.6 kg CO<sub>2</sub> soit 94 % de l'empreinte carbone pour la seule catégorie chirurgie et **27 % de l'impact total de notre ACV**, avec respectivement 40 kg CO<sub>2</sub> pour les matières premières, 9 kg CO<sub>2</sub> pour leur fabrication et 3.5 kg CO<sub>2</sub> pour les transports d'approvisionnement et de distribution.

Le poids carbone de la fabrication des instruments, ancillaires et boîtes de transport est de 0.54 kg CO<sub>2</sub> et celui de leur stérilisation, aller-retour compris, est de 2.4 kg CO<sub>2</sub> soit un total de 2.94 kg CO<sub>2</sub> pour l'ensemble, ce qui représente 5.2% de la catégorie chirurgie.

Enfin, la consommation électrique du bloc opératoire pour la durée d'une intervention et de la surveillance en salle de réveil génère l'équivalent de 0.4 kg CO<sub>2</sub> soit 0.7 % de la catégorie chirurgie.

## 5.2.4 Traitement des déchets

Le traitement des déchets issus des **consommables représente 94.7 %** de la catégorie avec 27 kg CO<sub>2</sub> émis contre seulement 1.5 kg CO<sub>2</sub> (5.3 %) pour ceux issus des emballages des implants prothétiques.

En séparant les DASRI et DAOM, on obtient environ 25 kg CO<sub>2</sub> pour les **DASRI** soit **87 %** du total contre 3.5 kg pour les DAOM, représentant 13 % de l’empreinte carbone du total des déchets traités.

## 5.3 Autres impacts

Les autres indicateurs écologiques sont ceux pré établis par le logiciel lui-même. Nous n’avions pas la possibilité de les choisir ou de les modifier.

Pour ne pas rendre la lecture trop lourde, les résultats concernant les **cinq autres impacts** étudiés par le logiciel Ecodesign Studio, classés par catégorie, sont résumés dans le tableau et graphique suivants :

Catégorie	Impacts sur				
	Couche d'ozone en kg CFC-11 eq	Epuisement des ressources en kg Sb eq	Acidification en kg mol H+ eq	Eutrophisation en kg P eq	Pollution air en kg NMVOC eq
<b>Fabrication prothèse</b>					
Matières premières	9,92E-07	8,86E-02	9,76E-02	6,32E-03	3,96E-02
Procédés fabrication	1,69E-06	2,74E-01	1,85E-01	1,53E-02	1,07E-01
Transports	8,27E-08	3,35E-04	8,65E-03	3,43E-05	4,68E-03
Emballages	1,68E-07	3,33E-02	1,79E-02	1,26E-03	1,35E-02
<b>Total</b>	<b>2,94E-06</b>	<b>3,96E-01</b>	<b>3,09E-01</b>	<b>2,29E-02</b>	<b>1,65E-01</b>
<b>Déplacements</b>					
Patient	4,71E-06	2,17E-01	1,24E-01	4,67E-03	1,07E-01
Personnel hospitalier	2,80E-06	1,30E-01	7,67E-02	2,85E-03	6,75E-02
<b>Total</b>	<b>7,51E-06</b>	<b>3,47E-01</b>	<b>2,00E-01</b>	<b>7,52E-03</b>	<b>1,74E-01</b>
<b>Chirurgie</b>					
Consommables	1,80E-06	6,58E-01	3,62E-01	1,59E-02	2,11E-01
Instruments et ancillaires	2,75E-07	2,03E-02	4,05E-02	1,58E-03	1,63E-02
Consommation E du bloc	3,63E-08	2,76E-03	3,24E-03	2,50E-04	2,70E-03
<b>Total</b>	<b>2,11E-06</b>	<b>6,81E-01</b>	<b>4,06E-01</b>	<b>1,77E-02</b>	<b>2,30E-01</b>
<b>Traitement des déchets</b>					
Consommables	2,65E-06	5,84E-02	3,75E-02	7,23E-03	2,33E-02
Emballages	1,50E-07	3,30E-03	2,12E-03	4,08E-04	1,32E-03
<b>Total</b>	<b>2,80E-06</b>	<b>6,17E-02</b>	<b>3,96E-02</b>	<b>7,64E-03</b>	<b>2,46E-02</b>

Tableau 3 : résultats des autres impacts écologiques par catégorie du cycle de vie

