



HAL
open science

Évaluation rétrospective de la performance diagnostique d'un logiciel d'IA dans la détection de fractures osseuses périphériques chez des enfants de moins de 2 ans lors de suspicion de traumatisme non accidentel

Réjane Martin

► **To cite this version:**

Réjane Martin. Évaluation rétrospective de la performance diagnostique d'un logiciel d'IA dans la détection de fractures osseuses périphériques chez des enfants de moins de 2 ans lors de suspicion de traumatisme non accidentel. Médecine humaine et pathologie. 2023. dumas-04191613

HAL Id: dumas-04191613

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04191613v1>

Submitted on 30 Aug 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER
FACULTE DE MEDECINE MONTPELLIER-NIMES

THESE

Pour obtenir le titre de
DOCTEUR EN MÉDECINE

Présentée et soutenue publiquement

Par

Réjane MARTIN

Le 7 juillet 2023

TITRE

Évaluation rétrospective de la performance diagnostique d'un logiciel d'IA dans la détection de fractures osseuses périphériques chez des enfants de moins de 2 ans lors de suspicion de traumatisme non accidentel.

Assessment of AI performance for the detection of bone fractures in children aged less than 2 years old in suspected child abuse setting.

Directeur de thèse : Dr Olivier PRODHOMME

JURY

Présidente : Pr Ingrid MILLET

Assesseurs : Pr Catherine CYTEVAL ; Dr Olivier PRODHOMME

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER
FACULTE DE MEDECINE MONTPELLIER-NIMES

THESE

Pour obtenir le titre de
DOCTEUR EN MÉDECINE

Présentée et soutenue publiquement

Par

Réjane MARTIN

Le 7 juillet 2023

TITRE

Évaluation rétrospective de la performance diagnostique d'un logiciel d'IA dans la détection de fractures osseuses périphériques chez des enfants de moins de 2 ans lors de suspicion de traumatisme non accidentel.

Assessment of AI performance for the detection of bone fractures in children aged less than 2 years old in suspected child abuse setting.

Directeur de thèse : Dr Olivier PRODHOMME

JURY

Président : Pr Ingrid MILLET

Assesseurs : Pr Catherine CYTEVAL ; Dr Olivier PRODHOMME

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2022-2023

PERSONNEL ENSEIGNANT

Professeurs Honoraires

ALBAT Bernard	BRUNEL Michel	HERTAULT Jean	NAVARRO Maurice
ALLIEU Yves	CAMU William	HUMEAU Claude	NAVRATIL Henri
ALRIC Robert	CANAUD Bernard	JAFFIOL Claude	OTHONIEL Jacques
ARNAUD Bernard	CHAPTAL Paul-André	JANBON Charles	PAGES Michel
ASENCIO Gérard	CIURANA Albert-Jean	JANBON François	PEGURET Claude
ASTRUC Jacques	CLOT Jacques	JARRY Daniel	PELISSIER Jacques
AUSSILLOUX Charles	COSTA Pierre	JOURDAN Jacques	PETIT Pierre
AVEROUS Michel	COTTALORDA Jérôme	KLEIN Bernard	POUGET Régis
AYRAL Guy	D'ATHIS Françoise	LAFFARGUE François	PUJOL Henri
BAILLAT Xavier	DEMAILLE Jacques	LALLEMANT Jean Gabriel	RABISCHONG Pierre
BALDET Pierre	DESCOMPS Bernard	LAMARQUE Jean-Louis	RAMUZ Michel
BALDY-MOULINIER Michel	DIMEGLIO Alain	LAPEYRIE Henri	REBOUL Jean
BALMES Jean-Louis	DUBOIS Jean Bernard	LEROUX Jean-Louis	RIEU Daniel
BANSARD Nicole	DUJOLS Pierre	LESBROS Daniel	ROCHEFORT Henri
BILLIARD Michel	DUMAZER Romain	LOPEZ François Michel	ROUANET DE VIGNE LAVIT Jean Pierre
BLARD Jean-Marie	ECHENNE Bernard	LORIOT Jean	SAINT-AUBERT Bernard
BLAYAC Jean Pierre	FABRE Serge	LOUBATIERES Marie Madeleine	SANCHO-GARNIER Hélène
BLOTMAN Francis	FREREBEAU Philippe	MAGNAN DE BORNIER Bernard	SANY Jacques
BONNEL François	GALIFER René Benoît	MARTY ANE Charles	SEGNARBIEUX François
BOURGEOIS Jean-Marie	GODLEWSKI Guilhem	MATHIEU-DAUDE Pierre	SENAC Jean-Paul

BOUSQUET
Jean

GRASSET Daniel

MEYNADIER Jean

SERRE Arlette

BRUEL Jean
Michel

GUILHOU Jean-
Jacques

MICHEL François-
Bernard

TOUITOU Isabelle

BUREAU Jean-
Paul

GUI TER Pierre

MION Charles

VIDAL Jacques

HEDON berbard

MIRO Luis

VISIER Jean Pierre

Professeurs Émérites

ARTUS Jean-Claude	JONQUET Olivier
BASTIEN Patrick	LANDAIS Paul
BLANC François	LARREY Dominique
BONAFE Alain	LE QUELLEC Alain
BOULENGER Jean- Philippe	MARES Pierre
BOURREL Gérard	MAUDELONDE Thierry
BRINGER Jacques	MAURY Michèle
CLAUSTRES Mireille	MESSNER Patrick
COMBE Bernard	MILLAT Bertrand
DAURES Jean-Pierre	MONNIER Louis
DAUZAT Michel	MOURAD Georges
DAVY Jean-Marc	PREFAUT Christian
DEDET Jean-Pierre	PUJOL Rémy
DE LA COUSSAYE Jean- Emmanuel	RIBSTEIN Jean
GROLLEAU RAOUX Robert	SCHVED Jean- François
GUERRIER Bernard	SULTAN Charles
GUILLOT Bernard	TOUCHON Jacques
HERISSON Christian	UZIEL Alain

Docteurs Émérites

VOISIN Michel	PRAT Dominique
ZANCA Michel	PUJOL Joseph

Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers

PU-PH de classe exceptionnelle

AGUILAR MARTINEZ Patricia	Hématologie ; transfusion
ALRIC Pierre	Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire (option chirurgie vasculaire)
AVIGNON Antoine	Nutrition
AZRIA David	Cancérologie ; radiothérapie
BACCINO Éric	Médecine légale et droit de la santé
BEREGI Jean-Paul	Radiologie et imagerie médicale
BLAIN Hubert	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
BOULOT Pierre	Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
CAMBONIE Gilles	Pédiatrie
CANOVAS François	Anatomie
CAPDEVILA Xavier	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
CHAMMAS Michel	Chirurgie orthopédique et traumatologique
COLSON Pascal	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
COSTES Valérie	Anatomie et cytologie pathologiques
COUBES Philippe	Neurochirurgie
COURTET Philippe	Psychiatrie d'adultes ; addictologie
CRAMPETTE Louis	Oto-rhino-laryngologie
CRISTOL Jean Paul	Biochimie et biologie moléculaire
CYTEVAL Catherine	Radiologie et imagerie médicale
DAUVILLIERS Yves	Physiologie
DE TAYRAC Renaud	Gynécologie-obstétrique, gynécologie médicale
DE WAZIERES Benoît	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
DELAPORTE Éric	Maladies infectieuses ; maladies tropicales
DEMARIA Roland	Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
DEMOLY Pascal	Pneumologie ; addictologie
DEREURE Olivier	Dermatologie - vénéréologie
DOMERGUE Jacques	Chirurgie viscérale et digestive

DUFFAU Hugues

Neurochirurgie

ELIAOU Jean
François

Immunologie

FABRE Jean Michel

Chirurgie viscérale et digestive

HAMAMAH Samir	Biologie et Médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
JABER Samir	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
JEANDEL Claude	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
JORGENSEN Christian	Thérapeutique ; médecine d'urgence ; addictologie
KOENIG Michel	Génétique
KOTZKI Pierre Olivier	Biophysique et médecine nucléaire
LABAUGE Pierre	Neurologie
LAFFONT Isabelle	Médecine physique et de réadaptation
LECLERCQ Florence	Cardiologie
LEFRANT Jean-Yves	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
LEHMANN Sylvain	Biochimie et biologie moléculaire
LUMBROSO Serge	Biochimie et Biologie moléculaire
MARIANO-GOULART Denis	Biophysique et médecine nucléaire
MERCIER Jacques	Physiologie
MEUNIER Laurent	Dermato-vénéréologie
MONDAIN Michel	Oto-rhino-laryngologie
MORIN Denis	Pédiatrie
PAGEAUX Georges-Philippe	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
PRUDHOMME Michel	Anatomie
PUJOL Pascal	Biologie cellulaire
QUERE Isabelle	Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire (option médecine vasculaire)
RENARD Éric	Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques ; gynécologie médicale
REYNES Jacques	Maladies infectieuses, maladies tropicales
RIPART Jacques	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
ROUANET Philippe	Cancérologie ; radiothérapie
SOTTO Albert	Maladies infectieuses ; maladies tropicales
TAOUREL Patrice	Radiologie et imagerie médicale
TRAN Tu-Anh	Pédiatrie
VANDE PERRE Philippe	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière

VERNHET Hélène

Radiologie et imagerie médicale

YCHOU Marc

Cancérologie ; radiothérapie

PU-PH de 1^{re} classe

ASSENAT Éric	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
BAGHDADLI Amaria	Pédopsychiatrie ; addictologie
BLANC Pierre	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
BORIE Frédéric	Chirurgie viscérale et digestive
BOURDIN Arnaud	Pneumologie ; addictologie
BOURGIER Céline	Cancérologie ; radiothérapie
CAPTIER Guillaume	Anatomie
CARTRON Guillaume	Hématologie ; transfusion
CAYLA Guillaume	Cardiologie
CHANQUES Gérald	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
CORBEAU Pierre	Immunologie
COULET Bertrand	Chirurgie orthopédique et traumatologique
CUVILLON Philippe	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
DADURE Christophe	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
DE VOS John	Histologie, embryologie et cytogénétique
DROUPY Stéphane	Urologie
DUCROS Anne	Neurologie
DUPEYRON Arnaud	Médecine physique et de réadaptation
FESLER Pierre	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
GARREL Renaud	Oto-rhino-laryngologie
GENEVIEVE David	Génétique
GUILLAUME Sébastien	Psychiatrie d'adultes ; addictologie
GUILPAIN Philippe	Médecine Interne, gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie
GUIU Boris	Radiologie et imagerie médicale
HAYOT Maurice	Physiologie
HOUEDE Nadine	Cancérologie ; radiothérapie
JACOT William	Cancérologie ; Radiothérapie
JUNG Boris	Médecine intensive-réanimation
KALFA Nicolas	Chirurgie infantile

KLOUCHE Kada	Médecine intensive-réanimation
KOUYOUMDJIAN Pascal	Chirurgie orthopédique et traumatologique
LACHAUD Laurence	Parasitologie et mycologie
LAVABRE-BERTRAND Thierry	Histologie, embryologie et cytogénétique
LAVIGNE Jean-Philippe	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
LE MOING Vincent	Maladies infectieuses ; maladies tropicales
LETOUZEY Vincent	Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
MATECKI Stéfan	Physiologie
MORANNE Olivier	Néphrologie
MOREL Jacques	Rhumatologie
NAGOT Nicolas	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de la communication
NAVARRO Francis	Chirurgie viscérale et digestive
NOCCA David	Chirurgie viscérale et digestive
PANARO Fabrizio	Chirurgie viscérale et digestive
PASQUIE Jean-Luc	Cardiologie
PEREZ MARTIN Antonia	Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire (option médecine vasculaire)
PERNEY Pascal	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie
PUJOL Jean Louis	Pneumologie ; addictologie
PURPER-OUAKIL Diane	Pédopsychiatrie ; addictologie
RIGAU Valérie	Anatomie et cytologie pathologiques
ROGER Pascal	Anatomie et cytologie pathologiques
ROUBILLE François	Cardiologie
SOLASSOL Jérôme	Biologie cellulaire
SULTAN Ariane	Nutrition
VINCENT Thierry	Immunologie
<u>PU-PH de 2ème classe</u>	
AYRIGNAC Xavier	Neurologie
BELZEAUX Raoul	Psychiatrie d'adultes ; Addictologie
BERTRAND Martin	Anatomie
BOBBIA Xavier	Médecine d'urgence

CANAUD Ludovic	Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire (option chirurgie vasculaire)
CAPDEVIELLE Delphine	Psychiatrie d'Adultes ; addictologie
CLARET Pierre-Géraud	Médecine d'urgence
COLOMBO Pierre-Emmanuel	Cancérologie ; radiothérapie
COSTALAT Vincent	Radiologie et imagerie médicale
DAIEN Vincent	Ophtalmologie
DE JONG Audrey	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
DONNADIEU Hélène	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
DORANDEU Anne	Médecine légale et droit de la santé
FAILLIE Jean-Luc	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
FRANDON Julien	Radiologie et imagerie médicale
FUCHS Florent	Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
GABELLE DELOUSTAL Audrey	Neurologie
GANDET Thomas	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
GAUJOUX Viala Cécile	Rhumatologie
GELIS Anthony	Médecine physique et de réadaptation
GODREUIL Sylvain	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
HERLIN Christian	Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique, brûlologie
IMMEDIATO DAIEN Claire	Rhumatologie
JEZIORSKI Éric	Pédiatrie
LALLEMANT Benjamin	Oto-rhino-laryngologie
LATTUCA Benoît	Cardiologie
LE QUINTREC DONNETTE Moglie	Néphrologie
LONJON Nicolas	Neurochirurgie
LOPEZ CASTROMAN Jorge	Psychiatrie d'Adultes ; addictologie
LUKAS Cédric	Rhumatologie
MAKINSON Alain	Maladies infectieuses, Maladies tropicales
MENJOT de CHAMPFLEUR Nicolas	Radiologie et imagerie médicale
MILLET Ingrid	Radiologie et imagerie médicale
MURA Thibault	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de la communication
OLIE Émilie	Psychiatrie d'adultes ; addictologie

PARIS Françoise	Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
PELLESTOR Franck	Histologie, embryologie et cytogénétique
PERS Yves-Marie	Thérapeutique ; addictologie
POUDEROUX Philippe	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
RIVIER François	Pédiatrie
ROGER Claire	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
ROSSI Jean François	Hématologie ; transfusion
SEBBANE Mustapha	Médecine d'urgence
SIRVENT Nicolas	Pédiatrie
STERKERS Yvon	Parasitologie et mycologie
STOEBNER Pierre	Dermato-vénérologie
THOUVENOT Éric	Neurologie
THURET Rodolphe	Urologie
TUAILLON Edouard	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
VENAIL Frédéric	Oto-rhino-laryngologie
VILLAIN Max	Ophtalmologie
VINCENT Denis	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement, médecine générale, addictologie

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

1^{re} classe :

COLINGE Jacques (Cancérologie, Signalisation cellulaire et systèmes complexes)

LAOUDJ CHENIVESSE Dalila (Biochimie et biologie moléculaire)

VISIER Laurent (Sociologie, démographie)

2^{ème} classe :

CHAZAL Nathalie (Biologie cellulaire)

MOREAUX Jérôme (Sciences biologiques fondamentales et cliniques)

PROFESSEURS DES UNIVERSITES - Médecine générale

1^{re} classe :

AMOUYAL Michel

PROFESSEURS ASSOCIES - Médecine Générale

CLARY Bernard

GARCIA Marc

MILLION Elodie

REBOUL Marie-Catherine

PROFESSEURS ASSOCIES - Médecine

BESSIS Didier (Dermato-vénérologie)

DEBIEN Blaise (Médecine d'urgence)

MEUNIER Isabelle (Ophtalmologie)

MULLER Laurent (Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire)

PERRIGAULT Pierre-François (Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire)

QUANTIN Xavier (Pneumologie)

ROUBERTIE Agathe
(Pédiatrie)

VIEL Eric (Soins palliatifs et traitement de la douleur)

Maîtres de Conférences des Universités - Praticiens Hospitaliers

MCU-PH Hors classe - Échelon Exceptionnel

MARTRILLE Laurent Médecine légale et droit de la santé

RICHARD Bruno Médecine palliative

MCU-PH Hors classe

BADIOU Stéphanie Biochimie et biologie moléculaire

BOUDOUSQ Vincent Biophysique et médecine nucléaire

BOULLE Nathalie Biologie cellulaire

CACHEUX-RATABOUL Valère Génétique

CARRIERE Christian Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière

CHARACHON Sylvie Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière

FABBRO-PERAY Pascale Épidémiologie, économie de la santé et prévention

GIANSILY-BLAIZOT Muriel Hématologie ; transfusion

MCU-PH de 1^{re} classe

BRET Caroline	Hématologie biologique
BROUILLET Sophie	Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
CHIRIAC Anca	Immunologie
COSSEE Mireille	Génétique
FITENI Frédéric	Cancérologie ; radiothérapie
GIRARDET-BESSIS Anne	Biochimie et biologie moléculaire
HERRERO Astrid	Chirurgie viscérale et digestive
LAVIGNE Géraldine	Hématologie ; transfusion
LESAGE François-Xavier	Médecine et Santé au Travail
MATHIEU Olivier	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
MOUZAT Kévin	Biochimie et biologie moléculaire
PANABIÈRES Catherine	Biologie cellulaire
PANTEL Alix	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
RAVEL Christophe	Parasitologie et mycologie
ROUBILLE Camille	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie
SCHUSTER-BECK Iris	Physiologie
SZABLEWSKY	Anatomie et cytologie pathologiques
THEVENIN-RENE Céline	Immunologie

MCU-PH de 2^{ème} classe

BARATEAU Lucie	Physiologie
BERGOUIGNOUX Anne	Génétique
BOETTO Julien	Neurochirurgie
DESHAYES Emmanuel	Biophysique et médecine nucléaire
DUFLOS Claire	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de la communication
DU THANH Aurélie	Dermato-vénéréologie
ENGELMANN Ilka	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
GATINOIS Vincent	Histologie, embryologie et cytogénétique
GOUZI Farès	Physiologie
HERBAUX Charles	Hématologie, transfusion

HUBERLANT Stéphanie	Gynécologie-obstétrique ; Gynécologie médicale
LEVEQUE Maude	Parasitologie et mycologie
MARIA Alexandre	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie
RANISAVELJEVIC Noémie	Biologie et médecine du développement et de la reproduction; Gynécologie médicale
SOUCHE François- Régis	Chirurgie viscérale et digestive

Maitres de Conférences des Universités

Maitres de Conférences hors classe

BECAMEL Carine	Neurosciences
DELABY Constance	Biochimie et biologie moléculaire
MAIMOUN Laurent	Sciences physico-chimiques et ingénierie appliquée à la santé

Maitres de Conférences de classe normale

CHAUMONT- DUBEL Séverine	Sciences du médicament et des autres produits de santé
GUGLIELMI Laurence	Sciences biologiques fondamentales et cliniques
HENRY Laurent	Sciences biologiques fondamentales et cliniques
HERBET Guillaume	Neurosciences
HERVE ANDRE Émilie	
LADRET Véronique	Mathématiques appliquées et applications des mathématiques
LAINÉ Sébastien	Sciences du Médicament et autres produits de santé
LE GALLIC Lionel	Sciences du médicament et autres produits de santé
LOZZA Catherine	Sciences physico-chimiques et technologies pharmaceutiques
MORITZ-GASSER Sylvie	Neurosciences
MOUTOT Gilles	Philosophie
PASSERIEUX Émilie	Physiologie
RAMIREZ Jean- Marie	Histologie
RAYNAUD Fabrice	Sciences du Médicament et autres produits de santé
TAULAN Magali	Biologie Cellulaire