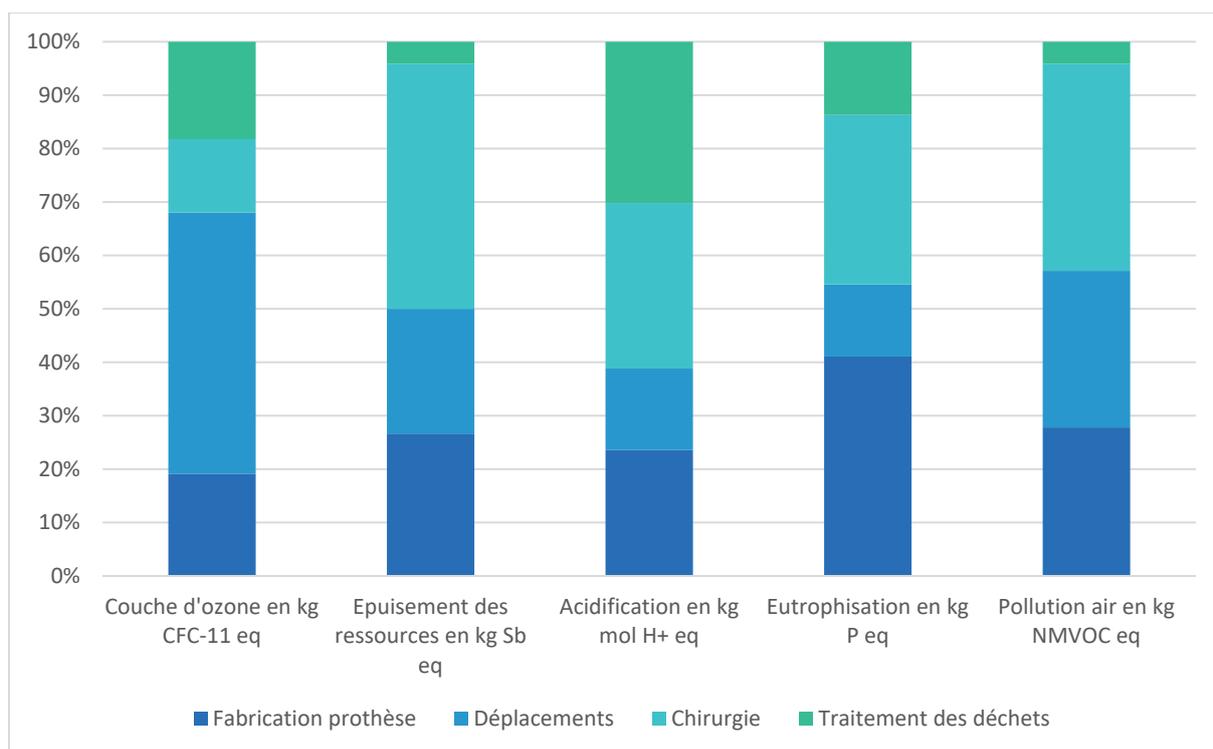


Figure 18 : résumé, en pourcentage par catégorie du cycle de vie, des autres impacts écologiques

Comme nous pouvons le voir dans ce tableau et ce graphique, chaque étape du cycle de vie a également un poids sur les autres impacts écologiques.

Quand les déplacements humains totalisent 49 % des conséquences sur l'appauvrissement de la **couche d'ozone**, la production et l'acheminement des consommables représentent environ 44 % de la répercussion totale sur l'**épuisement des ressources**. Les catégories fabrication de la prothèse, déplacements humains et réalisation de la chirurgie se partagent l'influence sur la **pollution de l'air**, avec respectivement 28 %, 29 % et 39 % du total pour cet impact.

## 6. Discussion

### 6.1 Interprétation des résultats

Comme attendu, la réalisation d'une prothèse totale de genou génère des émissions dont le retentissement, sur notre planète et notre santé, n'est pas négligeable. Rien que pour une seule intervention, les émissions de CO<sub>2</sub> que nous avons identifiées s'élèvent à 190 kg CO<sub>2</sub> eq, soit un peu plus d'un aller Paris-Marseille en avion.

Lorsqu'on rapporte ce chiffre aux 700 PTG réalisées dans notre service à Sainte Marguerite et au nombre implantées en France, chaque année, qui continue de croître rappelons le, on obtient un bilan de GES à 17 100 tCO<sub>2</sub> eq, ce qui représente l'équivalent de la circulation de 3 719 voitures pendant 1 an et nécessiterait la croissance de 283 000 arbres pendant 10 ans pour capturer tout ce carbone (24).

La sous-catégorie fabrication et distribution des consommables a l'empreinte carbone la plus importante puisqu'elle représente, à elle seule, 27 % du total de CO<sub>2</sub>. Ces résultats sont inférieurs à ceux retrouvés par l'étude anglaise de Morris sur la cataracte avec 53 % du total (9), mais précisons qu'ils avaient également inclus dans cette catégorie, l'approvisionnement en médicaments et en nourriture, ce qui n'est pas le cas dans la nôtre. Pour autant, ils paraissent cohérents malgré des approximations sur la composition des différents matériels à usage unique. La large représentation des dérivés du plastique et du coton (pour toutes les compresses), justifie que les consommables arrivent en tête des émissions, toutes catégories d'impacts confondus, effets encore plus marqués pour l'épuisement des ressources et l'acidification des océans. Ces données sont similaires à celles retrouvées dans l'étude américaine de Campion et Thiel, qui comparait les conséquences d'une naissance par voie basse ou par césarienne (25).

Dans notre étude, 38.6kg de CO<sub>2</sub> sont émis par l'ensemble des procédés de fabrication des implants. Ils représentent un pourcentage important dans toutes les catégories d'impacts étudiées. Ce chiffre peut s'expliquer par la nécessité de porter les différents métaux à très haute température et donc par une consommation d'énergies fossiles importante, puisque la prothèse est fabriquée aux États-Unis. De plus, l'accumulation de nombreux procédés

spécialisés pour aboutir aux implants définitifs fait rapidement grimper les chiffres. De même, notre incapacité à connaître précisément toutes les étapes de la fabrication des implants, ainsi que l'absence dans la base de données de procédés spécifiquement dédiés à la conception du matériel médical et chirurgical, laissent supposer que leur portée est ici largement sous-estimée.

Contrairement à ce que nous attendions, l'extraction et l'acheminement des matières premières, comme le titane ou le cobalt, ne semblent pas avoir un retentissement majeur au regard de l'ensemble de l'ACV. Nous expliquons ce résultat par le faible poids d'une prothèse et donc l'infime quantité nécessaire pour chacune des matières premières.

Concernant les transports, le déplacement du patient jusqu'à l'hôpital, pour la seule réalisation de la chirurgie, impacte significativement le changement climatique et l'appauvrissement de la couche d'ozone. En tant que centre de référence, dans la prise en charge des pathologies liées à l'appareil locomoteur et notamment l'expertise de l'équipe chirurgicale sur la réalisation des prothèses totales de genou, l'hôpital de Sainte Marguerite draine un large bassin de population sur toute la région PACA, étendu même jusqu'en Corse, avec des distances souvent supérieures à 100 km entre l'hôpital et le lieu de résidence principale des patients. Cette contribution est de manière certaine sous-estimée puisque nous n'avons pas pris en considération les allers-retours effectués lors des consultations pré et post-opératoires ou la consultation d'anesthésie.

Les émissions associées aux déplacements physiques du personnel sont pour leur part plutôt limitées, la plupart résidant à proximité de leur lieu de travail.

On note également une représentation peu importante de tous les transports liés à l'acheminement des matières premières et la distribution des implants prothétiques ou des consommables sur l'ensemble des impacts, malgré les grandes distances parcourues. En effet, comme précisé dans le paragraphe dédié, leur calcul est pondéré par le poids du produit par rapport au poids total transporté, par le moyen de transport étudié. Le poids total de 12 kg environ, prothèse incluse, paraît donc dérisoire au regard de tous les flux de marchandises qui transitent à travers le monde.

De plus, notre hypothèse qui attribue l'ensemble des transports long-courriers à un fret par cargos maritimes est possiblement erronée. Ce genre de trajet se compte souvent en dizaine

de jours, alors que l'approvisionnement de matériel médical peut parfois nécessiter des transferts urgents de produits, effectués alors par avions-cargos. Nous avons réalisé une simulation qui remplace les trajets maritimes par des trajets en avion, avec une augmentation de tous les impacts étudiés, significative pour l'appauvrissement de la couche d'ozone et le changement climatique (231 kg CO<sub>2</sub> eq soit +21%).