Maîtres de Conférences des Universités - Médecine Générale

MCU-MG de 1^{re} classe

COSTA David

OUDE ENGBERINK
Agnès

MCU-MG de 2^{ème} classe

FOLCO-LOGNOS
Béatrice

CARBONNEL
François

Maîtres de Conférences associés - Médecine Générale

BADIN Mélanie

CAMPAGNAC
Jérôme

LOPEZ Antonio

MINET Mathilde

PAVAGEAU Sylvain

SERAYET Philippe

Praticiens Hospitaliers Universitaires

CAZAUBON Yoann	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
DAGNEAUX Louis	Chirurgie orthopédique et traumatologique
GAVOTTO Arthur	Pédiatrie
GOULABCHAND Radjiv	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie
MIOT Stéphanie	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie
POULEN Gaetan	Neurochirurgie
ROCH Benoît	Pneumologie, addictologie
URSIC José BEDOYA	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie

PH chargés d'enseignements

ABOUKRAT Patrick	CASPER Thierry	GROSSIN Delphine	PICARD Éric
AGUILHON Sylvain	CASSINOTTO Christophe	GUEDJ Anne Marie	PICOT Marie Christine
AKKARI Mohamed	CATHALA Philippe	GUYON Gaël	POQUET Hélène
ALRIC Jérôme	CAZABAN Michel	HEDON Christophe	PUJOL Sarah-Lise
AMEDRO Pascal	CHARBIT Jonathan	HENRY Vincent	PUPIER Florence
AMOUROUX Cyril	CHEVALLIER Thierry	JAMMET Patrick	QUANTIN Xavier
ANTOINE Valéry	CHEVALLIER-MICHAUD Jo	JEDRYKA François	RAFFARD Laurence
ARQUIZAN Caroline	COLIN Olivier	JREIGE Riad	RAPIDO Francesca
ATTALIN Vincent	CONEJERO Ismael	KINNE Mélanie	RIBRAULT Alice
BADR Maliha	CONSEIL Mathieu	LABARIAS Coralie	RICHAUD-MOREL Brigitte
BAIS Céline	CORBEAU Catherine	LABORDE Caroline	RIDOLFO Jérôme
BARBAR Saber Davide	COROIAN Flavia-Oana	LACAMBRE Mathieu	RIPART Sylvie
BASSET Didier	COUDRAY Sarah	LANG Philippe	RONGIERES Michel
BATIFOL Dominique	CUNTZ Danielle	LAZERGES Cyril	ROULET Agnès
BATTISTELLA Pascal	DARDALHON Brigitte	LE GUILLOU Cédric	RUBENOVITCH Josh
BAUCHET Luc	DAVID Aurore	LEGLISE Marie Suzanne	SANTONI Fannie
BELL Ariane	DE BOUTRAY Marie	LE MOINE DONY Marie-Christine	SASSO Milène
BENEZECH Jean-Pierre	DE LA TRIBONNIÈRE Xavie	LETERTRE Simon	SCHULDINER Sophie
BENNYS Karim	DEBIEN Blaise	LOPEZ Régis	SEGURET Fabienne
BERNARD Nathalie	DELPONT Marion	LUQUIENS Amandine	SENESSE Pierre
BERTCHANSKY Ivan	DENIS Hélène	MANZANERA Cyril	SERRE Jean-Emmanuel
BIBOULET Philippe	DEVILLE de PERIERE Gilles	MARGUERITTE Emmanuel	SKALLI EI Medhi
BIRON-ANDREANI Christine	DI CASTRI Alberto	MARTIN Lucille	SOLA Christelle
BLANC Brigitte	DJANIKIAN Flora	MATTATIA Laurent	SOULLIER Camille

BLANCHARD Sylvie	FAIDHERBE Jacques	MEROUEH Fadi	SOUKSI Isabelle	MEDIONI
BLANCHET Catherine	FATTON Brigitte	MEYER Pierre	STOEBNER Anne	DELBARRE
BLATIERE Véronique	FAUCHERRE Vincent	MICHEL Moïse	TEOT Luc	
BOGE Gudrun	FAURE Elsa	MILESI Christophe	THIRION Marina	
BOURRAIN Jean Luc	FILLERON Anne	MORAU Estelle	TUNEZ Virginie	
BOUYABRINE Hassan	FILLOLS Mélanie	MORQUIN David	VACHIERY-LAHAYE Florence	
BRINGER-DEUTSCH Sophie	FOURNIER Philippe	MOSER Camille	VERNES Eric	
BRINGUIER BRANCHEREAU Sophie	GAILLARD Nicolas	MOUSTY Eve	VIALA Maurice	
BRISOT Dominique	GALMICHE Sophie	MOUTERDE Gaël	VINCENT Laure	
BRONER Jonathan	GENY Christian	PERNIN Vincent	WAGNER Laurent	
CAIMMI Davide Paolo	GERONIMI Laetitia	PERRIGAULT Pierre François	WALTHER Ulrike	LOUVIER
CARR Julie	GINIES Patrick	PEYRON Antoine	Pierre- ZERKOWSKI Laetitia	
CARTIER César	GRECO Frédéric			

REMERCIEMENTS

Aux membres de mon jury,

À ma présidente de jury, **Professeure Ingrid Millet**, pour le partage de votre savoir avec tant de pédagogie, de bienveillance et d'humilité, qui nous permettent à tous de progresser. Votre expérience et vos connaissances ont grandement contribué à ma formation et ont été essentiels à l'élaboration de ce projet.

À mon directeur de thèse, **Docteur Olivier Prodhomme**, merci pour votre gentillesse et votre inestimable expertise sans qui ce travail n'aurait pu se concrétiser. C'est une grande chance d'apprendre la radiopédiatrie à vos côtés, et je suis ravie de pouvoir les approfondir davantage très prochainement.

À la Professeure Cyteval, pour votre expérience et vos connaissances livresques qui ont grandement participé à ma formation et à développer mes compétences en imagerie ostéoarticulaire, toujours avec le sourire et gentillesse. J'ai hâte d'avoir la chance de retravailler à vos côtés.

À ceux qui ont permis l'aboutissement de ce travail,

À Céline, sans qui ce travail n'aurait été possible. Merci pour ta disponibilité et ta bonne humeur.

À l'équipe du Pr Molinari, à Fanchon Herman, merci pour votre implication et votre aide pour les analyses statistiques.

À tous les chefs et professeurs qui ont contribué à ma formation,

À l'équipe de radiopédiatrie,

Merci à **Anne-Hélène, Catherine, Charlotte, Ikram, Julie, Magali, Stéphanie et Olivier** de m'avoir accueilli dans votre équipe avec bienveillance et pédagogie pendant ces bien trop courts 3 mois de stage. Les appendices en échographie n'ont (presque) plus de secret pour moi et ma résistance aux pleurs a grandement augmenté. À très bientôt.

À l'équipe du CHU de Lapeyronnie,

Merci au **Pr Cyteval, Yann, Marie-Pierre, Arthur, Ugo, William** de m'avoir tant appris en ostéoarticulaire, toujours avec classe et décontraction, une tasse de café chaud à la main.

À Arthur, pour m'avoir fait partager ton amour du rachis et des pauses café efficaces, ton humilité, et ton engagement et humanité avec les patients.

À Ugo, je n'ai pas réussi mon défi mais je ne m'avoue pas vaincue pour autant, merci pour le partage de tes connaissances et pour ta patience.

Merci au **Pr Taourel, Pr Millet, Caroline, Cécile, Emma, Fernanda, Jessica, Nadia et Quentin** pour me permettre de devenir chaque jour un meilleur radiologue de l'urgence.

À Juliette, merci pour ton accompagnement, ta joie et tous ces petits encas sucrés qui illuminent nos gardes.

À l'équipe de l'Institut Curie,

Merci au **Dr Brisse**, merci pour le partage de votre érudition avec bienveillance et rigueur. Grâce à vous, j'en sais un peu plus sur les mystères et secrets des pseudomyxomes péritonéaux.

Merci à **Toulsie, Manel et l'ensemble des chefs** pour votre implication et votre gentillesse, travailler avec vous fut un vrai plaisir, j'ai tant appris à vos côtés.

À l'équipe du CHU d'Arnaud de Villeneuve,

Merci au **Pr Vernhet-Kovacsik, à Hamid, Juliette, Sébastien, Valérie**, pour m'avoir appris l'autonomie en cardio-vasculaire, aucun picc-line et porth-à-cath ne peut me résister à présent.

Merci à **Benoît** pour ton accompagnement, ton humour pragmatique et décalé et surtout ta bonne humeur avec nous. J'espère que tu trouves ton bonheur à Perpignan, en tout cas ils ont beaucoup de chance de te compter parmi eux.

À l'équipe du CHU de Guy de Chauliac,

Merci au **Pr Costalat, Pr Menjot de Champfleury, à Arthur, Carlos, Cyril, Imad, Frederico, Gregory, Medhi, Nicolas, et Pierre-Henri**, pour m'avoir appris à l'autonomie et la gestion d'un envahissant DECT et surtout à ne plus rater de thrombose veineuse cérébrale.

Merci à **Eve et Mathilde** pour avoir été des soutiens sans faille en garde et au quotidien, avec beaucoup de bienveillance et d'enthousiasme.

À l'équipe du CHU de Saint Eloi,

Merci au **Pr Guiu, à Ali, Bashir, Carole, Christophe, Laure, Lauranne, Marie-Ange, Margaux et Valentina** pour m'avoir fait découvrir l'imagerie digestive avec toujours beaucoup de patience et de bienveillance. Rien de mieux qu'un petit RECIST pour commencer de bon matin et bien finir la journée à coup de foie gado.

À l'équipe du CHU de Nîmes,

Merci à **Adel, Aymeric, Élise, Nadir, Philippe et Taki** de m'avoir accompagné dans mes premiers pas, parfois laborieux, en radiologie et de m'avoir fait aimer cette spécialité si riche.

À l'équipe de radiologie de Sète,

Merci à **Rachid** pour ton compagnonnage et ta bienveillance. J'espère t'avoir prouvé les bienfaits du café quotidien à la terrasse de l'internat. Mon passage à Sète n'aurait pas été le même sans toi.

À l'équipe de radiologie du Parc,

Merci à **Delphine, Denis, Eric** pour m'apprendre chaque jour à devenir une meilleure radiologue ostéoarticulaire, j'espère un jour atteindre au moins 10% de votre efficacité légendaire et de vos connaissances.

À l'équipe de médecine interne de Beausoleil,

Merci à **Christophe, Sébastien, les Sylvie(s) et Bérangère** d'être des modèles d'humanité, de bienveillance et d'implication dans leur travail. J'espère un jour être à la hauteur de votre enseignement et votre érudition, mon bref passage en médecine interne restera une étape essentielle et inoubliable de mon parcours.

À l'équipe du MIT du CHU de Nîmes,

Au **Pr Sotto** pour votre gentillesse, votre humour légendaire, vous avez fait de moi une meilleure clinicienne, les recos américaines des IU n'ont plus de secret pour moi !

À mes nombreux co-internes qui m'ont tant apporté,

À Agathe, mon éphémère mais si géniale co-interne d'infectiologie, heureusement qu'on a su rattraper en soirée les moments qu'on n'aura pas passé en stage.

À Azhar, pour ta perpétuelle bonne humeur, ta motivation à toute épreuve et surtout ton amour de la ponctualité, un co-interne parfait que tout le monde aime avoir à ses côtés.

À Chakir, pour ton courage, ta détermination, tes conseils, ton mythique "merci pour les patients". Nos pauses café potin entre deux ponctions d'ascite ont égayé notre semestre passé ensemble. J'ai hâte de voir grandir ta petite famille.

À Clément, pour ta capacité à étendre autour de toi ta bonne humeur et ta passion des RECIST, j'espère que tu as trouvé ton bonheur dans le monde sombre de l'endoscopie.

À Fabien, ta façon plus que nonchalante de répondre au téléphone, ton réalisme désabusé a su alimenter de nombreuses discussions et tellement de fous rires ! Merci d'être un co-interne aussi prévenant, toujours prêt à se retrousser les manches pour aider.

À **Laurie-Anne**, merci pour ton sourire, ta gentillesse et d'être une aussi bonne référente que co-interne, travailler à tes côtés est toujours un plaisir.

À **Mathieu**, merci d'avoir aussi bien veillé sur la jeune phase socle que j'étais et d'incarner la force tranquille.

À **Paul**, pour nos si agréables déjeuners au bord du Lez, nos potins et flemmes quotidiennes et notre amour partagé de la pédiatrie. Je compte sur toi pour me faire découvrir Marseille un jour.

À **Philippe**, sans toi je ne serais pas là aujourd'hui, tu as su éclairer mon chemin vers l'imagerie quand j'étais en plein doute. J'espère un jour avoir autant de talent que toi en imagerie et photographie. Merci de nous avoir reçu dans votre tout nouveau havre de paix avec **Céline**, hâte de revenir partager des BBQ en aussi bonne compagnie.

À **Renaud**, le maître des plannings, ta force de travail, ton franc-parler avec toujours beaucoup d'humour, ta présence dans les moments difficiles font de toi un co-interne de choix avec qui j'ai adoré travailler.

À **Thorgal et Malou**, l'équipe de choc de la radiopédiatrie, merci pour ce semestre incroyable passé à vos côtés. Merci **Malou** pour ta curiosité, ta motivation et d'avoir supporté nos calculs stratégiques sur les choix de stage et toutes ces pauses midi dehors en plein hiver. **Thorgal**, on ne peut pas espérer meilleur co-interne, l'homme qui fait les ETF plus vite que son ombre mais toujours chaud pour une pause café. Hâte de reprendre nos discussions passionnées sur Hogwarts Legacy et à très vite en radiopédiatrie.

À mes co-internes de médecine interne, **Angèle, Aurélie, Odile, Valérian** pour ce semestre de rire et de bonne humeur à la recherche de l'anticorps perdu. Valérian, mon binôme de médecine interne "les valériannes", chaque jour à tes côtés fut riche en challenge que ce soit pour tes connaissances livresques ou ton humour acéré. Aurélie, pour ton humanité, ton sérieux, les patients ont beaucoup de chance de t'avoir.

À mes co-internes parisiens, **Cherifa, Francesca, Ilan, Joséphine, Léa, Louis, Xavier-Louis** de m'avoir si bien accueilli, de m'avoir appris à mettre des merguez dans mes compte-rendus et le plaisir de quelques bières au Chouff'bar où les langues se délient. Hâte de vous revoir très bientôt sur Montpellier.

À mes cointernes de promo, **Louis, Jules, Marine, Julien** avec qui je n'ai pas eu la chance de partager un semestre mais avec qui j'ai toujours envie de partager une bonne bière.

À **Anthony, Catherine, Celia, Elaura, Jean-Baptiste, Julien, Justine, François-Louis, Mathieu, Maxime, Nicolas, Océane, Rémi, Satcha, Thomas**, et à tous les autres co-internes et chefs.

À tous les **manipulateurs radio, infirmières, aides-soignantes et secrétaires** qui ont parfois (souvent) partagé mon désarroi et mes galères, avec beaucoup de patience et de bienveillance.

À mes amis parisiens,

À **Marie S**, nos soirées Downton Abbey (#tesmeilleuressiestes) et ta crédulité légendaire devant S&C me manquent, les 964 km qui nous séparent à présent ne mettront pas fin à notre amitié. J'espère que tu as trouvé le bonheur dans tes contrées pluvieuses, à très vite.

À **Xenia**, notre passion commune de Harry Potter qui nous a réunis, toutes ses soirées mouvementées rue de Lappe, nos souvenirs épiques à Thorigny, mon adolescence aurait été bien ennuyeuse sans toi à mes côtés.

À la dream team,

À **Aurélie**, merci d'être toi, merci d'être là depuis 20 ans à mes côtés, tant de merveilleux souvenirs d'enfance, notre passion schtroumpfesque et des jeux vidéo ont été le ciment de notre amitié. Je n'aurais pas été la même sans toi, je n'ai pas de mots suffisamment forts pour te transmettre mon amitié et toute ma reconnaissance d'avoir été là aussi bien dans les bons que dans les mauvais moments. Merci.

À **Nanou**, une vraie amitié qui ne changera jamais, merci pour ta gentillesse, ton écoute et ton attention envers les autres, tu as toujours été un exemple pour moi. Nos soirées jeux de société, nos discussions tardives le long du canal Saint-Martin, nos réflexions sur notre manque pathologique de confiance en soi, tes préparations de cocktails sont de précieux souvenirs, j'espère pouvoir en créer tellement d'autres. Merci à **Maxime** de partager ton chemin, et de t'apporter tout le soutien et l'amour que tu mérites depuis maintenant plus de 10 ans.

Aux apéro-khôleurs,

À Jalel, pour ton écoute, ta perpétuelle bonne humeur, ton humour acéré et ton humanité. Je ne sais pas si j'ai hâte de regoûter un de tes plats maison, mais chaque moment passé avec toi me remplit de joie. Merci de m'avoir appris à m'ouvrir, nos discussions jusqu'au bout de la nuit sont de précieux souvenirs. Merci d'être toi.

À Marie C, une cuisinière incroyable, une amie en or et une obstétricienne de renom ! Merci d'avoir rendu nos révisions si agréables, l'intérêt des pouces dans les radios est enfin devenu un "must to know" pour réussir brillamment l'ECN. Tu es un modèle de courage pour nous, merci d'être une amie si attentionnée, je suis heureuse de t'avoir à mes côtés.

À Maxime, merci pour ton sourire éclatant, tes encouragements quotidiens et cet émerveillement visuel devant cette fantastique panoplie de chemise à carreaux. Sans toi, l'externat aurait été tellement moins fun, merci d'avoir contribué à mon bonheur. Je te souhaite plein de bonnes choses au futur PUPH Fosset, tu les mérites tellement.

À Olivier, un Serdaigle ascendant Poufsouffle, mon plus redoutable rival et mon meilleur allié des jeux de société, je redoute encore le jour où nous partagerons une partie de Res Arcana. Merci d'avoir les mots justes dans les situations les plus difficiles, et d'être un ami sur lequel je pourrai toujours compter. Merci de rendre Aurélie si heureuse et apaisée. PS : merci de m'avoir appris un truc un jour ;)

Aux théâtres de la paillasses,

À Guillaume, pour ton engagement envers les patients et les sujets qui te tiennent à cœur, ta détermination et ta bienveillance qui font de toi une personne que j'admire. J'ai hâte de voir l'héliportage de la Tiny house !

À Jana, pour ton humour et nos discussions nocturnes, on a peu l'occasion de se voir et pourtant tellement de choses à se raconter. À très vite j'espère.

À Jeanne, mon coup de cœur de l'externat, merci pour nos moments de rire, ta gentillesse et ton écoute. Même si tu doutes souvent, je croirais suffisamment en toi pour deux.

À Sarah, nos soirées films d'auteurs, nos sorties ménagerie et surtout les afters hautes en couleur sont des souvenirs que je chérirais longtemps.

À tous les autres théâtres et assimilés **Adrien, Alexandra, Alexandre, Alice, Anne, Antoine, Aurélien, Benjamin, Camille, Carine, Gwenaëlle, Manon, Marie, Maxime, Jalel, Jeremy, Pauline, Philippine, Olivier, Tristan**, nos vacances passées ensemble sont remplies de tellement beaux souvenirs, j'espère pouvoir en créer d'autres avec vous.