Enfin, le traitement des déchets a essentiellement des conséquences sur le réchauffement climatique et l'appauvrissement de la couche d'ozone. Il est presque exclusivement réalisé par incinération, source d'émission dans l'air d'une quantité importante de substances polluantes (gaz et particules). Comme attendu, le traitement des DASRI possède l'impact le plus important, 3 fois plus élevé que celui des DAOM.

## 6.2 Limites de l'étude

Une part non négligeable de nos résultats est basée sur des hypothèses et approximations. Notre étude possédait des frontières assez vastes, avec de nombreux flux entrants à répertorier. L'inventaire a été réalisé en grande partie par prospection auprès des différents groupes industriels de production de matériel médical. Il était souvent difficile de trouver le bon interlocuteur. Parfois, personne ne semblait avoir les informations dont nous avons besoin ou alors refusait de nous les communiquer, par respect de clauses de confidentialité. Ce manque de transparence a occasionné un grand nombre de données manquantes ou incomplètes. Nous avons tenté de pallier ce manque avec les hypothèses qui nous paraissaient les plus plausibles ou celles qui semblaient plutôt sous-estimer l'impact global.

D'autres flux entrants avaient, d'entrée de jeu, été exclus de notre ACV. C'est le cas de l'anesthésie réalisée au cours de la chirurgie. Il est maintenant clairement établi que certains gaz anesthésiques ont des répercussions sur le réchauffement climatique (26), notamment le Desflurane qui génère des émissions équivalentes à 2540 fois celles du CO<sub>2</sub> (27). Bien que certaines équipes limitent son usage au profit d'autres gaz moins polluants, il est encore largement utilisé par celles moins soucieuses de l'environnement. Néanmoins, une seule anesthésie générale contre 16 rachis-anesthésies ayant été réalisée sur la période de notre audit, nous avons supposé que son impact global serait limité.

D'autres données, comme la construction de l'hôpital ou encore le séjour hospitalier du patient, n'ont pas été prises en compte, entraînant ici encore une sous-estimation de notre résultat global.

De plus, le manque de données recueillies, associé à l'absence dans les bases de données des procédés de fabrication précis, notamment concernant la fabrication des implants de la prothèse, nous ont conduits à réaliser beaucoup d'approximations.

Le prix de l'accès complet à la base de données « Ecoinvent » et celui de la licence du logiciel « Ecodesign studio » ont été un frein dans la réalisation de notre étude. L'inscription gratuite sur le site d'« Ecoinvent » permet d'accéder à la liste des matières, procédés et transports répertoriés dans la base mais pas de visualiser directement les flux entrants comptabilisés et les flux sortants obtenus. L'accès gratuit à l'intégralité des données de la « Base IMPACTS » nous a permis de lever en partie les zones d'ombre.

Enfin, étant novices dans la réalisation d'une ACV, l'utilisation du logiciel malgré son ergonomie et la compréhension de son mode de fonctionnement ont pu générer des erreurs de calcul et d'interprétation des résultats.

### 6.3 Comment s'améliorer ?

La piste la plus simple à explorer, pour commencer notre transition, est la gestion des déchets. 23 à 30 % des déchets produits par un hôpital proviennent du bloc opératoire (7). Une grande proportion étant représentée par les plastiques et cartons, on pourrait envisager un tri sélectif dans des bacs dédiés présents dans chaque salle de bloc opératoire, pour un recyclage des déchets non dangereux. Une étude américaine publiée en 2012, après un audit des déchets produits par 10 PTH et 10 PTG, analysait que 20 % des déchets totaux étaient recyclables (28). Une étude très complète, menée par Thiel et publiée en 2018 sur les stratégies permettant la réduction des émissions de GES par les laparoscopies, montre que le recyclage a peu d'influence (<5 %) s'il est mis en place de manière isolée (29). Il s'agit malgré tout de l'action la plus simple à mettre en place au quotidien.

On estime également que 50 à 85 % des déchets considérés comme DASRI n'y ont pas leur place. Cela entraîne un surcoût et un bilan environnemental plus élevé (30). Même si des recommandations de tri pour les DASRI existent, avec des formations notamment dans les IFSI (Instituts de formation en soins infirmiers), une adaptation de ces règles est nécessaire au

niveau national, pour les rendre plus claires et favoriser la bonne mise en pratique par l'ensemble du personnel. Nos projections dans le logiciel d'ACV montrent une diminution de 7,4% des répercussions sur le réchauffement climatique avec un tri DASRI optimisé.

Plus spécifiquement dans notre étude, on pourrait également envisager la suppression des notices présentes dans chaque boîte d'implants et les rendre facilement consultables sur Internet si besoin.

Dans la double optique de réduire nos déchets mais aussi nos besoins en matière plastique, l'action sur notre façon d'utiliser les consommables peut avoir une importance capitale. À partir des années 1980, les préoccupations concernant les maladies transmissibles par le sang ont favorisé le développement de matériel à usage unique. Même si différentes études s'opposent sur les bienfaits du réutilisable versus usage unique sur l'empreinte écologique (12,31), plusieurs auteurs avancent le retour à des champs et compresses réutilisables et re stérilisables, comme une des clés pour réduire l'impact au bloc opératoire, avec une diminution du CO<sub>2</sub> émis de 4 % dans l'étude de Thiel, citée précédemment.

On pourrait également imaginer l'utilisation de plastique recyclé pour la fabrication des emballages voire de l'ensemble du matériel à usage unique, ainsi que de coton biologique pour toutes les compresses.

Toujours dans l'optique de réduire les consommables et donc les déchets, le gaspillage correspondant à 20 % des dépenses de santé (32), il faudrait personnaliser les packs regroupant le matériel pour les adapter à chaque pratique ou bloc et ainsi éviter le gaspillage de matériel non utilisé.

Avant la réalisation du geste chirurgical, le patient réalise de nombreux allers-retours jusqu'à l'hôpital pour l'ensemble de ses consultations pré et post-opératoires. Si l'examen clinique est indispensable au cours de certaines, d'autres peuvent tout à fait s'envisager par le biais de la téléconsultation, en particulier pour le simple visionnage d'examens complémentaires, prescrits lors d'un précédent entretien. Plusieurs sites et applications dédiés ont été mis en place, notamment depuis la pandémie de Covid-19.

Il paraît difficile d'envisager une production de prothèse totale de genou 100 % française, toutes les matières premières n'étant pas disponibles sur notre territoire. Mais la France

héberge des industries hautement spécialisées. La réalisation de l'ensemble des procédés de fabrication dans notre pays (forge, fonderie, usinage, etc.) limiterait les multiples allers-retours à travers le monde. Il faudrait aussi motiver les leaders mondiaux à être plus transparents et à participer à l'évaluation de leurs pratiques, permettant ainsi des estimations plus précises des impacts, notamment en ce qui concerne les procédés de fabrication. Le secteur de la recherche et du développement doit investir vers des innovations plus vertueuses, que ce soit dans le domaine des consommables, de la fabrication prothétique ou encore la fabrication de toutes les machines présentes dans les salles de chirurgie. De plus, peut-être pourrait-on inventer un label « Green prothèse » et inciter les groupements hospitaliers à réaliser leurs achats et contrats auprès d'industries plus vertes lorsque celles-ci existent.

Enfin, même si la consommation électrique du bloc opératoire a une influence limitée dans notre étude, il faudrait réaliser les transformations nécessaires des blocs opératoires, en commençant par les plus anciens, pour limiter l'utilisation d'énergie. La réduction de la consommation globale, lorsque les salles ne sont pas occupées, par l'utilisation de capteurs de présence, la mise en place d'ampoules à LED, voire le recours à la lumière naturelle par le biais de fenêtres, font partie de la stratégie à mettre en place. La transition vers la production d'électricité, via les énergies renouvelables, aidera à **opérer le changement**.

Toutes ces propositions s'inscrivent dans la stratégie des 5R : Réutiliser, Réduire, Recycler, Repenser et Rechercher.

## 7. Conclusion

La réalisation d'une prothèse totale de genou, à travers son cycle de vie, génère des émissions dont les conséquences sont importantes, sur l'environnement et donc sur notre santé. Bien que beaucoup de données soient, à ce jour, manquantes pour réaliser des estimations précises, notre étude identifie les catégories a priori les plus pourvoyeuses de flux néfastes et sert de point de départ pour d'autres études plus poussées ou comparatives. Le secteur du bloc opératoire étant celui qui, proportionnellement, a l'impact écologique le plus élevé, toutes les mesures, mêmes minimales, prises à son niveau sont susceptibles d'avoir des bénéfices importants sur les émissions des systèmes de santé (33). Tous les acteurs participant à la réalisation de l'activité chirurgicale sont concernés par l'amélioration de nos pratiques. C'est la synergie de tous les changements qui permettra de minimiser au maximum notre impact écologique.