À mes amis montpelliérains,

À mes anciens colocataires,

À Marion, le rayon de soleil de la collocation, ton humour involontaire et ta perpétuelle bonne humeur (que Jude a su challenger régulièrement par ses cadeaux intempestifs) ont fait de toi une collocation de rêve. J'espère encore partager avec toi de nombreuses randonnées et voies d'escalade et surtout plein d'apéro. Je sais qu'un jour je ne pourrai échapper à Pitch Perfect 3...

À Armel, notre éternel adolescent, vrai amoureux du ménage, de la gastronomie industrielle, de la K-pop et des crêpes salées, merci pour tous nos fous rires et débats endiablés, sans toi cette collocation aurait été bien trop sage. J'espère que toutes ses soirées à refaire (ou pas) le monde ensemble ne sont que le début d'une longue et belle amitié.

À Élise, merci pour ton ouverture d'esprit, ta gentillesse et tes bons plans théâtre. Tu as su nous régaler avec ton inventivité culinaire et les mille et une façons de manger des pois chiches et du chou rouge. Je ne désespère pas de te faire aimer le seigneur des anneaux.

À la team QLF,

À Clémence, petite par la taille comme ses patients, mais grande par le caractère, impossible de la rater malheureusement (je t'entends déjà dire "Ah la p*** !"), une si belle découverte qui a illuminé mon début d'internat, une vraie battante toujours de bonne humeur, qui a su me faire rire et me toucher. J'espère qu'on aura très vite l'occasion de partager des potins et de refaire du cheval ensemble. **À Nausicaa** pour son caractère bien trempé et sa mignonnerie à l'image de ta maîtresse.

À Marion, une rencontre incroyable, je suis toujours en admiration devant ton énergie inépuisable, ton humour acéré (jamais beauf évidemment) et le grain de folie que tu apportes à chaque moment passé ensemble. Merci aussi à **Klément** de te rendre chaque jour plus épanoui.

À **Mathilde**, pour ton sourire éclatant, ta force de travail et tes conseils avisés empreints de sagesse notamment dans le domaine de la dentisterie...#lesmeilleurssavent... Merci pour ta gentillesse et ton soutien sans faille. Merci à **François** d'avoir mis encore plus de soleil dans ta vie.

À **Meredith**, pour notre passion commune des palettes, ton talent écrasant au badminton et surtout ton empathie font de toi la meilleure des urgentistes et une amie incroyable que je suis heureuse d'avoir à mes côtés.

À **Louis** (le membre pas si caché des QLF), pour ton amour invétéré et inaliénable de la langue française, j'espère qu'on aura encore le loisir de partager pleins de nouvelles randonnées avec option obligatoire baignade/jacuzzi pour se récompenser.

À la team de Caremeau,

À **Boris**, membre indispensable de la team Britney, merci de m'avoir fait partager ta passion pour la boxe, et d'avoir été un excellent padawan dans la pratique avancée du twerk sur table branlante. Merci d'avoir été là, aussi bien dans les bons que dans les mauvais moments. À **Morgane**, pour avoir réussi à dompter le chaton fragile que tu es.

À **Sarah**, pour ta gentillesse et ton attention envers les autres, à la hauteur de ton talent pour les squats.

À **Camille**, merci de rigoler à toutes nos blagues même quand tu ne les comprends pas, avec ta bonne humeur permanente.

À **Mélissa**, pour nos moments de complicités, et tes talents de cavalière.

À **Ophélie**, pour ton écoute et ta bonne humeur, chaque moment partagé avec toi est un vrai plaisir.

À tout le reste de la team Caremeau, **Arthur, Baptiste, Clémence, Marion, Mathilde, Meredith, Melissa, Philippe, Ophélie, Willy, Irma, Chloé, Agathe, Rémi, Claire, Charlène, Olivia, Rim,** et tous les autres merci pour toutes ses soirées inoubliables.

À la team HTA,

À **Benjamin**, à **Valentin**, pour ces moments inoubliables de fous rires et pour cette chasse au Dahu qui a scellé une belle et sincère amitié. J'attends avec impatience la suite de nos aventures randonnées et de grimpes (Eh oui Benjamin ce n'était que le début !).

Aux castors de Laissac,

À **Jeannette**, **Lisa**, **Gaby**, **Théo**, **Christelle**, et **Samantha**, des voisins en or, j'ai adoré nos soirées jeux de sociétés et découvrir Thanksgiving avec vous. À nos prochains verres que j'espère nombreux !

À mes Normands préférés,

À **Arthur et Morgane**, alias les Morthurs, merci d'avoir rendu mon arrivée à Montpellier si agréables, nos soirées JDR du dimanche soir et les mardis "Émilie et les garçons" me manquent toujours. Je suis heureuse que vous ayez trouvé votre bonheur à Rouen, avec une mini-morthur qui vous a rejoint, je ne doute pas vous serez des parents incroyables. Merci Arthur pour toutes ces soirées inoubliables D&D.

À **Carette**, alias le petit Jérémie, toujours prêt pour 3 cafés gourmands, j'ai hâte de revoir tes prouesses au ski mais sans rien te casser cette fois !

À **Francis**, un nouveau cas clinique vivant chaque jour, pour ton flegme malgré toutes tes aventures, ta joie de vivre et notre passion féline. Nous nous ferons un devoir de finir tous tes whiskys.

À **Stanislas**, alias le BG de Nancy, pour nous montrer chaque jour la définition du style, d'avoir anticipé le retour de la banane, ton amour des bonnes choses et d'avoir égayer nos vacances avec ta bonne humeur sans faille.

À ma famille,

À Papa, merci pour ton soutien infailible et ta confiance en moi durant ces années d'études interminables. Tu as toujours été une source d'inspiration et d'admiration par ta force tranquille, ton humilité et ta grande tendresse. Tu m'as transmis ton immense amour des animaux, ton empathie, ta curiosité et ton goût pour l'apprentissage, je crains malheureusement que je sois restée imperméable à ton gout des timbres et à l'œnologie. Tu es notre plus grand soutien, tes enfants ont toujours été ta priorité, sans toi aucun de nous ne serait ce qu'il est aujourd'hui. Maintenant c'est à notre tour de prendre soin de toi. Je t'aime Papa, maintenant et à jamais.

À Nicole, je n'aurais jamais suffisamment de mots pour te transmettre et te remercier pour toute la joie et le bonheur que tu as su apporter à ma vie. Je n'y serais jamais arrivée sans ta bienveillance teintée d'une attachante maladresse et de surtout d'un immense amour maternel.

À Nathalie, merci d'apporter ton grain de folie à ma vie. Nos différences nous rapprochent et nous complètent, merci d'avoir été là pour moi dans les moments où j'en avais le plus besoin, je suis heureuse de t'avoir comme sœur.

À Thierry, pour ton amour des bonnes choses, pour ta gentillesse, pour ta générosité, toi qui as toujours su me faire rire, qui est là pour moi et me soutient depuis mon plus jeune âge. **À Chantal**, qui partage maintenant ta vie, et à ton épanouissement à ses côtés.

À Paul, le petit frère idéal que j'aurais aimé avoir, celui qui est capable de me rendre rouge de honte à tout moment dans un train et pour qui je déplacerai des montagnes, j'attends le jour où tu me battras au volley de chambre, un sport que de rares initiés maîtrisent ! J'espère qu'on arrivera à partager plein d'autres moments inoubliables.

À Alice, déjà grande parmi les grands, plus sérieuse et déterminée que moi à ton âge, j'ai hâte de voir la jeune fille que tu vas devenir.

À Corentin, pour ta créativité, pour ton caractère posé et réfléchi, ta motivation qui te fait aller au bout de tes ambitions, je suis très curieuse de voir ce que l'avenir te réserve.

À Sarah, ma cousine de cœur, on se voit désormais moins que ce qu'on aimerait et pourtant chacun de nos moments partagés sont inoubliables. Je te souhaite tout le bonheur du monde avec ta petite famille.

À Delphine, Philippe, Cécile, Estelle, Juliette, Jérôme et Marin pour me rappeler le bonheur que peut être une famille, nos fous rires sur des jeux de mots incompris des enfants, et discussions interminables sur les séries et leurs fin décevantes, et surtout merci pour ces repas de Noël, toujours chaleureux et accueillants.

À Daniel, pour avoir rendu mon inter-CHU agréable et réalisé mon rêve de vivre au canal Saint Martin.

À ma belle-famille,

À Adèle, la demoiselle au cœur sur la main et la fleur qui pousse sur le pouce, qui a su ravir mes papilles tout en me montrant l'importance d'une bonne crème fraîche d'Isigny. J'espère qu'on continuera encore longtemps nos soirées films/animées et jeux de société endiablés, et surtout que le génial projet qui te tient à cœur deviendra réalité.

À Jacqueline et Michel, merci de m'avoir accueilli les bras ouverts et d'avoir créé à Pornic ce havre de paix dans lequel je me sens si bien (où je suis même en train d'écrire ses quelques lignes).

À Valérie, merci pour votre générosité, votre accueil et pour ces excellents moments ensemble, toujours avec rire et convivialité. Je prendrai bien soin de votre Titou.

À Vidhya, Philippe, Véronique, Sébastien, et à toute la cousinade, merci pour votre authenticité et votre bienveillance, j'espère partager à nouveau de nombreux Noël en si bonne compagnie.

À tous les patients qui ont croisé mon chemin,

Merci de m'avoir fait grandir en apprenant l'humilité et l'humanité indispensables à notre métier.

À Jude, mon alter ego à quatre pattes.

À toi, **Mathieu**, sans qui rien n'aurait été possible, qui a apporté à ma vie plus de bonheur que ce que je ne l'aurais imaginé. Merci de me soutenir dans tous mes projets, de m'accompagner dans mes moments de folies, et de m'aider à avancer dans les bons comme dans les moments difficiles. L'avenir me semble serein, tu es mon évidence.

TABLE DES MATIÈRES

TRAUMATISME NON ACCIDENTEL CHEZ L'ENFANT	35
1. ÉPIDÉMIOLOGIE DE LA MALTRAITANCE CHEZ LES MINEURS	36
2. PROPRIÉTÉS DU SQUELETTE IMMATURE	36
3. TYPE DE LÉSIONS OSSEUSES DES TRAUMATISMES INFLIGÉS	37
a. <i>Lésions métaphysaires</i>	39
b. <i>Lésions diaphysaires des os longs</i>	41
c. <i>Datation des lésions osseuses</i>	42
d. <i>Diagnostic différentiel</i>	43
i. Métaphyses.....	44
ii. Diaphyses	44
4. EXPLORATIONS RADIOLOGIQUES	45
5. AUTRES MODALITÉS D'IMAGERIE COMPLÉMENTAIRE.....	47
INTELLIGENCE ARTIFICIELLE (IA)	48
1. ANALYSE D'IMAGE PAR IA.....	48
a. <i>Machine Learning</i>	49
b. <i>Deep learning et réseaux de convolution</i>	49
2. APPLICATION DANS LES CONTEXTES DE LA MALTRAITANCE INFANTILE	51
3. LOGICIEL BONEVIEW.....	52
a. <i>Généralités</i>	52
b. <i>Fonctionnement et transfert des données</i>	53
c. <i>Construction et validation du modèle de détection</i>	54
INTRODUCTION	57
MATERIELS ET METHODES	60
<i>DESIGN DE L'ÉTUDE</i>	60
<i>POPULATION</i>	60
<i>GOLD STANDARD (GS)</i>	60
<i>LOGICIEL D'IA BONEVIEW</i>	61
<i>RECUEIL DES DONNÉES D'IMAGERIE</i>	62
<i>ANALYSE STATISTIQUE</i>	63

RÉSULTATS	65
CARACTÉRISTIQUES DES PATIENTS	65
CARACTÉRISTIQUES DES FRACTURES DÉCRITES PAR LE GOLD STANDARD	66
PERFORMANCES DU LOGICIEL D'IA BONEVIEW	67
<i>Fractures détectées</i>	67
<i>Performances diagnostiques de l'IA</i>	67
DISCUSSION	69

ABBREVIATIONS

ACR : American College of Radiology

ADV : Hôpital d'Arnaud de Villeneuve, Montpellier

CHU : Centre Hospitalo-Universitaire

DICOM : Digital Imaging and COmmunications in Medicine

ESPR : European Society of Paediatric Radiology

FN : Faux Négatif

FP : Faux Positif

GED : Groupe Enfance en Danger

IA : Intelligence Artificielle

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

RPN : Region Proposal Network

Se : Sensibilité

SFIPP : Société Francophone d'Imagerie Pédiatrique et Périnatale

Sp : Spécificité

STIR : Short TI Inversion Recovery

VN : Vrai Négatif

VP : Vrai positif

CONTEXTE

TRAUMATISME NON ACCIDENTEL CHEZ L'ENFANT

Les traumatismes non accidentels sont des traumatismes infligés. La maltraitance infantile est un problème majeur de santé publique en France. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), elle se définit comme "toutes formes de mauvais traitements physiques et/ou affectifs, sévices sexuels, négligence, exploitation commerciale ou autre, entraînant un préjudice réel ou potentiel pour la santé de l'enfant, sa survie, son développement ou sa dignité, dans le contexte d'une relation de responsabilité, de confiance ou de pouvoir".

Très récemment, grâce à la loi n° 2022-140 du 7 février 2022 (1) relative à la protection des enfants, la définition consensuelle de la maltraitance fait son entrée au Code de l'action sociale et des familles et reprend la définition élaborée dans le cadre de la Commission de promotion de la bientraitance et de lutte contre la maltraitance à savoir "La maltraitance au sens du présent code vise toute personne en situation de vulnérabilité lorsqu'un geste, une parole, une action ou un défaut d'action compromet ou porte atteinte à son développement, à ses droits, à ses besoins fondamentaux ou à sa santé et que cette atteinte intervient dans une relation de confiance, de dépendance, de soin ou d'accompagnement. Les situations de maltraitance peuvent être ponctuelles ou durables, intentionnelles ou non. Leur origine peut être individuelle, collective ou institutionnelle. Les violences et les négligences peuvent revêtir des formes multiples et associées au sein de ces situations."

1. Épidémiologie de la maltraitance chez les mineurs

On ne dispose pas en France de chiffres véritablement fiables. La plupart des cas de maltraitance ne sont pas signalés et les nourrissons y sont particulièrement vulnérables. Les chiffres officiels les plus récents ne se recoupent pas entre eux et sont très probablement sous-estimés, si on en juge par les taux calculés : de 3 pour 1000 à 2 pour 100. Ces chiffres apparaissent peu réalistes si on les compare au taux moyen de 10 % d'enfants maltraités dans la population générale, rapporté par des études menées dans des pays à « haut niveau de revenus », publiées en 2009 par la revue médicale britannique *Lancet* (2). Par ailleurs, cette dernière n'inclut pas la France devant le peu de statistiques fiables dans notre pays.

La sous-estimation de la maltraitance de façon générale est plus que probable, il existe notamment des preuves argumentées concernant les homicides de nourrissons en France : une étude a permis de comparer, au niveau national, le nombre moyen par an d'infanticides des moins de 1 an officiellement recensés pendant la période 1996–2000, soit 17 cas/an, et celui identifié par la recherche : 255 cas par an (3).

La maltraitance infantile a des conséquences graves à court et à long terme sur la santé mentale et physique des enfants. Il est important de sensibiliser la population et le monde médical à ce sujet afin de faciliter la détection et le signalement des cas de maltraitance.

2. Propriétés du squelette immature

Le squelette immature présente des propriétés biomécaniques et anatomiques à l'origine de la présentation particulière des traumatismes accidentels et non accidentels dans la population pédiatrique. Ainsi, l'os cortical diaphysaire du nourrisson est richement vascularisé et plus poreux que l'os des enfants plus grands, le rendant ainsi plus tolérant aux déformations.

Dans les deux premières années de vie, la métaphyse est caractérisée par un os cortical fin et un os spongieux prépondérant. Le cartilage de croissance et plus largement, l'ensemble de la chondro-épiphyse, sont des zones de fragilité. Au sein de la métaphyse, il faut distinguer la zone dite spongieuse primaire, au contact direct du cartilage de croissance, représentant la zone

de faiblesse maximale chez le nourrisson (4). La zone dite spongieuse secondaire, plus mature, est le principal composant de l'os spongieux de la métaphyse (Cf. Figure I.1).

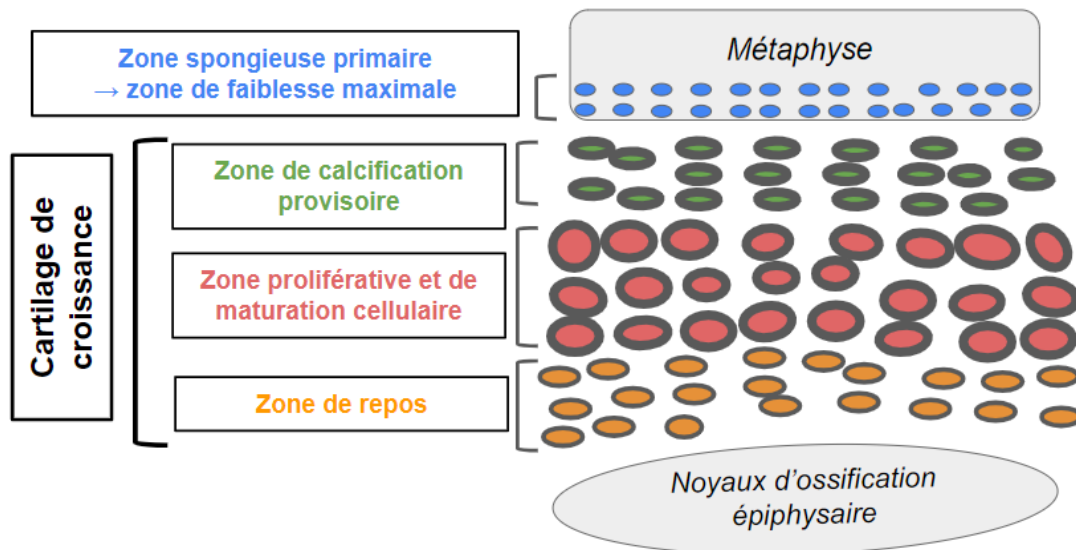


Figure I.1 : Cartilage de croissance : Au sein du cartilage de croissance, plusieurs zones histologiquement individualisables du versant épiphysaire au versant métaphysaire : zone de repos, zone de prolifération et de maturation cellulaire, zone de calcification provisoire, accolée à la métaphyse, siège de la transformation en os et la zone spongieuse primaire appartenant à la métaphyse qui représente la zone de faiblesse maximale. (Source : création personnelle d'après (5))

Le périoste immature est solidement ancré sur la région métaphysaire en regard du cartilage de croissance, contrairement à la corticale diaphysaire sous-jacente. Par conséquent chez le petit enfant, les pièces squelettiques osseuses ou cartilagineuses sont de moindre résistance par rapport aux structures fibreuses adjacentes (périoste, capsule articulaire, tendons et ligaments).

3. Type de lésions osseuses des traumatismes infligés

Selon la présentation radiologique, la dénomination peut être syndrome de Silverman (défini par la présence de fractures multiples et d'âges différents) ou syndrome des enfants battus, ou syndrome du bébé secoué. Tous les types de fracture ont été rapportés dans le

contexte de maltraitance (5,6). Cependant, certaines lésions sont plus spécifiques d'un traumatisme non accidentel, telles les lésions métaphysaires et les fractures des arcs postérieurs de côtes (Cf. Tableau I.1).