## Bibliographie

1. Rapport du GIEC 2021. Le Monde.fr [Internet]. 2021 Sep; Available from: <https://www.lemonde.fr/blog/huet/2021/08/09/le-rapport-du-giec-en-18-graphiques/>
2. ONU : Les effets du réchauffement climatique sur la santé [Internet]. Available from: <https://www.un.org/fr/chronicle/article/les-effets-du-rechauffement-climatique-sur-la-sante-les-pays-en-developpement-sont-les-plus>
3. OMS : qualité de l'air ambiant et santé [Internet]. Available from: [https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
4. Watts N, Adger WN, Agnoleschi P, Blackstock J, Byass P, Cai W, et al. Health and climate change: policy responses to protect public health. *The Lancet*. 2015 Nov 7;386(10006):1861–914.
5. Malik A, Lenzen M, McAlister S, McGain F. The carbon footprint of Australian health care. *The Lancet Planetary Health*. 2018;2(1):27–35.
6. Eckelman MJ, Sherman J. Environmental Impacts of the U.S. Health Care System and Effects on Public Health. *PLoS One*. 2016;11(6):e0157014.
7. Kwakye G, Brat GA, Makary MA. Green surgical practices for health care. *Arch Surg*. 2011 Feb;146(2):131–6.
8. Thiel CL, Schehlein E, Ravilla T, Ravindran RD, Robin AL, Saeedi OJ, et al. Cataract surgery and environmental sustainability: Waste and lifecycle assessment of phacoemulsification at a private healthcare facility. *J Cataract Refract Surg*. 2017 Nov;43(11):1391–8.
9. Morris DS, Wright T, Somner JEA, Connor A. The carbon footprint of cataract surgery. *Eye (Lond)*. 2013 Apr;27(4):495–501.
10. Venkatesh R, van Landingham SW, Khodifad AM, Haripriya A, Thiel CL, Ramulu P, et al. Carbon footprint and cost-effectiveness of cataract surgery. *Curr Opin Ophthalmol*. 2016 Jan;27(1):82–8.
11. Eckelman M, Mosher M, Gonzalez A, Sherman J. Comparative life cycle assessment of disposable and reusable laryngeal mask airways. *Anesth Analg*. 2012 May;114(5):1067–72.
12. Sherman JD, Raibley LA, Eckelman MJ. Life Cycle Assessment and Costing Methods for Device Procurement: Comparing Reusable and Single-Use Disposable Laryngoscopes. *Anesth Analg*. 2018 Aug;127(2):434–43.
13. Thiel CL, Eckelman M, Guido R, Huddleston M, Landis AE, Sherman J, et al. Environmental impacts of surgical procedures: life cycle assessment of hysterectomy in the United States. *Environ Sci Technol*. 2015 Feb 3;49(3):1779–86.

14. Erivan R, Tardieu A, Villatte G, Ollivier M, Jacquet C, Descamps S, et al. Knee surgery trends and projections in France from 2008 to 2070. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2020 Sep;106(5):893–902.
15. ADEME : l'analyse du cycle de vie [Internet]. Available from: <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv>
16. INSEE, Gaz à effet de serre, définition [Internet]. Available from: <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1855>
17. Ministère de la transition écologique. Changement climatique : causes, effets et enjeux. [Internet]. 2018. Available from: <https://www.ecologie.gouv.fr/changement-climatique-causes-effets-et-enjeux>
18. Ocean-climate.org [Internet]. Available from: <https://ocean-climate.org/sensibilisation/les-impacts-du-changement-climatique-sur-locean/>
19. Milieu Marin France. Eutrophisation [Internet]. 2021. Available from: <https://www.milieumarinfrance.fr/Nos-rubriques/Etat-du-milieu/Eutrophisation>
20. France Stratégie, impact carbone métaux [Internet]. 2020. Available from: <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2020-na96-externalite-carbone-metiaux-octobre.pdf>
21. GAUDIAUT T. La production de plastique dans le monde [Internet]. 2020. Available from: <https://fr.statista.com/infographie/21889/repartition-production-mondiale-de-plastique-par-pays-region/>
22. Energieplus, consommation salle d'opération [Internet]. Available from: <https://energieplus-lesite.be/concevoir/climatisation3/questionner-necessite-climatiser/analyser-les-besoins-thermiques-exemple-d-une-salle-d-operation/>
23. Argenson J-N, Boisgard S, Parratte S, Descamps S, Servien E, Bercovy M. Analyse de survie de la prothèse totale de genou à un recul minimum de dix ans : une étude française multicentrique nationale portant sur 846 cas. *Revue de chirurgie orthopédique et traumatologique.* 2013 Mar;(99):321–6.
24. United States Environmental Protection Agency Equivalencies Calculator. Greenhouse Gas [Internet]. Available from: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
25. Champion N, Thiel CL, DeBlois J, Woods NC, Landis AE, Bilec MM. Life cycle assessment perspectives on delivering an infant in the US. *Sci Total Environ.* 2012 May 15;425:191–8.
26. Charlesworth M, Swinton F. Anaesthetic gases, climate change, and sustainable practice. *The Lancet Planetary Health.* 2017 Sep 1;1(6):216–7.
27. Campbell M, Pierce JMT. Atmospheric science, anaesthesia, and the environment. *BJA Education.* 2015 Aug;15(4):173–9.