<i>Selon la spécificité</i>		<i>Selon la fréquence</i>	
Très élevée	Lésions métaphysaires « en coin » ou « en anse de seau » Fractures de côtes (arc postérieur surtout) Fracture de l'omoplate (acromion) Fracture du processus épineux vertébral Fracture du sternum	Élevée	Fractures multiples et d'âges différents Lésions métaphysaires « en coin » ou « en anse de seau » Fractures diaphysaires des os longs (avant l'âge de la marche) Fractures du crâne Fractures de côtes Appositions périostées
Élevée	Fractures multiples (surtout bilatérales) Fractures d'âges différents Décollement épiphysaire Fracture-tassement d'un ou de plusieurs corps vertébraux Fractures des doigts et des orteils Fractures complexes du crâne	Rare	Fractures du rachis Fractures des doigts et des orteils Fracture de la clavicule Décollement épiphysaire
Faible	Appositions périostées Fracture de la clavicule Fractures diaphysaires des os longs Fractures linéaires du crâne	Très rare	Fracture de l'omoplate Fracture du bassin Fracture du sternum Fracture du massif facial et de la mandibule

Tableau I.1 : Lésions squelettiques des traumatismes non accidentels selon la spécificité et la fréquence. En gras les lésions étudiées spécifiquement dans ce travail.

Les lésions d'âge différent sont très suspectes d'un mécanisme infligé, ainsi que le caractère multiple des fractures sans agent causal mécanique important tel un accident sur la voie publique à haute cinétique.

Les lésions squelettiques d'origine non traumatique bénéficient d'un pronostic fonctionnel favorable pour la plupart d'entre elles, et ce d'autant plus que la victime est jeune. Les fractures diaphysaires et les larges décollements périostés bénéficient d'un remodelage rapide.

Par souci de synthèse nous développerons ici uniquement des lésions osseuses traumatiques des os longs.

a. Lésions métaphysaires

Les fractures métaphysaires classiques près de l'extrémité des os longs en développement sont habituellement limitées à la population de nourrissons, et présentent un haut degré de spécificité pour la maltraitance (4,5,7)

Elles sont observées chez 30 à 50 % des enfants maltraités âgés de moins de 18 mois. Les fractures métaphysaires concernent la zone fragile de la spongieuse primaire, expliquant ainsi qu'elles ne se rencontrent plus au-delà de l'âge de 2 ans.

Les mouvements de torsion lors de traumatismes directs volontaires sont principalement responsables de ces lésions métaphysaires mais elles ont également été décrites dans le syndrome de l'enfant secoué lors des ballottements répétés ou des prises violentes de l'enfant, notamment au niveau des épaules et des membres supérieurs (6). Elles atteignent préférentiellement la métaphyse distale du fémur, les métaphyses proximale et distale du tibia et la métaphyse proximale de l'humérus.

L'examen clinique peut être très peu informatif, les fractures-arrachements métaphysaires pouvant être complètement asymptomatiques, ce qui confère à l'exploration radiologique un rôle diagnostique primordial.

L'aspect radiologique des lésions métaphysaires varie selon l'étendue de la lésion et de l'incidence du cliché, on retrouve ainsi des fractures « en coin » ou un aspect en « anse de seau » (Cf. Figures I.2 et I.3) (7).

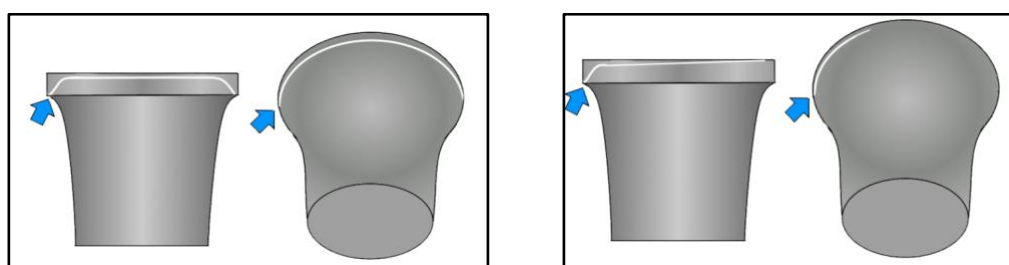


Figure I.2 : Aspect des fractures métaphysaires “en coin” et “anse de seau” en fonction de l'incidence en cas de fracture localisée (image de gauche) et de fracture étendue (image de droite) (Source : création Mathieu Lakshmanan).

Ces lésions ne sont jamais observées dans les suites d'une chute. Le déplacement est souvent discret. Lorsqu'il est plus marqué, un décollement périosté y sera potentiellement associé.

Ces lésions représentent une des limites de la scintigraphie en raison de l'hyperfixation physiologique du cartilage de croissance et de la région métaphysaire immédiatement adjacente à la fracture.



Figure 1.3 : Gauche : fracture métaphysaire en anse de seau (flèche) tibiale distale gauche, avec appositions périostées sus-jacentes. Droit : Fractures métaphysaires en coin (têtes de flèches) fémorales distales et en anse de seau (flèche) tibiales proximales. (CHU de Montpellier).

L'évolution des atteintes métaphysaires se fait vers l'extension du cartilage physaire adjacent vers la métaphyse sous la forme d'une zone radioclaire parfois difficile à affirmer. La datation de ce phénomène évolutif est très difficile à réaliser ainsi que son diagnostic rétrospectif.

Parfois, il peut être observé des lésions traumatiques métaphysaires habituellement rencontrées en cas de traumatisme accidentel : fracture en « motte de beurre » ou fracture-décollement épiphysaire.

L'arrachement métaphysaire guérit en règle générale sans séquelle, on peut voir dans certains cas, une zone radiotransparente faisant saillie dans la métaphyse et donnant au cartilage de croissance un aspect tortueux est observée de façon temporaire (8). Une épiphysiodèse

(fusion prématurée des cartilages de croissance) est très rarement constatée, et est la conséquence d'une authentique fracture de type Salter-Harris.

b. Lésions diaphysaires des os longs

A l'inverse des lésions métaphysaires, les fractures des diaphyses des os longs ont une faible spécificité de traumatisme non accidentel. Néanmoins, leur survenue accidentelle chez un nourrisson n'ayant pas acquis la marche est très peu probable.

Les sites lésionnels préférentiels sont l'humérus puis le fémur. La prévalence de ces lésions est d'environ 20 % des cas (9,10). Sur l'humérus, les fractures sont le plus souvent spiroïdes ou obliques du fait de mouvement de torsion, notamment chez le nourrisson. Sur le fémur et le tibia, les fractures diaphysaires peuvent être spiroïdes, obliques ou transversales, sans spécificité en faveur de traumatisme non accidentel (11) (Cf. Figure I.4 et I.5).



Figure I.4 : *Fracture transversale déplacée de l'humérus droit avec cal osseux débutant (tête de flèche) (CHU de Montpellier).*

Les fractures incomplètes de la diaphyse comme des fractures dites « plastiques » sont également observées (Cf. Figure I.5). Elles touchent principalement le péroné et l'ulna, elles se traduisent par une incurvation post-traumatique de la diaphyse, liée à des microfractures invisibles sur la radiographie, comme « un roseau qui plie ».

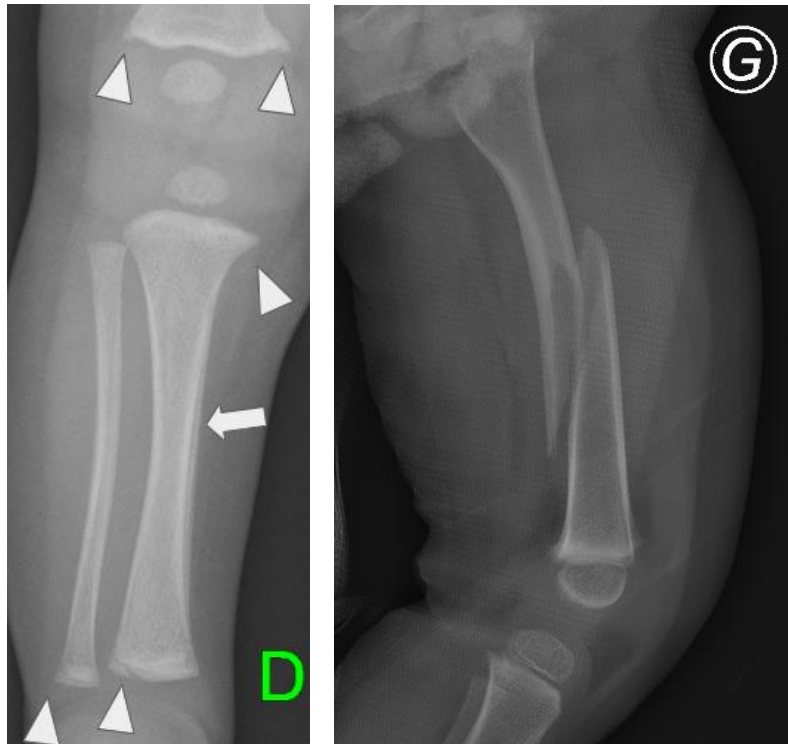


Figure I.5 : Gauche : fracture plastique de la fibula droite, apposition périostée du tibia droit (flèche), fractures métaphysaires multiples (Têtes de flèche). Droite : Fracture spiroïde du tiers moyen du fémur gauche. (CHU de Montpellier)

c. Datation des lésions osseuses

La datation des lésions osseuses, notamment dans un contexte de traumatisme infligé, est une phase primordiale mais délicate en imagerie (9,11).

La guérison d'une fracture est d'autant plus rapide que l'enfant est jeune ; à titre d'exemple, une fracture obstétricale de la diaphyse humérale est soudée en 4 semaines, alors qu'une fracture de même localisation chez un enfant de 8 ans requiert 8 à 10 semaines pour consolider.

Il est primordial de connaître les particularités radiographiques des phénomènes spontanés de réparation constituant l'ostéogenèse (Cf. Tableau I.2) : Dès la survenue du traumatisme, on constate l'effacement des liserés graisseux et une tuméfaction des parties molles, bien que la plupart des fractures des membres ne s'associent pas à des hématomes sous-cutanés en regard. La réaction périostée survient entre la fin de la première semaine (souvent plus précoce chez le nouveau-né sain) jusqu'au plus tard la troisième semaine. Le trait

de fracture diaphysaire est net dans un premier temps, puis s'estompe progressivement en une dizaine de jours, avec la formation dans les suites du cal osseux. La datation des lésions fracturaires n'est pas une science exacte, du fait de la grande variabilité du remodelage du foyer fracturaire selon l'âge et le type de fracture.

<i>Modifications radio-anatomiques et temporalité</i>	<i>Précoces</i>	<i>Classique</i>	<i>Tardives</i>
Disparition des modifications des tissus mous	2 à 5 jours	4 à 10 jours	10 à 21 jours
Appositions périostées	4 à 10 jours	10 à 14 jours	14 à 21 jours
Perte de la définition des bords fracturaires	10 à 14 jours	14 à 21 jours	
Cal osseux	14 à 21 jours	21 à 42 jours	42 à 90 jours
Remodelage	3 mois	1 an	Jusqu'à maturation osseuse

Tableau I.2 : Datation des phénomènes de réparation post-fracturaire chez l'enfant (d'après (12))

Ces phénomènes radio-anatomiques ne concernent pas les lésions métaphysaires qui ont un mode de réparation différent des fractures diaphysaires.

L'élément clé est donc de repérer des lésions dites d'âges différents, cela constitue un élément diagnostique majeur, mais également une alerte sur la répétition des épisodes traumatiques et sur la gravité des sévices infligés.

d. Diagnostic différentiel

La recherche de diagnostic différentiel de lésions osseuses non accidentelles est indispensable. Certaines situations peuvent être problématiques et induire des diagnostics de maltraitance par excès ou, au contraire, être à l'origine d'une méconnaissance de lésions induites.

Les diagnostics différentiels diffèrent selon la région anatomique intéressée. Dans certains cas, le doute devant des traumatismes accidentels répétés est possible, mais en aucun cas avant l'acquisition de la marche.

i. Métaphyses

Les métaphyses présentent de nombreuses variantes de l'ossification pouvant faire évoquer à tort des lésions traumatiques. Le rôle d'un cliché de contrôle à 15 jours est majeur lorsqu'un doute persiste, puisqu'il démontre la parfaite stabilité des images radiographiques. Les principales images pièges sont les becs métaphysaires, les épines métaphysaires ou l'aspect en « marche d'escalier » (12,13) (Cf. figure I.6).

Les lignes de Harris ou stries métaphysaires d'arrêt de croissance se présentent sous la forme de fines opacités linéaires sur la métaphyse des os longs, perpendiculaires au grand axe n'ont aucune spécificité.

On retrouve également dans les diagnostics différentiels : les dysplasies métaphysaires, les maladies métaboliques (rachitisme carenciel ou vitamino-résistant, carence en cuivre) et des cas de maladies infectieuses (ostéomyélites, syphilis congénitale). Le reste du bilan clinico-radiobiologique permet dans la plupart des cas de redresser le diagnostic, notamment l'absence de modification radiographique sur le bilan réalisé à J10-14.



Figure I.6 : variantes de l'ossification métaphysaire. A gauche : aspect en marche d'escalier. Au milieu ; bec métaphysaire. A droite : Épine métaphysaire. (D'après (14))

ii. Diaphyses

Les appositions périostées symétriques, fines et continues peuvent être une variante de la normale durant les 6 premiers mois de vie notamment au niveau des fémurs et des tibias). Un même aspect peut par ailleurs être observé chez le prématuré.

Des appositions périostées plus localisées sont également retrouvées dans des cas d'infection, de métastase de neuroblastome ou l'atteinte osseuse d'une leucémie. On rencontre également des épaissements périostés dans d'autres circonstances : hyperostose corticale infantile, scorbut, intoxication à la vitamine A, traitement par les prostaglandines E1, etc.

L'ostéogenèse imparfaite représente le principal problème de diagnostic différentiel des fractures diaphysaires, essentiellement le type I et le type IV. Ces derniers s'accompagnent entre autres d'une ostéoporose, de multiples os wormiens, de sclères bleutées et d'une histoire familiale. En revanche, l'absence d'histoire familiale (cas sporadiques), et le fait que l'ostéoporose peut ne pas être visible chez le nourrisson sont à l'origine de réels problèmes diagnostiques. Par conséquent, la recherche d'os wormiens chez tout nourrisson suspect d'être victime d'un traumatisme non accidentel et porteur d'une fracture d'un ou de plusieurs os longs est primordial. Dans les cas d'ostéogenèse imparfaite, il est important de souligner que les lésions métaphysaires sont exceptionnelles et ne sont jamais isolées (15).

4. Explorations radiologiques

L'American College of Radiology (ACR), la British Society of Paediatric Radiology et la Société Francophone d'Imagerie Pédiatrique et Périnatale (SFIPP) ont publié des recommandations pour l'exploration radiologique des enfants suspects de traumatisme non accidentel (16–18) (Cf. Tableau I.3). Le bilan préconisé varie selon l'âge et le contexte clinique.

L'exploration radiographique doit être de qualité irréprochable, et comporter des clichés précis suivant les recommandations des sociétés savantes. L'interprétation est primordiale, toute erreur par excès ou par défaut peut être lourdement préjudiciable à l'enfant ou à son entourage.

Les clichés en totalité des membres sont proscrits : ils doivent être centrés et correctement collimatés. Sur les genoux et les chevilles, des incidences orthogonales entre elles et à la région métaphysaire considérée doivent être pratiquées. L'examen radiologique sera réalisé en présence d'un radiologue expérimenté et en prenant vis-à-vis de l'enfant les mesures adéquates d'analgésie.

<i>Bilan initial :</i>	
Incidences systématiques	Crâne face et profil (sauf si scanner crânien réalisé) Rachis cervical face et profil Thorax face et profil (gril costal, rachis, ceinture scapulaire) Rachis lombosacré et bassin de face Rachis lombosacré de profil Membres (par clichés séparés et collimatés) : – bras (bilatérale, de face) – avant-bras (bilatérale, de face) – main (bilatérale, de face) – cuisse (bilatérale, de face) – jambe (bilatérale, de face) – pied (bilatérale, de face)
Incidences “conseillées largement en complément”	Profil centré des genoux et des chevilles d’autant plus que l’enfant est jeune Incidences obliques sur le gril costal
<i>Si le bilan initial est douteux ou normal avec forte suspicion clinique :</i>	
Bilan radiologique répété à 10 jours d’évolution	Nouvelles radiographies du squelette en entier dans les mêmes conditions précités
OU	Scintigraphie osseuse

Tableau I.3 : *Recommandations de la SFIPP pour l’exploration du squelette chez l’enfant de moins de 2 ans (16). Il est rappelé qu’un radiologiste compétent en imagerie pédiatrique doit valider la qualité des clichés.*

Avant l’âge de 2 ans, l’exploration du squelette complet est obligatoire. Au-delà de 5 ans, les clichés doivent concerner les zones cliniquement suspectes, l’exploration de l’ensemble du squelette est inutile. Entre l’âge de 2 et 5 ans, le choix doit être adapté au cas par cas.

À l’issue du premier bilan radiologique, trois situations sont possibles :

- Présence d’aspects typiques de traumatisme non accidentel sur une ou plusieurs pièces squelettiques.
- Absence de lésion osseuse visible.
- Lésion d’allure équivoque ou douteuse.

Lorsque le contexte clinique est fortement évocateur dans ces deux derniers cas, il est possible de réaliser soit des nouveaux clichés squelettiques à J10-14 (au minimum sur le grill costal et sans répéter les clichés de crâne, bassin et rachis d'après l'ESPR 2022), soit une scintigraphie osseuse.

Les lésions en phase de réparation, comme l'apparition de cals sur des fractures passées initialement inaperçues pourront être mises en évidence sur les nouveaux clichés (19). Ils permettront également la détection d'éventuelles nouvelles lésions, d'argument en faveur de diagnostic différentiel (variantes de la normale, dysplasies osseuses, par exemple) et à la datation des lésions. A l'inverse, l'absence de nouvelles lésions ou de signe de réparation osseuse après une dizaine de jours d'évolution, peuvent permettre d'éliminer formellement l'hypothèse de lésions osseuses traumatiques.

5. Autres modalités d'imagerie complémentaire

La scintigraphie osseuse possède une grande sensibilité dans la détection des fractures costales, des fractures diaphysaires non déplacées et des décollements ou remaniements périostés. Cependant sa capacité à détecter les lésions métaphysaires peu déplacées est mauvaise en raison de l'hyperfixation physiologique des cartilages de croissance. Par ailleurs, les fractures du crâne, les fractures très récentes ou consolidées peuvent aussi passer inaperçues et la datation des fractures est délicate.

D'après les recommandations de la SFIPP, la scintigraphie osseuse peut être pratiquée dans les cas douteux à la place d'une seconde exploration radiologique, en particulier du grill costal (16). La dose d'exposition aux radiations ionisantes est cependant plus élevée que celle délivrée par les radiographies du squelette.

Des études ont souligné l'intérêt de la réalisation de scanner thoracique pour la détection des fractures costales qui sont fréquentes et spécifiques de maltraitance (20,21), et qui est par ailleurs bien moins irradiant que la scintigraphie.

Le scanner est actuellement réservé à certains cas particuliers telle que la suspicion de traumatisme rachidien même si son utilisation dans les fractures costales est actuellement en discussion.

L'échographie peut mettre en évidence une fracture occulte, un décollement épiphysaire ou une collection juxta-lésionnelle tel un hématome, mais aucune preuve de son efficacité dans le cadre du dépistage n'a été faite.

L'IRM corps entier en séquence STIR a été évoqué comme une option possible de dépistage des lésions osseuses du fait de son caractère non irradiant et de la possibilité de la coupler avec l'étude encéphalique (22). Malheureusement, sa faible sensibilité dans la détection des fractures de côtes et des lésions métaphysaires ne lui permet pas de se substituer à l'exploration radiologique classique (23).

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE (IA)

L'utilisation de méthode d'intelligence artificielle (IA) pour la reconnaissance d'images est une des branches les plus développées et cette technologie est à présent utilisée de façon courante dans notre quotidien. Dans le domaine de l'imagerie médicale, les approches basées sur l'IA sont particulièrement prometteuses, avec de nombreuses applications et un engouement important dans de multiples domaines.

1. Analyse d'image par IA

L'analyse d'image par intelligence artificielle (IA) s'est particulièrement développée à partir des années 90 avec l'introduction d'algorithmes d'apprentissage profond (deep learning) basés sur les réseaux de neurones, et l'augmentation de puissance de calcul des ordinateurs.

Dans le domaine médical, elle se base sur une approche numérique en se focalisant sur les régularités qu'il est possible d'identifier sur un nombre important de données disponibles pour en extraire des connaissances, sans modèle préétabli (24).

Les applications cliniques sur les différentes modalités d'imagerie grâce à l'IA sont particulièrement nombreuses et intéressantes pour les tâches de détection, de reconstruction d'images et de développement de biomarqueurs d'imagerie pour l'aide au diagnostic, l'évaluation pronostique ou la prédiction de réponse aux traitements (25,26). Ainsi, la détection assistée par ordinateur a déjà des applications avérées pour le dépistage du cancer du sein sur les mammographies (27), des nodules pulmonaires sur les tomodensitométries (28) et pour prédire l'évolution des maladies neurodégénératives (29).

a. Machine Learning

Le Machine Learning (apprentissage automatique) est un domaine spécialisé de l'intelligence artificielle qui consiste à créer des modèles informatiques capables d'apprendre et de s'adapter à partir de données. Il permet à des machines de prendre des décisions et de résoudre des problèmes sans avoir été explicitement programmées pour le faire.

Pour cela, l'algorithme reçoit dans un premier temps une base de données (par exemple : on lui montre des mammographies en précisant lesquelles révèlent un cancer), puis on évalue la différence entre ses prévisions et les résultats attendus sur un autre jeu de données afin d'affiner au fur et à mesure la précision de ses prédictions jusqu'à ce qu'elles soient optimisées. Grâce à des procédés issus des statistiques et des probabilités, la machine est capable de faire un diagnostic avec un taux d'erreur de plus en plus faible. Il s'appuie sur un algorithme qui s'adapte lui-même à partir des retours faits par l'humain. Le machine learning nécessite donc une grande quantité de données et une puissance de calcul importante.

b. Deep learning et réseaux de convolution

Le deep learning, technique d'apprentissage automatique née dans les années 90, connaît un essor important depuis une dizaine d'années grâce à l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs et de l'accumulation importante de quantités de données (big data).

L'algorithme du deep learning est bien plus autonome que le Machine Learning. En effet, il identifiera lui-même les caractéristiques discriminantes, ce qui évitera au programmeur d'assumer les tâches de spécification de fonction et d'optimisation.

Pour cela, le système utilise des réseaux de neurones pour apprendre de façon autonome à partir de données. Les réseaux de neurones sont des systèmes informatiques qui imitent le fonctionnement du cerveau humain (bio-mimétisme) reproduisant un réseau de neurones organisés en différentes couches de calculs pour traiter les données d'entrée et générer des résultats. Il est ainsi composé d'une couche d'entrée, de couches cachées et d'une couche de sortie qui va donner la réponse (Cf. figure II.1).

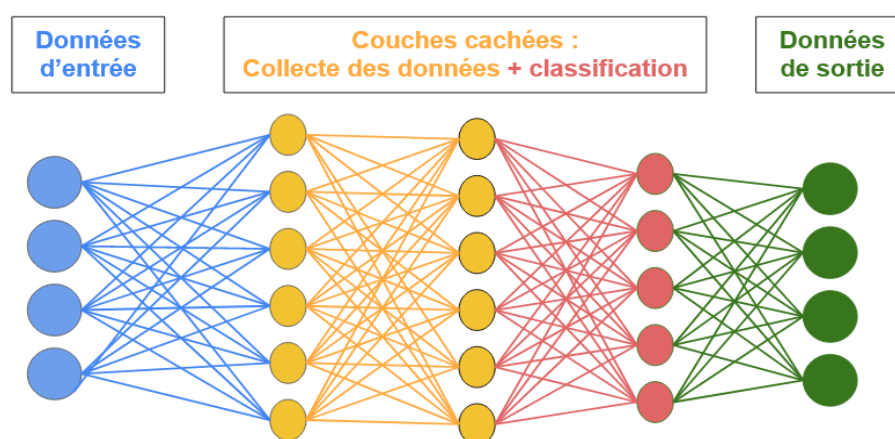


Figure II.1 : Modèle de deep learning (source : création personnelle)

Les réseaux de convolution, quant à eux, sont un type spécifique de réseau de neurones utilisé pour la reconnaissance d'images et d'autres types de données à deux dimensions.

Il utilise des couches de neurones appelées couches de convolution qui effectuent des calculs sur des petits sous-ensembles de données, appelés « filtres », pour détecter des caractéristiques spécifiques dans l'image. Ces dernières sont ensuite utilisées par les couches de neurones suivantes pour identifier des patterns plus complexes. Enfin, l'ensemble de couches entièrement connectées utilisent ces caractéristiques pour effectuer la classification (Cf. figure II.2). Les réseaux de convolution peuvent être entraînés sur des grandes quantités de données d'entraînement pour améliorer les performances de reconnaissance.

Le deep learning et les réseaux de convolution ont révolutionné de nombreux domaines, tels que la reconnaissance vocale, la vision par ordinateur et l'analyse de données. Ces techniques sont utilisées dans des applications variées comme la reconnaissance faciale, la détection de maladies dans les images médicales et la reconnaissance de formes dans les images industrielles.

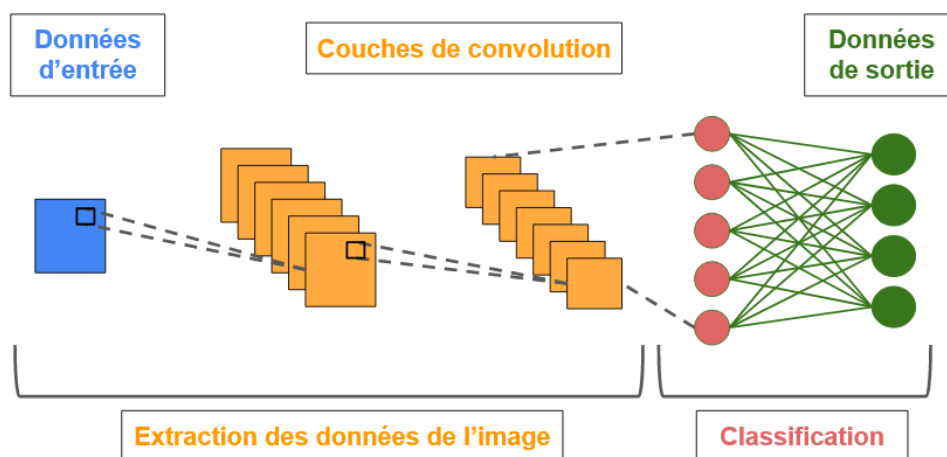


Figure II.2 : Modèle des réseaux de convolution (Source : création personnelle)

Le deep learning (apprentissage « profond ») produit des modèles difficilement explicables pour l'humain qui agissent fonctionnellement comme des « boîtes noires », ce qui peut poser problème en cas de décisions vitales à prendre ou des justifications légales.

2. Application dans les contextes de la maltraitance infantile

L'intelligence artificielle (IA) joue un rôle de plus en plus important en radiologie (davantage chez l'adulte qu'en pédiatrie), au point que certains craignent, sans fondement, qu'elle ne remplace complètement le rôle du radiologue.

En ce qui concerne les applications musculo-squelettiques de l'IA en radiologie pédiatrique, nous sommes loin du moment où l'IA remplacerait les radiologues ; même pour l'application la plus courante (évaluation de l'âge osseux), l'IA est plus souvent employée en tant qu'assistance que de remplacement (30).

Les fractures métaphysaires et costales infligées aux nourrissons sont souvent difficiles à détecter alors qu'elles sont hautement prédictives de maltraitance (11). Les recommandations nationales du Royaume-Uni (adoptées par la Société européenne de radiologie pédiatrique) recommandent que les images soient analysées par deux radiologues entraînés dont au moins un radiopédiatre spécialisé (31). Par conséquent, dans les centres semi-experts où cela est difficilement réalisable en raison de problèmes de personnel, disposer d'un outil d'IA d'aide au dépistage, aiderait à mettre en évidence les zones suspectes afin que le radiologue les examine attentivement, que ce soit lors des examens du squelette effectués en cas de suspicion de maltraitance ou lors des radiographies effectuées pour d'autres indications, par exemple une radiographie thoracique pour une toux.

Des travaux réalisés sur la détection assistée par l'IA des fractures périphériques chez les adultes et enfants de plus de deux ans, et la détection des fractures costales, ont présenté des résultats très encourageants (32–34), grâce au développement de réseaux de neurones convolutifs entièrement automatisés pour effectuer cette tâche. Il a été notamment montré une augmentation de 10 % de la sensibilité de la détection des fractures chez les plus de deux ans, sans impact significatif sur la spécificité grâce à l'aide de logiciel d'IA (32).

Cependant, à la connaissance de l'auteur, aucune étude de ce type n'a été réalisée pour les fractures non accidentelles suspectées chez les nourrissons.

3. Logiciel BoneView

a. Généralités

Le logiciel d'intelligence artificielle (IA) BoneView TM (GLEAMER, Paris, France) a été conçu, entraîné et validé pour localiser les fractures récentes et semi-récentes sur des images DICOM (Digital Imaging and COmmunications in Medicine) en pleine résolution et anonymisées. BoneView va ainsi pouvoir fournir des données préliminaires d'aide au diagnostic et à l'interprétation des radiographies. Le diagnostic final repose uniquement sur l'expertise du médecin.

Ses paramètres d'application sont larges, avec un apport diagnostique prouvé notamment pour détecter les fractures périphériques chez l'adulte (33), et plus récemment dans la population pédiatrique des plus de deux ans (32).

Aucun effet secondaire dû à l'utilisation de BoneView n'est connu. La durée de vie de BoneView est indexée sur la durée de la licence qui a été souscrite.

b. Fonctionnement et transfert des données

En pratique, l'examen d'imagerie réalisé est transféré de la modalité du PACS (Picture Archiving and Communication System) vers la source DICOM. Cette dernière envoie ensuite l'examen, via la passerelle (local), vers BoneView (hébergé sur un serveur agréé Hébergeur de Données de Santé) après pseudo-anonymisation. L'examen est alors traité par le moteur d'intelligence artificielle de BoneView puis les résultats du traitement obtenus sont de nouveau envoyés par la passerelle vers la destination DICOM pour consultation par l'utilisateur (Cf. Figure II.3).

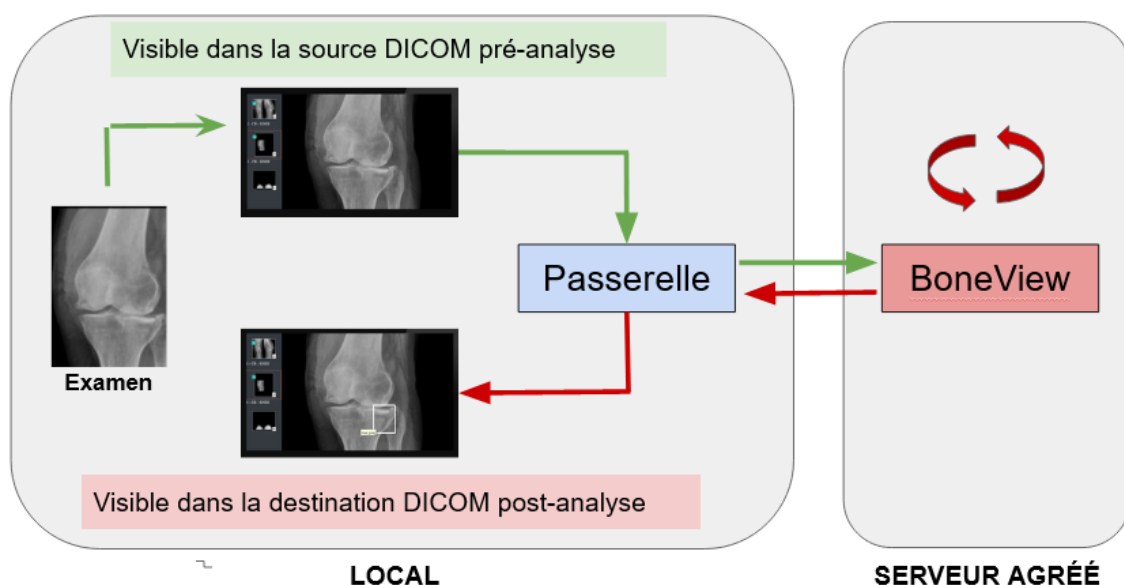


Figure II.3 : Description technique et fonctionnement de BoneView (source : création personnelle d'après GLEAMER)

GMSK Proxy est l'accessoire fourni par GLEAMER qui fait office de passerelle, et qui est donc le logiciel responsable de la connexion entre la source/destination DICOM et BoneView.

La suppression des examens de la base de données de BoneView a lieu au plus tard un jour après le traitement. Seuls les fichiers DICOM sont analysés par BoneView, ils ne doivent pas dépasser les 100MB pour pouvoir être analysés par ce logiciel.

c. Construction et validation du modèle de détection

Le modèle d'intelligence artificielle utilisé par BoneView est un réseau de neurones convolutif basé sur l'algorithme de segmentation d'image « Detectron 2 » (35), qui a été adapté à notre tâche. Pour le développement de l'algorithme de détection de fracture, environ 300000 radiographies de patients labellisées provenant de plus de 60 services de radiologie entre janvier 2011 et mai 2021 ont été rassemblées. Cet ensemble de données a alors été divisé de manière aléatoire en un ensemble d'entraînement de 70 % qui permet le développement de l'algorithme et entraîne le modèle, un ensemble de validation de 10 % qui affine le modèle et un ensemble de test interne de 20 % qui évalue la performance finale (36).

Il n'a pas été entraîné spécifiquement sur les fractures issues de traumatismes non accidentels chez les nourrissons.

Ce réseau neuronal convolutif suit un modèle de détection d'objets à deux étapes successives. La première étape reçoit en données d'entrée l'image DICOM en pleine résolution sans aucun prétraitement ni remise à l'échelle. À partir de celle-ci, elle extrait des filtres de caractéristiques intermédiaires correspondant à différentes résolutions spatiales à l'aide d'un réseau FPN (Feature Pyramid Network). Les boîtes d'ancrage des filtres de ces caractéristiques sont transmises à un réseau de proposition de région (RPN, Region Proposal Network), qui attribue un score à chaque boîte en fonction de la probabilité qu'elle contienne un objet, et tente de régresser les coordonnées de la boîte associée à l'objet afin d'obtenir la localisation la plus précise et pertinente possible. Si le score est supérieur à un certain seuil fixé, l'ancrage est considéré comme une région d'intérêt (ROI, Region Of Interest), et les caractéristiques associées

aux coordonnées prédites par le RPN à la résolution correspondante sont transmises à la deuxième étape.

L'objectif de la seconde étape est d'affiner les résultats du RPN, c'est-à-dire le score associé à la région d'intérêt et les coordonnées de la boîte correspondante. Lorsque le niveau de confiance de l'IA atteint le seuil fixé, le logiciel met en évidence la région d'intérêt en l'entourant d'un rectangle blanc sur la radiographie, en pointillé ou trait plein selon le niveau de confiance (Cf. Figure II.4).



Figure II.4 : Affichage des résultats finaux du logiciel BoneView dans le PACS (d'après GLEAMER).

Le score de la région d'intérêt a été redimensionné pour définir un premier seuil à 50% et un second à 90%. Ces seuils de sensibilité ont été sélectionnés manuellement lors du développement en se basant sur la confiance dans la région d'intérêt identifiée par l'algorithme.

- Un seuil de sensibilité élevé appelé « DOUBT FRACT » (confiance de l'IA entre 50% et 90%), représenté par une case en pointillés autour de la région d'intérêt
- Un seuil de spécificité élevé appelé « FRACT » (confiance de l'IA supérieure à 90%), représenté par une case en trait plein autour de la région d'intérêt.
- Si le pourcentage de confiance de l'IA est inférieur à 50%, le système d'IA considère qu'aucune fracture n'a été détectée (aucune région d'intérêt).

Lorsque l'ensemble des radiographies d'un patient donné a été analysée par l'IA, une boîte de résultats est créée indiquant le nombre de radiographies analysées et le résultat final :

- « FRACT » : au moins une fracture est détectée sur les radiographies.
- « NO FRACT » : aucune fracture n'est détectée.
- « DOUBT FRACT » : au moins une fracture douteuse est détectée à partir des radiographies.
- « NOT AVAILABLE » : aucune fracture n'a été détectée mais toutes les radiographies de l'examen n'ont pas pu être analysées par l'IA.

Évaluation rétrospective de la performance diagnostique d'un logiciel d'IA dans la détection de fractures osseuses périphériques chez des enfants de moins de 2 ans lors de suspicion de traumatisme non accidentel.

INTRODUCTION

La maltraitance infantile est un problème majeur de santé publique en France. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), elle se définit comme "toutes formes de mauvais traitements physiques et/ou affectifs, sévices sexuels, négligence, exploitation commerciale ou autre, entraînant un préjudice réel ou potentiel pour la santé de l'enfant, sa survie, son développement ou sa dignité, dans le contexte d'une relation de responsabilité, de confiance ou de pouvoir".

La sous-estimation de la maltraitance de façon générale est très probable en France. En effet, un taux moyen de 10 % d'enfants maltraités (2,3) a été estimé dans des études menées dans des pays à « haut niveau de revenus », bien loin des chiffres actuels existant dans notre pays. La maltraitance infantile a des conséquences graves à court et à long terme sur la santé mentale et physique des enfants, les nourrissons étant une population particulièrement vulnérable. Il est primordial de faciliter la détection et le signalement des cas de maltraitance.

Tous les types de fracture ont été rapportés dans le contexte de la maltraitance, cependant certaines lésions sont particulièrement spécifiques d'une origine non accidentelle, telles les fractures métaphysaires chez les enfants de moins de deux ans (5,6). Ces dernières peuvent être complètement asymptomatiques, ce qui confère à l'exploration radiologique un rôle diagnostique primordial. A l'inverse des lésions métaphysaires, les fractures des diaphyses des os longs ont une faible spécificité de traumatisme non accidentel, néanmoins, leur survenue accidentelle chez un nourrisson n'ayant pas acquis la marche est très peu probable.

Dans les cas de suspicion de maltraitance avant l'âge de 2 ans, l'exploration du squelette complet est obligatoire afin de rechercher des lésions osseuses évocatrices du diagnostic. Pour cela il est réalisé un protocole radiographique standardisé, suivant les recommandations des sociétés savantes (16–18,31).