28. Lee RJ, Mears SC. Reducing and Recycling in Joint Arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty*. 2012 Dec 1;27(10):1757–60.
29. Thiel CL, Woods NC, Bilec MM. Strategies to Reduce Greenhouse Gas Emissions from Laparoscopic Surgery. *Am J Public Health*. 2018 Apr;108(S2):S158–64.
30. Kagoma YK, Stall N, Rubinstein E, Naudie D. People, planet and profits: the case for greening operating rooms. *CMAJ*. 2012 Nov 20;184(17):1905–11.
31. McGain F, McAlister S, McGavin A, Story D. A life cycle assessment of reusable and single-use central venous catheter insertion kits. *Anesth Analg*. 2012 May;114(5):1073–80.
32. Weiss A, Hollandsworth HM, Alseidi A, Scovel L, French C, Derrick EL, et al. Environmentalism in surgical practice. *Current Problems in Surgery*. 2016 Apr 1;53(4):165–205.
33. MacNeill AJ, Lillywhite R, Brown CJ. The impact of surgery on global climate: a carbon footprinting study of operating theatres in three health systems. *The Lancet Planetary Health*. 2017 Dec 1;1(9):e381–8.

# Annexes

## Annexe 1 : Recueil de données concernant les consommables

Alignement						
F	G	H	I	J	K	L
Produit	Référence	Matériaux principaux	Poids	Lieu production	Type fret	
Trouze extrémité	DGFB5991					
Compresseur interstinal	28700002NR	90% coton 10% viscose				
blouse stériliser Éclipse	9509CEA	emballage polyliner, blouse en Spunlace - viscose + polyester avec canalisation hydraulique				
rtackinette	22534CE					
cupule 500mL	174628	polypropylène				
bander callanter	381035					
Cache périnée	33100	Double couche : non tissé polypropylène + film polyéthylène				
gant Protexir latex 7,5	2D72MT75K	natural rubber latex with nitrile polymer coating				
Unibrush Brazor chirurgical	201971					
Coquler	08B					
66483Miaban 256x60 champ A incinérinde antimicrobien	7000002829	Support: film polyester. Adhésif: copolymère de synthèse avec iodophore incorporé		Palagne, stérilisation en Allemagne	Comian	
Set badiqan	478 855	Compresseur: polyester et viscose. Cupule: polypropylène. Emballage: film PET/PE + papier.		République Tchèque	Comian	
grander compresseur 13x20	01070T2	Gaze 100% coton 17 filr,		Hubei Province, Chine	Bateau, avion	zi urgent
petitor compresseur 10x10	01062T2	emballage: multicouche				
Vicryl0	JV1473	polyglactin 910				
alone Rodan 10	658.10	Acier inoxydable. Protection par 2 gades traupler en PVC		Équateur	Avion et bateau	
Drain 10	651.10	PVC avec clique 08R				
Aqrafoure	8886803712	Aqrafour acier inoxydable. Réervoir??				
Canule aspiration	8888502005					
Birtauri électrique	20190-162	Manche: ABS. Câble: cuivre recouvert polyéthylène. Fiche raccordement: ABS et laitan. Peinte: inox. Étui: polypropylène		Allemagne	Comian	
Ciment radia apaque + ganta 0.55q						
Vitiro stérile carque	0408-6000-000			Mexique?		
paignée Scialytique	AR-LHCB01					
Carzher	00-5150-482-00					
Tubuluro aspiration	TR7361B			Tunisie?		
flacan Rodan barre pression	28470					
Botadiner						
Lamor froide		acier carbone, emballage feuillet métallique		Sheffield (Angleterre)		
seringue qavaq 60mL	002022970F	polypropylène				