<i>Bilan initial :</i>	
Incidences systématiques	Crâne (face et profil) sauf si scanner cérébral Rachis cervical (face et profil) Thorax (face et profil) Rachis lombosacré (face et profil) Bassin (face) Membres (par clichés séparés et collimatés) : – bras (droit et gauche de face) – avant-bras (droit et gauche de face) – mains (droit et gauche de face) – cuisses (droit et gauche de face) – jambes (droit et gauche de face) – pieds (droit et gauche de face)
Incidences "conseillées largement en complément"	Profil centré des genoux et des chevilles Incidences obliques sur le gril costal
<i>Si le bilan initial est douteux ou normal avec forte suspicion clinique :</i>	
Bilan radiologique répété à 10 jours d'évolution	Nouvelles radiographies du squelette en entier dans les mêmes conditions précitées
OU	Scintigraphie osseuse

Tableau II.1 : *Recommandations de la Société Francophone d'Imagerie Pédiatrique et Périnatale (SFIPP) pour l'exploration du squelette chez l'enfant de moins de 2 ans.*

Ces recommandations préconisent que les images soient analysées par deux radiologues entraînés dont au moins un radiopédiatre spécialisé, ce qui est parfois difficilement réalisable en pratique. L'analyse optimale des radiographies nécessite de la disponibilité et une expertise, les fractures métaphysaires infligées aux nourrissons sont souvent difficiles à détecter alors qu'elles sont hautement prédictives de maltraitance (11).

L'intelligence artificielle est apparue dès les années 1950, mais elle a fait un bond considérable, notamment dans la reconnaissance d'image, dans les années 1990 avec l'introduction d'algorithmes d'apprentissage profond (deep learning) basés sur les réseaux de neurones, et l'augmentation exponentielle de puissance de calcul des ordinateurs. Les

applications cliniques sur les différentes modalités d'imagerie grâce à l'IA sont devenus l'un des principaux sujets de recherche en radiologie notamment dans le développement de biomarqueurs d'imagerie pour l'aide au diagnostic, l'évaluation pronostique ou la prédiction de réponse aux traitements (25,26).

Des travaux réalisés sur la détection assistée par l'IA des fractures périphériques chez les adultes et enfants de plus de deux ans, et la détection des fractures costales, ont présenté des résultats très encourageants (32–34), grâce au développement de réseaux de neurones convolutifs entièrement automatisés pour effectuer cette tâche.

Cependant, à notre connaissance, aucune étude de ce type n'a été réalisée sur la détection de fractures non accidentelles chez les nourrissons. Il pourrait être utile de disposer d'un outil d'IA, pour accompagner le radiologue dans le dépistage de ces lésions parfois très difficiles à dépister.

Un logiciel de détection et de diagnostic utilisant un algorithme d'intelligence artificielle, développé par la société GLEAMER, est destiné à optimiser les performances diagnostiques des radiologues, notamment dans la détection de fractures. L'IA BoneView™ (GLEAMER, Paris, France) a été conçue, entraînée et validée pour localiser les fractures récentes et semi-récentes sur des images radiographiques anonymisées en pleine résolution (33). Cette IA a montré ses performances de détection très encourageantes des fractures périphériques chez les enfants de plus de deux ans (32,37). Cependant, ce logiciel n'a pas été entraîné spécifiquement sur les fractures issues de traumatisme non accidentel chez les nourrissons.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les performances diagnostiques d'un logiciel d'IA (BoneView de GLEAMER) sur la détection des fractures osseuses non accidentelles des os longs chez les enfants de moins de 2 ans, notamment en fonction du type de lésions observées.

Design de l'étude

Cette étude observationnelle rétrospective en soins courants est monocentrique, réalisée dans un Hôpital Universitaire à rayonnement régional (Hôpital Arnaud de Villeneuve). Le comité d'examen institutionnel (« Institutional Review Board » IRB) du CHU de Montpellier, a approuvé cette étude (IRB ID : 202201117). Notre étude est conforme aux directives STARD (Standards for Reporting of Diagnostic Accuracy Studies) (38).

Population

Critères d'inclusion

Ont été inclus dans l'étude tous les enfants de moins de deux ans, pris en charge dans le service de radiopédiatrie d'Arnaud de Villeneuve (ADV), Montpellier, et ayant bénéficié d'un bilan radiographique complet standardisé (recommandation SFIPP) pour une suspicion de traumatisme non accidentel sur une période consécutive allant de septembre 2020 à octobre 2022.

Les comptes-rendus de ces examens étaient disponibles et validés par deux radiopédiatres selon le protocole de lecture en vigueur.

Ont été exclus les bilans radiographiques équivalents réalisés dans une autre indication ou les bilans sans compte-rendu.

Gold standard (GS)

En cas de suspicion de traumatisme non accidentel, un bilan radiographique du squelette entier (protocole GED) a été effectué dans le service de radiopédiatrie de l'hôpital d'ADV selon un protocole standardisé avec une double lecture prospective en aveugle des radiographies par deux radiopédiatres dont un bénéficiant d'une expertise en maltraitance. Dans les cas de bilan initial douteux ou normaux avec forte suspicion clinique, il a été réalisé un second bilan

radiographique complet à J10-14, sans dépasser J28, conformément aux recommandations (16), qui a permis de confirmer ou infirmer des images suspectes de maltraitance ou la détection de nouvelles fractures à l'aide des phénomènes des remodelages, rapides à cet âge.

La conclusion radiographique de la double lecture à l'issue du bilan radiologique initial constitue le gold standard de notre étude.

Logiciel d'IA BoneView

Le modèle d'intelligence artificielle utilisé par le logiciel d'IA BoneView est un réseau de neurones convolutif basé sur l'algorithme de segmentation d'image « Detectron 2 »(35), qui a été adapté à la détection de fracture. Pour le développement de l'algorithme de détection de fracture, environ 300000 radiographies de patients labellisées provenant de plus de 60 services de radiologie entre janvier 2011 et mai 2021 ont été rassemblées. Cet ensemble de données a alors été divisé de manière aléatoire en un ensemble d'entraînement de 70 %, un ensemble de validation de 10 % et un ensemble de test interne de 20 % (36). Dans cet ensemble de radiographies, nous ignorons la quantité de radiographies réalisées chez les enfants de moins de deux ans, nous considérons qu'il n'a pas été entraîné spécifiquement sur les fractures issues de traumatismes non accidentels chez les nourrissons.

Le logiciel IA Boneview a été appliqué sur ces radiographies en post traitement. Ce logiciel utilise deux seuils prédéfinis basés sur la confiance dans la région d'intérêt identifiée par l'algorithme.

- Un seuil de sensibilité élevé appelé « DOUBT FRACT » (confiance de l'IA entre 50% et 90%), représenté par une case en pointillés autour de la région d'intérêt.
- Un seuil de spécificité élevé appelé « FRACT » (confiance de l'IA supérieure à 90%), représenté par une case en trait plein autour de la région d'intérêt.
- Si le pourcentage de confiance de l'IA est inférieur à 50%, le système d'IA considère qu'aucune fracture n'a été détectée (aucune région d'intérêt).

Les résultats « Doubt » et « Fract » correspondent tous deux à la visualisation radiographique d'une fracture mais avec deux niveaux de confiance différents (intermédiaire et élevés respectivement). Ces seuils ont été sélectionnés préalablement dans l'ensemble du test de développement, de façon totalement indépendante des données de la présente étude clinique. Ainsi l'IA donne un résultat par radiographie réalisée et le résultat final de l'ensemble du bilan radiographique.

Recueil des données d'imagerie

Tout d'abord, chaque radiographie a été analysée par le gold standard (GS) en segmentant, en trois parties (diaphyse, métaphyse proximale ou métaphyse distale) chaque os long périphérique (fémur, tibia, fibula, humérus, radius et ulna). Chaque fracture détectée par le GS a ainsi été classée par région anatomique distinctes (métaphysaire ou diaphysaire, os concerné, latéralité). Cela représente 36 unités radiologiques par patient : 6 (Os longs périphériques hémicorporels) x 3 (zones anatomiques par os : métaphyse distale, diaphyse et métaphyse proximale) x 2 (bilatéralité).

Puis pour chaque bilan radiographique, il a été reporté la conclusion finale radiologique de la double lecture à l'issue du premier bilan radiologique qui constitue le gold-standard (présence, doute ou absence), en indiquant la présence de fractures par site lésionnel, et le cas échéant le nombre de fractures. Il a également été reporté la conclusion à l'issue de l'éventuel deuxième contrôle radiographique J10-14.

Dans un second temps, rétrospectivement, les résultats de l'IA seule pour chaque unité radiologique ont été extraites par un radiologue (RM) en indiquant la présence ou non de fractures détectées, leurs localisations, et le nombre total de lésion.

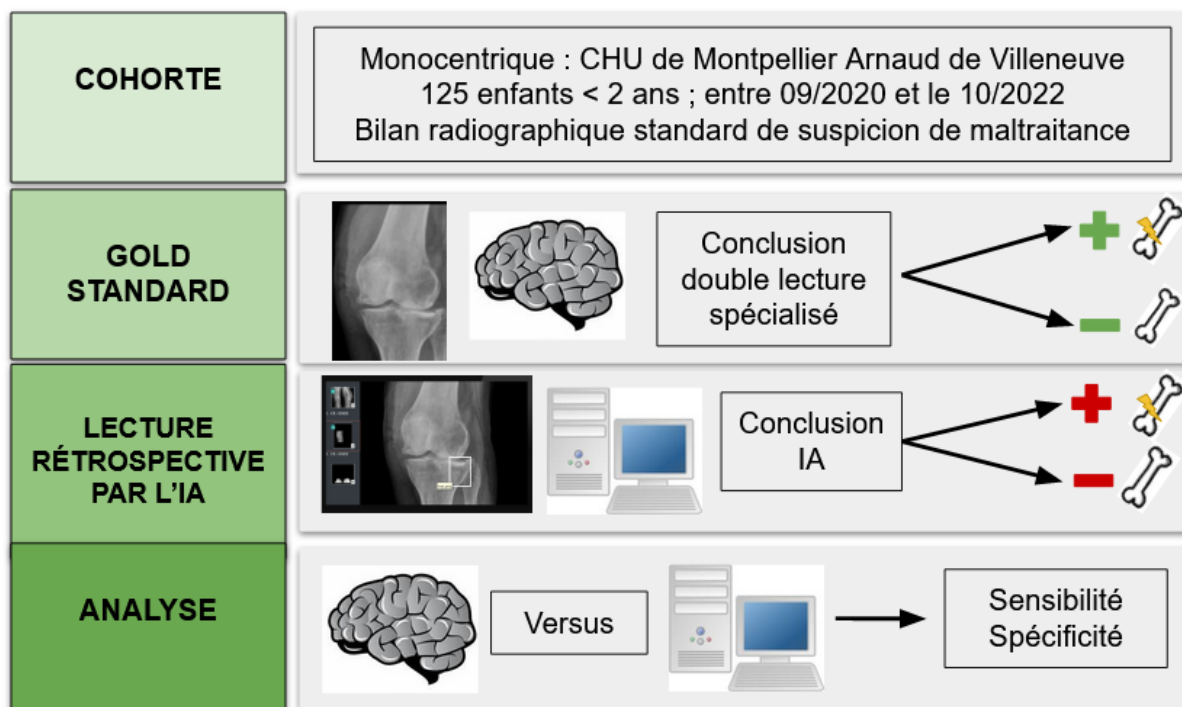


Figure 1 : Design de l'étude. Constitution de la cohorte de patients, l'établissement du Gold standard, de l'analyse par l'IA et les analyses effectuées (Source : création personnelle)

Analyse statistique

Les variables qualitatives (sexe, présence de fractures, résultats finaux des bilans radiographiques) ont été décrites par les effectifs et les pourcentages associés. Les variables quantitatives (âge, nombre de fractures par patients) ont été décrites par les statistiques usuelles : moyennes et écart-types et médianes.

Les résultats de l'IA, à l'issue du premier bilan radiographique, ont été comparées à ceux du gold standard pour chaque unité radiologique (soit 36 régions anatomiques distinctes par enfant). La performance diagnostique du logiciel d'IA a ensuite été estimée par les différents paramètres obtenus grâce aux croisements des résultats de l'IA avec les résultats du gold standard (ici double lecture radiologique par deux radiopédiatres à l'issue du premier bilan radiographique). Les doutes émis par le GS et par le logiciel d'IA ont été tous deux regroupés comme positif (présence d'une fracture) dans l'analyse des performances diagnostiques, se rapprochant ainsi de la pratique réelle. Seuls les résultats du premier bilan radiographique ont été utilisés, car la majorité des patients ne bénéficient que d'un seul bilan.

La sensibilité (Se) du logiciel d'IA est calculée chez les sujets avec un test de référence positif (donc présence d'une fracture) : $Se = VP/(VP+FN)$. La spécificité (Sp) du logiciel d'IA est calculée chez les sujets avec un test de référence négatif (donc absence de fracture) : $Sp = VN/(VN+FP)$. La valeur prédictive d'un test positif ou valeur prédictive positive (VPP) ainsi que la valeur prédictive d'un test négatif ou valeur prédictive négative ont été calculé avec les formules respectives suivantes : $VPN : VPP = VP/(VP+FP)$ et $VPN = VN/(VN+FN)$.

L'ensemble des résultats obtenus, pour chaque unité radiologique étudiée, a ensuite été compilé pour avoir des valeurs concernant les lésions métaphysaires et diaphysaires, et sur l'ensemble des fractures. La sensibilité (Se), la spécificité (Sp), les valeurs prédictives positive (VPP) et négative (VPN) ont été calculées et présentées avec leur intervalle de confiance à 95%. Les résultats ont été représentés par des forests plots (graphiques en forêt).

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide de SAS version 9.4 (SAS Institute, Cary, NC, USA) et R version 4.1.3.

Analyse primaire : évaluation de la performance diagnostique (sensibilité, spécificité, VPP, VPN) du logiciel d'IA étudié (Gleamer) dans la détection de fractures d'enfants de moins de 2 ans suspectés de traumatisme non accidentel.

Analyses secondaires :

- Épidémiologie des atteintes rencontrées dans notre série.
- Évaluation des performances diagnostiques du logiciel d'IA selon le type de fracture (métaphysaire ou diaphysaire).

RÉSULTATS

Caractéristiques des patients

Au total, 125 enfants ont été inclus dans notre étude. Cela correspond à un total de 4500 unités radiologiques distinctes (125 enfants x 36 unités radiologiques par patient).

Cinq patients ont été exclus car le bilan radiographique complet avait été réalisé dans une autre indication que celle de la recherche de lésions infligées. Un enfant a été exclu devant l'absence de compte-rendu radiographique en double lecture retrouvé.

Sur les 125 patients, 56 (44,8%) sont de sexe féminin et 69 (55,2%) sont de sexe masculin, avec un âge moyen de 7,9 mois (\pm 6.6 mois).

Parmi eux, 36 enfants (28,8 %) présentaient au moins une fracture sur l'ensemble du bilan radiographique de dépistage à l'issue d'un bilan radiologique unique, soit à l'issue du deuxième contrôle radiographique J10) (Cf. Table 1).

Variables	Modalités	Population totale
Age au moment de l'examen (en mois)		N=125
	Moyenne (\pm ET)	7.9 (\pm 6.6)
	Médiane (Q1 ; Q3)	6.0 (2.7 ; 11.9)
Sexe		
	Filles	56/125 (44.8 %)
	Garçons	69/125 (55.2 %)
Résultats bilan radiographique		
	Positif	36/125 (28,8 %)
	Négatif	89/125 (71,2 %)

Table 1 : Caractéristiques de la population étudiée. La positivité du bilan radiographique est définie par la présence d'au moins une lésion décrite par le Gold-Standard sur l'ensemble du bilan radiographique.

Sur les 125 bilans radiographiques, 44 enfants ont bénéficié d'un deuxième contrôle radiographique à 10-15 jours d'intervalles. Ce deuxième contrôle a permis la découverte ou la confirmation de 26 nouvelles fractures chez 11 enfants, et a infirmé 13 lésions suspectes de fractures chez 5 enfants. Les 28 autres deuxièmes contrôles n'ont pas apporté de modification par rapport au compte-rendu initial, qu'il y ait des fractures ou pas sur celui-ci.

A noter que dans notre étude, aucun enfant n'a bénéficié d'une scintigraphie osseuse en cas de bilan initial douteux ou normal avec forte suspicion clinique.

Caractéristiques des fractures décrites par le gold standard

D'après la table 2, en comptant la présence de fractures multiples pour un même enfant, un total de 82 fractures avérées (exclusion des doutes) a été diagnostiqué par le Gold-standard. Elles ont été classées en 31 fractures diaphysaires, soit 37,8% des fractures totales, et 51 lésions métaphysaires, soit 62,2% des fractures totales. Sur les 4500 unités radiologiques de notre population, cela représente une prévalence moyenne de 1,8 % de fracture par région anatomique.

Les fractures ont également été classées par grande localisation anatomique : humérus, avant-bras regroupant les radius et les ulnas, fémurs, et les jambes regroupant les tibias et les fibulas. Les fractures diaphysaires, dans notre étude, sont principalement localisées au niveau des avant-bras (n=15/31 ; 48,4%), tandis que les lésions métaphysaires sont majoritairement situées au niveau du tibia et de la fibula qui composent la jambe (n=31/51 ; 60,9%).

	Lésions totales GS	Lésions diaphysaires GS	Lésions métaphysaires GS
Fémurs	16 (19.5 %)	7 (22.6 %)	9 (17,7 %)
Avant-bras	25 (30.5 %)	15 (48.4 %)	10 (19,6 %)
Humérus	5 (6.1%)	4 (12.9 %)	1 (2 %)
Jambes	36 (43.9 %)	5 (16.1 %)	31 (60,9 %)
Total	82	31	51

Table 2 : Nombre de fractures avérées diagnostiquées par le Gold- Standard (GS) dans les bilans radiographiques, puis subdivisées en deux groupes : lésions diaphysaires et lésions métaphysaires.

Concernant les lésions métaphysaires, les genoux sont la partie anatomique la plus touchée, avec 39 fractures, soit 47,6% de l'ensemble des atteintes métaphysaires, suivi des chevilles (n=19 ; 23.2%), des poignets (n=18 ; 22%), des coudes (n=5 ; 6%), des épaules (n=1 ; 1,2 %) et aucune lésion au niveau de la hanche (Cf. Fig. 2 en annexes).

Performances du logiciel d'IA Boneview

Fractures détectées

D'après la table 3, le logiciel d'IA a détecté en tout 37 fractures avec un indice de confiance élevé (exclusion des doutes), un enfant pouvant avoir plusieurs fractures, contre 82 chez le GS.

Parmi celles-ci, 31 lésions diaphysaires ont été détectées contre 31 par le GS, mais avec une répartition différente des sites lésionnels, par exemple 20 fractures de l'avant-bras auraient été vues par le logiciel d'IA contre 15 par le GS. Cela souligne la présence de plusieurs faux-négatifs et faux-positifs.

Seulement 6 lésions métaphysaires ont été détectées avec un haut degré de certitude par le logiciel d'IA, contre 51 par le Gold Standard, montrant la présence de nombreux faux négatifs.

	Lésions totales IA	Lésions diaphysaires IA	Lésions métaphysaires IA
Fémurs	4 (10.8 %)	3 (9.7 %)	1 (16,7 %)
Avant-bras	22 (59.5 %)	20 (64.5 %)	2 (33,3 %)
Humérus	4 (10.8 %)	4 (12.9 %)	0 (0,0 %)
Jambes	7 (18.9 %)	4 (12.9 %)	3 (50%)
Total	37	31	6

Table 3 : Nombre de fractures détectées par le logiciel d'intelligence artificielle (IA) avec un haut niveau de certitude, dans les bilans radiographiques, et subdivisé en deux groupes : lésions diaphysaires et lésions métaphysaires.

Performances diagnostiques de l'IA

Les performances de détection de fracture par le logiciel d'IA ont ensuite été comparées au gold standard pour chaque unité radiologique. Pour être au plus proche de la pratique réelle nous avons considéré les doutes du GS et de l'IA comme positifs.

L'IA Boneview de Gleamer a une sensibilité globale de 26 % [CI 95% : 22 - 38], une spécificité de 99 % [CI 95% : 97 - 97], une valeur prédictive positive de 30 % [CI 95% : 29 - 39] et une valeur prédictive négative de 98 % [CI 95% : 97 - 99] dans la détection des fractures chez les enfants de deux ans de notre étude dans le cadre d'une suspicion de traumatisme non accidentel, d'après la table 4.

Concernant la détection des fractures diaphysaires, l'IA Boneview de Gleamer a une sensibilité de 46 % [CI 95% : 33 - 60], une spécificité de 96 % [CI 95% : 94 - 97], une valeur prédictive positive de 28 % [CI 95% : 19 - 39] et une valeur prédictive négative de 98 % [CI 95% : 97 - 98], d'après la table 4.

Pour la détection des fractures métaphysaires, l'IA Boneview de Gleamer a une sensibilité de 18 % [CI 95% : 11 - 28] et une spécificité de 99 % [CI 95% : 99 - 99] une valeur prédictive positive de 35 % [CI 95% : 21 - 51] et une valeur prédictive négative de 98 % [CI 95% : 97 - 98] d'après la table 4.

Les figures 2 à 9 en annexes détaillent l'ensemble des précédents résultats en fonction des sites lésionnels.

	Sensibilité % [CI 95 %]	Spécificité % [CI 95 %]	VPP % [CI 95 %]	VPN % [CI 95 %]
Total fractures	29% [22 ; 38]	99% [97 ; 99]	30 % [23 ; 39]	98% [97 ; 99]
Fractures diaphysaires	46% [33 ; 60]	96% [94 ; 97]	28 % [19 ; 39]	98% [97 ; 98]
Fractures métaphysaires	18% [11 ; 28]	99% [99 ; 99]	35 % [21 ; 51]	98% [97 ; 98]

Table 4 : Résumé des performances diagnostiques du logiciel d'IA Boneview de Gleamer pour la détection de l'ensemble des fractures, et dans les sous-catégories, fractures diaphysaires et métaphysaires, comparativement au gold standard.

DISCUSSION

Dans le contexte de la maltraitance, tous les types de fracture ont été rapportés, cependant certaines lésions sont particulièrement spécifiques d'une origine non accidentelle, telles les fractures métaphysaires chez les enfants de moins de deux ans (5). La détection de ces lésions profondes osseuses chez les enfants de moins de deux ans, a un impact primordial sur la suite de la prise en charge en orientant, ou non, vers la suspicion de sévices infligés. Des travaux réalisés sur la détection assistée par intelligence artificielle (IA) des fractures périphériques chez les adultes (33) et les enfants de plus de deux ans, ont présenté des résultats encourageants (36,37). Il pourrait être utile de disposer d'un outil d'aide d'IA, pour accompagner le radiologue dans le dépistage des fractures non accidentelles chez les nourrissons.

Au total, 125 enfants ont été inclus dans notre étude. Parmi eux, 36 enfants (28,8 %) présentaient au moins une fracture sur l'ensemble du bilan radiographique de dépistage. Les localisations des sites fracturés dans notre étude diffèrent sur certains points de l'épidémiologie décrite dans la littérature. Les lésions diaphysaires de l'humérus (12,9%) et du fémur (22,6%) sont nettement moins nombreuses par rapport à celles de l'avant-bras (48,4%) alors qu'il s'agit des deux premiers sites de fracture diaphysaire dans la littérature. L'atteinte métaphysaire de l'humérus (2%) est rare dans notre population alors qu'elle est relativement présente dans la littérature, mais les principales lésions métaphysaires de notre étude sont concordantes avec l'épidémiologie connue (métaphyse distale du fémur à 17,7 %, métaphyses proximale et distale du tibia à 60.9%) (5). La légère prédominance masculine (55,2% versus 44,8%) est concordante avec la littérature (16).

Dans notre étude, le logiciel d'IA Boneniew de Gleamer a présenté des performances diagnostiques des fractures globalement assez médiocres (sensibilité de 26 % [CI 95% : 22 - 38], une spécificité de 99 % [CI 95% : 97 - 97]), difficilement utilisable en pratique clinique, avec cependant un certain degré de variabilité en fonction du type de lésions osseuses observées. Il

affiche une meilleure sensibilité (46 % [CI 95% : 33 - 60]) concernant le dépistage des fractures diaphysaires, même si cela reste très insuffisant. Bien que très fréquentes, ces lésions représentent une faible spécificité de traumatisme non accidentel, néanmoins, leur survenue accidentelle chez un nourrisson n'ayant pas acquis la marche est très peu probable. L'IA s'est révélée quasi-inutile concernant la détection des fractures métaphysaires, avec une sensibilité de 18 % [CI 95% : 11 - 28], alors que ce sont des lésions fréquentes (30 à 50 % des cas de maltraitances chez les moins de 18 mois (17)) et particulièrement spécifiques de traumatismes non accidentels chez le nourrisson. Certes la spécificité diagnostique de ce modèle d'IA s'avère très bonne dans notre étude, mais les paramètres le plus importants dans un outil de dépistage est sa capacité de détection des lésions difficiles à voir et d'exclure la maladie quand elle n'est pas présente, et cela nécessite une sensibilité élevée.

Nous avons pu constater dans notre étude une très bonne VPN (98% [CI 95% : 97-99%]) du logiciel d'IA malgré la présence d'un nombre important de faux négatifs, notamment concernant les atteintes métaphysaires. Cela s'explique par le fait que la VPP et la VPN sont influencées par la prévalence d'une maladie, à contrario de la sensibilité et la spécificité qui sont des caractéristiques intrinsèques au test évalué qui ne se modifient pas. Ainsi une prévalence basse diminue la VPP et augmente la VPN, car le nombre de faux négatifs et de vrais positifs vont tous deux diminuer. La prévalence de fracture par unité radiologique (36 unités par enfant) étant en effet très basse dans notre étude, calculée à 1,8%, cela explique cette VPN très élevée malgré une sensibilité médiocre.

Nous nous attendions à une différence de performance de dépistage entre les lésions diaphysaires et métaphysaires, en défaveur de ces dernières. En effet, ces fractures atteignent la zone fragile de la spongieuse primaire, qui est une zone de faiblesse maximale chez le nourrisson, et pour cette raison elles se rencontrent rarement après l'âge de 2 ans (4,11,17).

Ses performances médiocres concernant les fractures métaphysaires s'expliquent par le fait que l'outil d'IA n'a pas encore été développé spécifiquement dans cette intention. En effet, le modèle a été entraîné avec un large jeu de données de plus de 300 000 fractures, mais il est très

probable que le pourcentage de fractures d'enfant de moins de 2 ans soit très faible, voire nul, dans ce panel, car ces lésions métaphysaires, dites "classiques" sont quasi-inexistantes passées un certain âge. Pour entraîner un algorithme, il est essentiel de disposer de nombreuses données annotées de qualité et enrichies (les données doivent contenir suffisamment de cas de chaque classe) (39). Il serait nécessaire d'entraîner ce modèle d'IA plus spécifiquement sur les lésions de traumatisme non accidentel chez les enfants en bas âge, et plus spécifiquement sur les lésions métaphysaires.

Les piètres performances diagnostiques concernant les lésions diaphysaires étaient cependant plus inattendues. En effet, il s'agit de fractures que l'on peut observer chez des enfants plus âgés, et le logiciel Boneview de Gleamer aurait pourtant démontré son intérêt diagnostique dans la population pédiatrique des plus de deux ans (32,37). On peut cependant noter que la moyenne d'âge dans ces études est relativement "élevée" autour de 11 ans (37). Or, les propriétés biodynamiques et caractéristiques anatomiques du squelette (présence d'un cartilage de croissance, élasticité osseuse, solidité du périoste, etc.) évoluent au fil de la croissance (5). Il existe des différences importantes, entre le squelette d'un très jeune enfant et un squelette d'adolescent qui va tendre à se rapprocher progressivement de celui de l'adulte, avec des présentations et topographies lésionnelles distinctes. Notre étude souligne donc le fait qu'on ne peut pas extrapoler les bonnes performances du logiciel d'IA sur la détection des fractures diaphysaires obtenues chez les adultes et enfants de plus de deux ans, à notre population de nourrisson.

Le deep learning (apprentissage « profond ») produit des modèles difficilement explicables pour l'humain qui agissent fonctionnellement comme des « boîtes noires », ce qui ne permet pas facilement d'explorer les raisons du nombre important de faux-positifs et faux-négatifs dans notre population de moins de 2 ans. Des exemples de discordances du logiciel d'IA avec le gold standard sont visibles dans les annexes (Cf. figure 10).

Actuellement à notre connaissance, il n'existe aucune base de données labellisées par des experts sur les lésions de maltraitance chez les enfants de moins de 2 ans. La réalisation d'un algorithme d'IA spécifiquement entraîné sur la détection de ces lésions nécessiterait une grande quantité de données, ce qui est difficile à réaliser en pratique dans ce secteur de niche. De plus, la rentabilité commerciale pourrait être en inadéquation avec l'investissement financier nécessaire dans le développement de l'algorithme. Cela dit, porter un projet vu comme humaniste par une entreprise privée pourrait être un outil marketing intéressant, et être à l'origine d'un véritable levier commercial en mettant en lumière leurs autres projets par la même occasion.

Le développement d'un modèle de Deep Learning nécessite une grande quantité de données ("dataset") sur lesquelles il sera entraîné. Il est aujourd'hui primordial de pouvoir clairement comprendre les méthodes de recueil et de labellisation de ces données, et la représentativité de chaque lésion ("class balancing" (39)), mais il existe actuellement une certaine opacité de ces données sous réserve de la protection de la propriété intellectuelle de la part des entreprises privées. Lors du développement d'un outil d'IA d'aide au diagnostic, il est également essentiel d'évaluer le modèle par des validations externes rétrospectives, ainsi qu'une validation en conditions cliniques prospectives, si possible multicentrique. La revue de Kelly et al (40) a recensé tous les articles traitant de Deep Learning en imagerie médicale publiés entre 2015 et 2019, où ils ont identifié 98 % articles sans données prospectives, et 34% sans validation externe. Cela nous montre qu'il existe de nombreuses voies d'amélioration dans le domaine de l'intelligence artificielle, notamment dans celui d'aide au diagnostic qui est en plein essor, et l'importance pour les radiologues et autres spécialités médicales d'en avoir des connaissances approfondies afin de mieux reconnaître les éventuels biais.

L'un des avantages que pourrait apporter l'analyse assistée par l'IA est d'éviter un biais d'ancrage (41), lié au fait de s'arrêter dans l'analyse radiographique après la visualisation d'une seule fracture, avec le risque d'en manquer d'autres en cas de fractures multiples.

L'une des dérives de l'IA serait l'utilisation inappropriée de logiciel de détection d'image dans les suspicions de traumatisme non accidentel pour compenser le manque de radiologues spécialisés, en considérant des lésions uniquement détectées par l'IA comme une possible maltraitance. Cela souligne l'importance de faire réaliser ces bilans de suspicion de traumatisme non accidentel dans les centres-experts ou semi-experts dans le respect des recommandations que ce soit avec ou sans l'aide de l'IA.

Notre étude souligne l'intérêt du deuxième bilan radiographique à J10-14 qui a permis la découverte ou la confirmation de 26 nouvelles fractures chez 11 enfants, et a infirmé 13 lésions suspectes de fractures chez 5 enfants, sur un total de 125 patients, c'est à dire une modification du compte-rendu initial chez plus de 10 % des enfants dans notre étude. L'analyse comparative des clichés permet de voir l'apparition de mécanismes de remodelage post-fracturaire d'une lésion passée initialement inaperçue ou au contraire l'absence de modification est plutôt en faveur d'un diagnostic différentiel (variantes de la normale, dysplasie, etc.) (19). L'analyse des examens antérieurs fait partie intégrante de l'interprétation d'un examen quel que soit la spécialité radiologique, de même que la connaissance de l'examen clinico-biologique d'un patient, actuellement les modèles d'IA ne prennent pas en compte l'ensemble de ses données.

Notre étude présente certaines limites. Tout d'abord, il s'agit d'une étude monocentrique avec donc un nombre réduit de lecteurs. Néanmoins les radiographies ont ainsi toutes été réalisées selon le même protocole, respectant les recommandations nationales (recommandation SFIPP) et internationales, limitant ainsi « l'effet-centre » de notre étude monocentrique. De plus, le gold standard est le diagnostic final d'une double lecture de l'examen par deux radiopédiatres sénior dont un bénéficiant d'une expertise dans la maltraitance, ce qui respecte également les recommandations.

Dans le cadre du dépistage des lésions de maltraitance, l'IA pourrait avoir d'autres applications très utiles comme la recherche des fractures de côtes. Le diagnostic radiologique des fractures costales sur les clichés de face et d'oblique peut s'avérer difficile en l'absence de

déplacement et est souvent réalisé secondairement devant l'apparition du cal osseux. Devant la fréquence de ce type d'atteinte et sa spécificité dans le cadre des traumatismes non accidentels (17), il pourrait être utile de disposer d'un modèle d'IA pour les détecter plus précocement.

En conclusion, nous avons montré qu'il n'est pas possible d'extrapoler les performances diagnostiques d'un logiciel d'IA de détection des fractures périphériques sur une population pédiatrique de moins de 2 ans, notamment à la recherche de lésions métaphysaires spécifiques de maltraitance.

BIBLIOGRAPHIE

1. LOI n° 2022-140 du 7 février 2022 relative à la protection des enfants (1). 2022-140 févr 7, 2022.
2. Gilbert R, Widom CS, Browne K, Fergusson D, Webb E, Janson S. Burden and consequences of child maltreatment in high-income countries. *The Lancet*. janv 2009;373(9657):68-81.
3. Tursz A, Crost M, Gerbouin-Rérolle P, Cook JM. Underascertainment of child abuse fatalities in France: Retrospective analysis of judicial data to assess underreporting of infant homicides in mortality statistics. *Child Abuse Negl*. juill 2010;34(7):534-44.
4. Lonergan GJ, Baker AM, Morey MK, Boos SC. From the Archives of the AFIP : Child abuse : radiologic pathologic correlation ; *RadioGraphics*
5. Panuel M, Chaumoitre K, Petit P, Jouve JL. Chapitre 4. Lésions squelettiques. Lavoisier; 2013
6. Adamsbaum C, Husson B. Le syndrome du bébé secoué : quelles lésions en imagerie ? *Arch Pédiatrie*. 1 sept 2012;19(9):1002-7.
7. Kleinman PK. Problems in the diagnosis of metaphyseal fractures. *Pediatr Radiol*. juin 2008;38(S3):388-94.
8. Metaphyseal abnormalities in children: pathophysiology and radiologic appearance. *ajr*
9. Carty H, Pierce A. Non-accidental injury: a retrospective analysis of a large cohort. *Eur Radiol*. déc 2002;12(12):2919-25.
10. Loder RT, Feinberg JR. Orthopaedic Injuries in Children With Nonaccidental Trauma: Demographics and Incidence From the 2000 Kids' Inpatient Database. *J Pediatr Orthop*. juin 2007;27(4):421.
11. Kleinman PK, éditeur. Diagnostic imaging of child abuse. Third edition. Cambridge, United Kingdom ; New York: Cambridge University Press; 2015. 730 p.
12. Chapman S, Hall CM. Non-accidental injury or brittle bones. *Pediatr Radiol*. févr 1997;27(2):106-10.
13. Kleinman PK. Problems in the diagnosis of metaphyseal fractures. *Pediatr Radiol*. 10 mai 2008;38(3):388.
14. Kleinman PK, Belanger PL, Karellas A, Spevak MR. Normal metaphyseal radiologic variants not to be confused with findings of infant abuse. *Am J Roentgenol*. avr 1991;156(4):781-3.
15. Ablin DS, Greenspan A, Reinhart M, Grix A. Differentiation of child abuse from osteogenesis imperfecta. *Am J Roentgenol*. mai 1990;154(5):1035-46.
16. Maltraitance chez l'enfant : repérage et conduite à tenir. Haute Autorité de Santé.
17. Offiah A, van Rijn RR, Perez-Rossello JM, Kleinman PK. Skeletal imaging of child abuse (non-accidental injury). *Pediatr Radiol*. 1 mai 2009;39(5):461-70.
18. Adamsbaum C, Méjean N, Merzoug V, Rey-Salmon C. How to explore and report children with suspected non-accidental trauma. *Pediatr Radiol*. juin 2010;40(6):932-8.
19. Anilkumar A, Fender LJ, Broderick NJ, Somers JM, Halliday KE. The role of the follow-up chest radiograph in suspected non-accidental injury. *Pediatr Radiol*. 13 févr 2006;36(3):216-8.
20. Wootton-Gorges SL, Stein-Wexler R, Walton JW, Rosas AJ, Coulter KP, Rogers KK. Comparison of computed tomography and chest radiography in the detection of rib fractures in abused infants. *Child Abuse Negl*. juin 2008;32(6):659-63.
21. Cattaneo C, Marinelli E, Di Giancamillo A, Di Giancamillo M, Travetti O, Vigano' L, et al. Sensitivity of autopsy and radiological examination in detecting bone fractures in an animal model: implications for the assessment of fatal child physical abuse. *Forensic Sci Int*. 20 déc 2006;164(2-3):131-7.
22. Proisy M, Vivier PH, Morel B, Bruneau B, Sembely-Taveau C, Vacheresse S, et al. Whole-body MR imaging in suspected physical child abuse: comparison with skeletal survey and bone scintigraphy findings from the PEDIMA prospective multicentre study. *Eur Radiol*. nov 2021;31(11):8069-80.
23. Perez-Rossello JM, Connolly SA, Newton AW, Zou KH, Kleinman PK. Whole-Body MRI in Suspected Infant Abuse. *Am J Roentgenol*. sept 2010;195(3):744-50.
24. LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. *Nature*. 28 mai 2015;521(7553):436-44.
25. Tang X. The role of artificial intelligence in medical imaging research. *BJR Open*. 28 nov 2019;2(1):20190031.