## Questionnaire anonyme

Pour estimation de l'impact écologique du déplacement du personnel jusqu'au bloc opératoire

Quelle est votre profession ?

- ASH     IBODE     IADE     INTERNE     ANESTHESISTE
- ASSISTANT     CHIRURGIEN SENIOR

A combien de kilomètres de l'hôpital vivez-vous ?

.....km.

Quel est votre moyen de locomotion pour venir travailler (si différent selon les jours, indiquez celui le plus utilisé) ?

- Voiture     Moto     Métro/bus     Vélo
- Vélo ou trottinette électrique     A pieds

Si vous vous déplacez préférentiellement en voiture, veuillez remplir les champs suivants :

- Constructeur et modèle du véhicule : .....
- Année de fabrication : .....
- Puissance du moteur (cv) : .....
- Type de carburant : .....

## SERMENT D'HIPPOCRATE

**Au moment d'être admise à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité.**

Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux.

Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans **aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions**. J'interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas **usage de mes connaissances contre les lois de l'humanité**.

**J'informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences.**

Je ne tromperai **jamais leur confiance** et **n'exploiterai pas le pouvoir hérité** des circonstances pour forcer les consciences.

**Je donnerai mes soins à l'indigent et à quiconque me les demandera**. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

**Admise dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me seront confiés**. Reçue à l'intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs.

Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.

**Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission**. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

**J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité.**

**Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonorée et méprisée si j'y manque.**



**Auteur :** DELAIE Camille

**Titre :** **impact écologique de la réalisation d'une prothèse totale de genou : analyse du cycle de vie de la matière première jusqu'aux implants définitifs.**

**Introduction :** l'impact écologique des activités humaines est l'une des préoccupations majeures de notre siècle. Le réchauffement climatique et l'altération de la santé des populations sont des conséquences directes. Les systèmes de soins de santé représentent 4 à 10 % des émissions de gaz à effet de serre, dont 20 à 30 % sont attribuées à l'activité chirurgicale.

**Problématique :** l'arthroplastie totale de genou étant une des interventions les plus courantes en chirurgie orthopédique et utilisant un grand nombre d'implants et de matériels, nous avons voulu quantifier les différents impacts environnementaux qu'elle génère pour ensuite identifier les changements à opérer afin de les minimiser.

**Matériels et méthodes :** nous avons analysé le cycle de vie de la réalisation d'une prothèse totale de genou à l'aide du logiciel d'ACV « Ecodesign Studio » et de la base de données « Ecoinvent ». Nous avons inclus l'extraction des matières premières et la fabrication des implants prothétiques, des instruments chirurgicaux ainsi que des consommables, les procédés de fabrication pour l'ensemble de ces produits, l'électricité nécessaire au fonctionnement du bloc opératoire et à la stérilisation des instruments, tous les transports associés à ces activités, les trajets des différents protagonistes et le traitement des déchets.

**Résultats :** la réalisation d'une prothèse totale de genou a des impacts multiples sur l'environnement, plus marqués sur l'appauvrissement de la couche d'ozone et le réchauffement climatique. Elle émet 190 kg de CO<sub>2</sub> équivalents sur l'ensemble de son cycle de vie. L'utilisation de consommables à usage unique, les procédés de fabrication des implants prothétiques et le transport du patient jusqu'à l'hôpital ont les impacts les plus importants.

**Discussion :** l'optimisation du traitement des déchets par le recyclage semble être l'amélioration la plus facile à mettre en œuvre. Nous devons également modifier notre utilisation et le mode de fabrication des consommables à usage unique. Tous les protagonistes doivent participer à l'amélioration de nos pratiques pour diminuer notre impact environnemental global.

**Mots-clés :** prothèse totale de genou, impact écologique, analyse du cycle de vie, carbone.