26. Sun R, Limkin EJ, Dercle L, Reuzé S, Zacharaki EI, Chargari C, et al. Imagerie médicale computationnelle (radiomique) et potentiel en immuno-oncologie. *Cancer/Radiothérapie*. 1 oct 2017;21(6):648-54.
27. Fenton JJ, Taplin SH, Carney PA, Abraham L, Sickles EA, D'Orsi C, et al. Influence of Computer-Aided Detection on Performance of Screening Mammography. *N Engl J Med*. 5 avr 2007;356(14):1399-409.
28. Thakur SK, Singh DP, Choudhary J. Lung cancer identification: a review on detection and classification. *Cancer Metastasis Rev*. sept 2020;39(3):989-98.
29. Belić M, Bobić V, Badža M, Šolaja N, Đurić-Jovičić M, Kostić VS. Artificial intelligence for assisting diagnostics and assessment of Parkinson's disease-A review. *Clin Neurol Neurosurg*. sept 2019;184:105442.
30. Offiah AC. Current and emerging artificial intelligence applications for pediatric musculoskeletal radiology. *Pediatr Radiol*. 16 juill 2021
31. The radiological investigation of suspected physical abuse in children | The Royal College of Radiologists.
32. Nguyen T, Maarek R, Hermann AL, Kammoun A, Marchi A, Khelifi-Touhami MR, et al. Assessment of an artificial intelligence aid for the detection of appendicular skeletal fractures in children and young adults by senior and junior radiologists. *Pediatr Radiol*. oct 2022;52(11):2215-26.
33. Duron L, Ducarouge A, Gillibert A, Lainé J, Allouche C, Cherel N, et al. Assessment of an AI Aid in Detection of Adult Appendicular Skeletal Fractures by Emergency Physicians and Radiologists: A Multicenter Cross-sectional Diagnostic Study. *Radiology*. juill 2021;300(1):120-9.
34. Meng XH, Wu DJ, Wang Z, Ma XL, Dong XM, Liu AE, et al. A fully automated rib fracture detection system on chest CT images and its impact on radiologist performance. *Skeletal Radiol*. 1 sept 2021;50(9):1821-8.
35. Wu, Yuxin, Alexander Kirillov, Francisco Massa, et al. (2019). Detectron2. <https://github.com/facebookresearch/detectron2>.
36. Guerhazi A, Tannoury C, Kompel AJ, Murakami AM, Ducarouge A, Gillibert A, et al. Improving Radiographic Fracture Recognition Performance and Efficiency Using Artificial Intelligence. *Radiology*. mars 2022;302(3):627-36.
37. Hayashi D, Kompel AJ, Ventre J, Ducarouge A, Nguyen T, Regnard NE, et al. Automated detection of acute appendicular skeletal fractures in pediatric patients using deep learning. *Skeletal Radiol*. nov 2022;51(11):2129-39.
38. Cohen JF, Korevaar DA, Altman DG, Bruns DE, Gatsonis CA, Hooft L, et al. STARD 2015 guidelines for reporting diagnostic accuracy studies: explanation and elaboration. *BMJ Open*. 14 nov 2016;6(11):e012799.
39. Seif G. Handling Imbalanced Datasets in Deep Learning. *Medium*. 2022
40. Kelly BS, Judge C, Bollard SM, Clifford SM, Healy GM, Aziz A, et al. Radiology artificial intelligence: a systematic review and evaluation of methods (RAISE). *Eur Radiol*. 2022;32(11):7998-8007.
41. Busby LP, Courtier JL, Glastonbury CM. Bias in Radiology: The How and Why of Misses and Misinterpretations. *Radiographics*. janv 2018;38(1):236-47.

INTRODUCTION

Figure I.1 : Cartilage de croissance

Figure I.2 : Aspect des fractures métaphysaires “en coin” et “anse de seau” en fonction de l’incidence. (Source : création Mathieu Lakshmanan).

Figure I.3 : Gauche : fracture métaphysaire en anse de seau tibiale distale gauche, avec apposition périostée. Droit : Fractures métaphysaires en coin fémorales distales et tibiales proximales. (CHU de Montpellier).

Figure I.4 : Fracture transversale déplacée de l’humérus droit avec cal osseux débutant (CHU de Montpellier).

Figure I.5 : Droite : Fracture spiroïde du tiers moyen du fémur gauche. Gauche : fracture plastique du la fibula droite, apposition périostée du tibia droit, fractures métaphysaires multiples (CHU de Montpellier).

Figure I.6 : Variantes de l’ossification métaphysaire. A gauche : aspect en marche d’escalier. Au milieu ; bec métaphysaire. A droite : Épine métaphysaire. (D’après (14))

Figure II.1 : Modèle de Deep Learning (source : création personnelle).

Figure II.2 : Modèle des réseaux de convolution (Source : création personnelle).

Figure II.3 : Description technique et fonctionnement de BoneView (source : création personnelle d’après GLEAMER).

Figure II.4 : Affichage des résultats finaux du logiciel BoneView dans le PACS (Source : GLEAMER).

Tableau I.1 : Lésions squelettiques des traumatismes non accidentels selon la spécificité et la fréquence. En gras les lésions particulièrement étudiées dans ce travail (Source : création personnelle d’après (5)).

Tableau I.2 : Datation des phénomènes de réparation post-fracturaire chez l’enfant (Source : création personnelle d’après (6)).

Tableau I.3 : Recommandations de la Société Francophone d’Imagerie Pédiatrique et Périnatale (SFIPP) pour l’exploration du squelette chez l’enfant de moins de 2 ans (Source : création personnelle d’après (16)).

ARTICLE

Table 1 : Caractéristiques de la population étudiée.

Table 2 : Nombre de fractures diagnostiquées par le Gold-Standard (GS) dans les bilans radiographiques.

Table 3 : Nombre de fractures détectées par le logiciel d’intelligence artificielle (IA) dans les bilans radiographiques.

Table 4 : Résumé des performances diagnostiques du logiciel d'IA Boneview de GLEAMER.

Figure 1 : Design de l'étude (création personnelle).

Figure 2 : Sensibilité du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées par sites lésionnels.

Figure 3 : Sensibilité du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées en lésions métaphysaires et lésions diaphysaires.

Figure 4 : Spécificité du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées par sites lésionnels.

Figure 5 : Spécificité du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées en lésions métaphysaires et lésions diaphysaires.

Figure 6 : Valeur prédictive positive du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées par sites lésionnels.

Figure 7 : Valeur prédictive positive du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées en lésions métaphysaires et diaphysaires.

Figure 8 : Valeur prédictive négative du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées par sites lésionnels.

Figure 9 : Valeur prédictive négative du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées en lésions métaphysaires et diaphysaires.

Figure 10 : Exemple de discordance entre le logiciel d'IA et le Gold standard.

ANNEXES

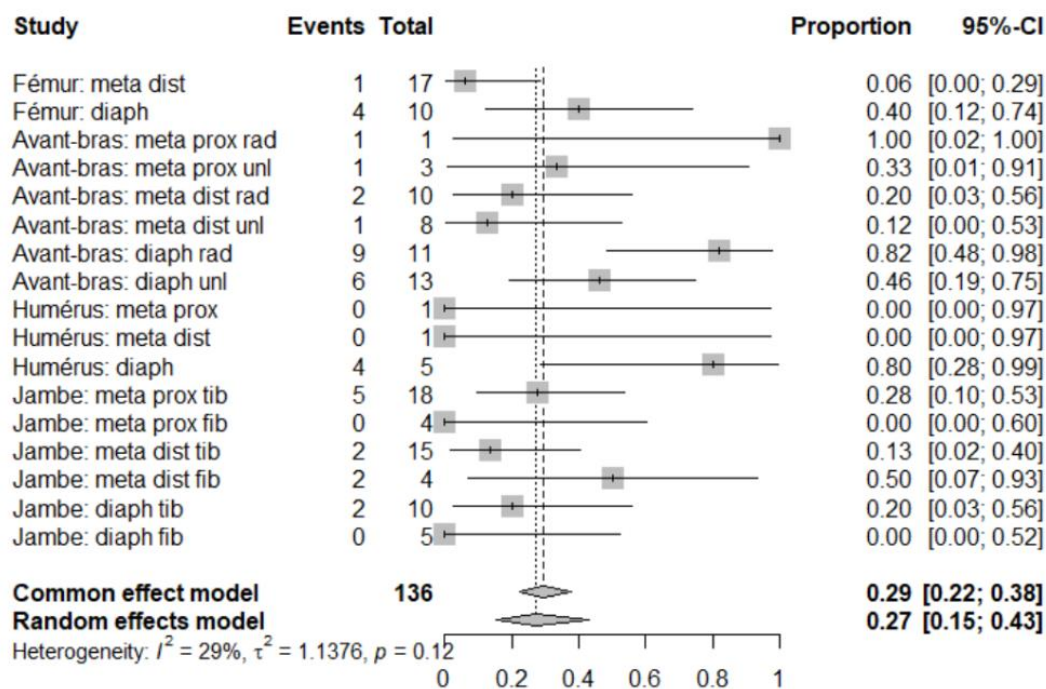


Figure 2 : Sensibilité du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées par sites lésionnels. Events correspond au nombre de "Vrai Positif" détectés par le logiciel d'IA, tandis que Total représente le nombre total de fractures par sites détectés par le gold standard (correspondant à la somme des "vrais positifs" et des "faux négatifs" de l'IA).

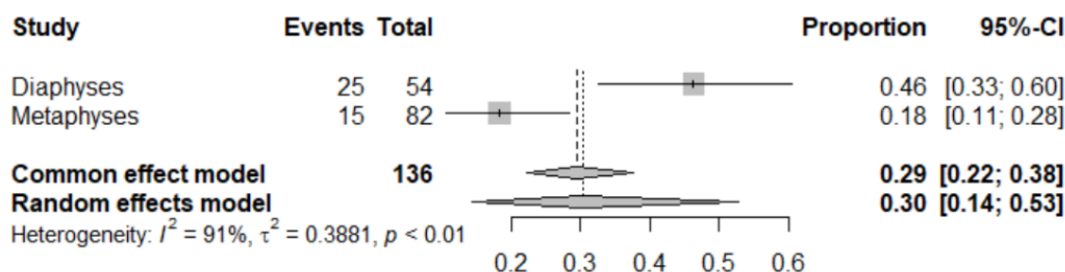


Figure 3 : Sensibilité du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées en lésions métaphysaires et lésions diaphysaires. Events correspond au nombre de "Vrai Positif" tandis que Total représente le nombre total de fractures par sites détectés par le gold standard (correspondant à la somme des "vrais positifs" et des "faux négatifs" de l'IA).

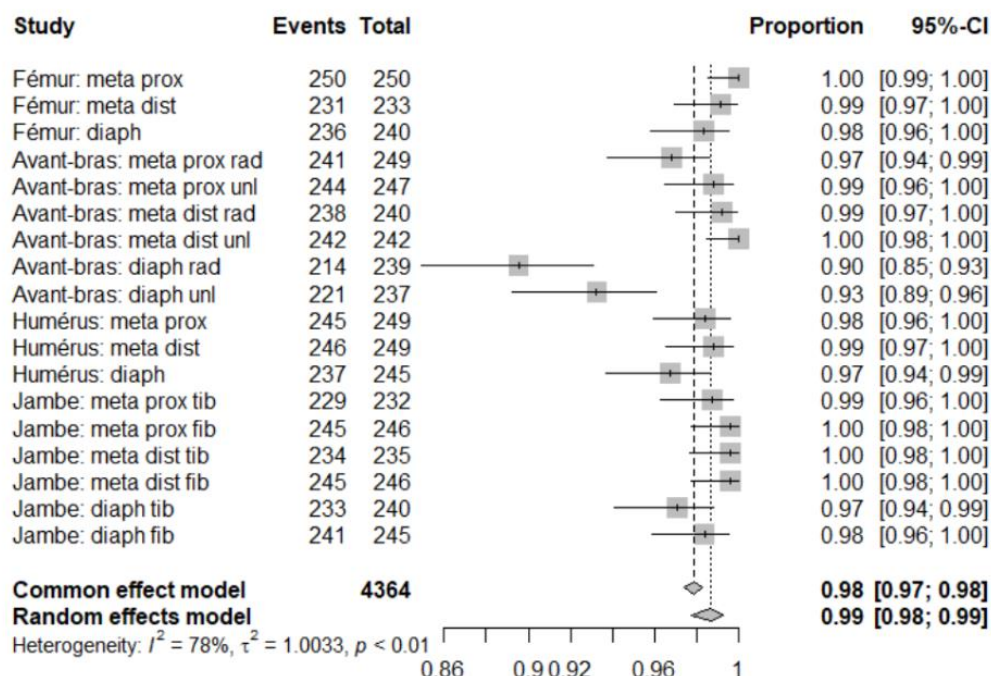


Figure 4 : Spécificité du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées par sites lésionnels. Events correspond au nombre de "vrais négatifs" détectés par le logiciel d'IA, tandis que Total représente le nombre total de sites non fracturés d'après le gold standard (correspondant à la somme des "vrais négatifs" et des "faux positifs" de l'IA).

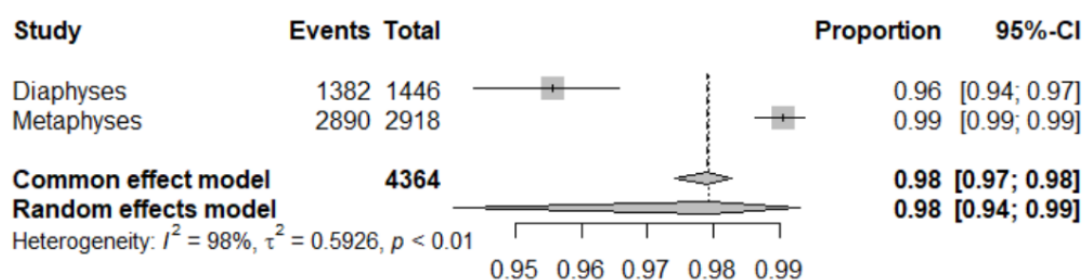


Figure 5 : Spécificité du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées en lésions métaphysaires et lésions diaphysaires. Events correspond au nombre de "vrais négatifs" détectés par le logiciel d'IA, tandis que Total représente le nombre total des métaphyses et diaphyses non fracturées d'après le gold standard (correspondant à la somme des "vrais négatifs" et des "faux positif" de l'IA).

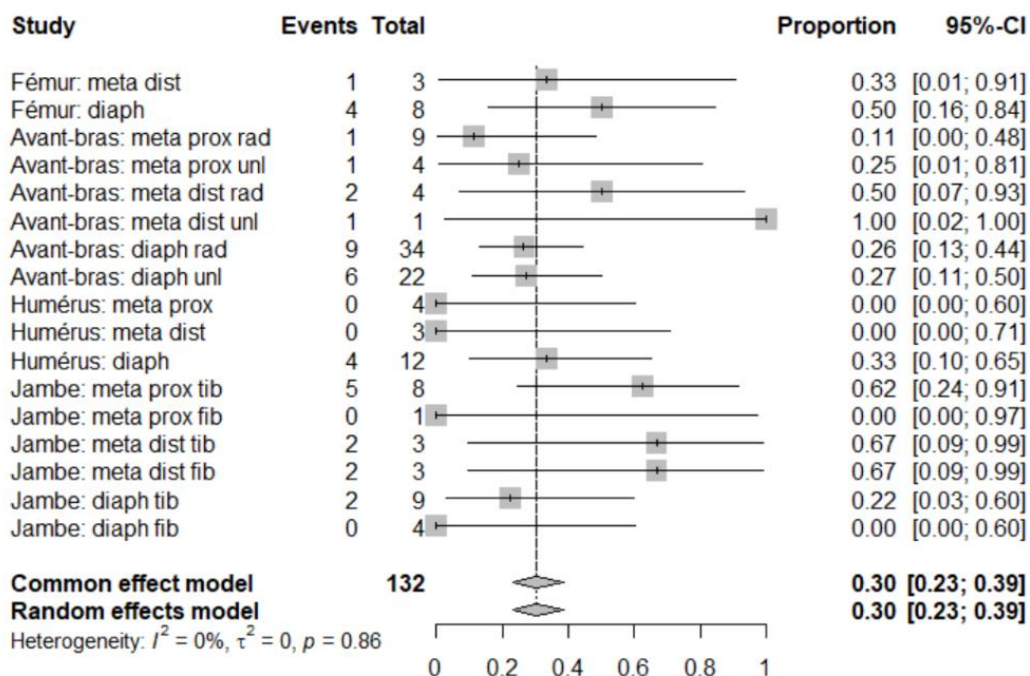


Figure 6 : Valeur prédictive positive du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées par sites lésionnels. Events correspond au nombre de "Vrais Positifs" détectés par le logiciel d'IA, tandis que Total représente le nombre total de lésions considérées comme positives par le logiciel d'IA (correspondant à la somme des "vrais positifs" et des "faux positifs" de l'IA).

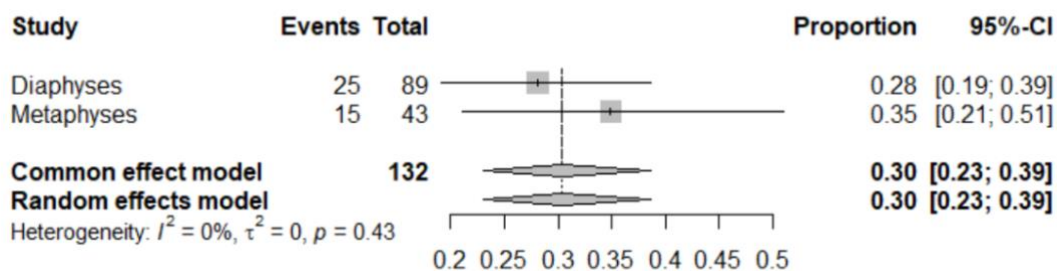


Figure 7 : Valeur prédictive positive du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées en lésions métaphysaires et diaphysaires. Events correspond au nombre de "Vrai Positif" détectés par le logiciel d'IA, tandis que Total représente le nombre total de lésions considérées comme positives par le logiciel d'IA (correspondant à la somme des "vrais positifs" et des "faux positifs" de l'IA).

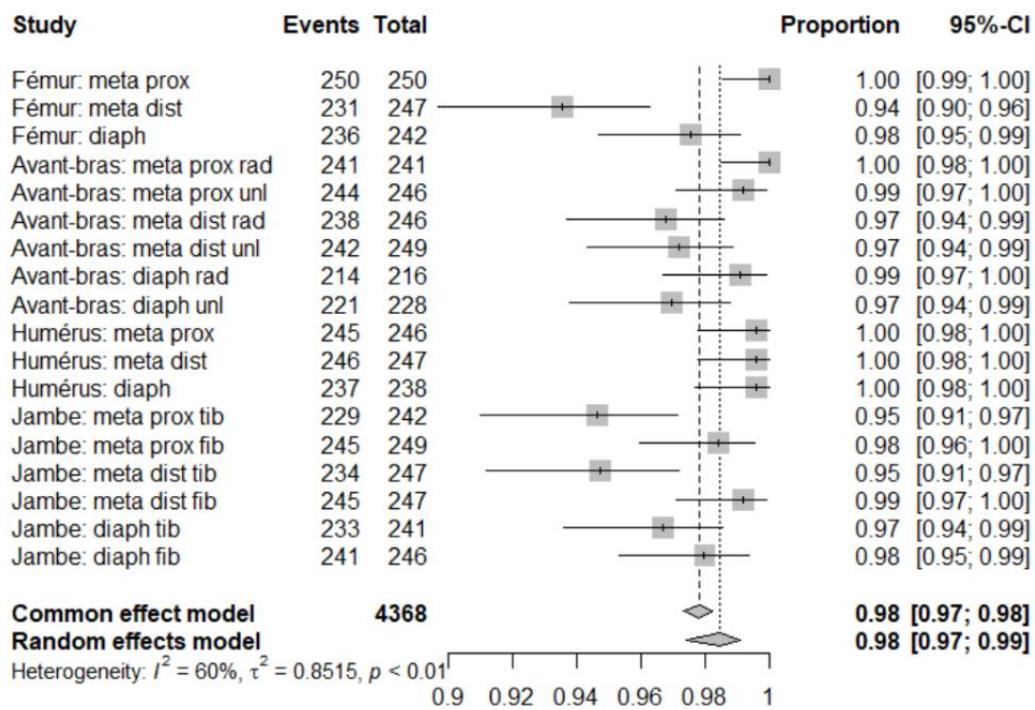


Figure 8 : Valeur prédictive négative du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées par sites lésionnels. Events correspond au nombre de "Vrai Négatif" détectés par le logiciel d'IA, tandis que Total représente le nombre total de sites lésionnels considérés comme négative par le logiciel d'IA (correspondant à la somme des "vrais négatifs" et des "faux négatif" de l'IA).

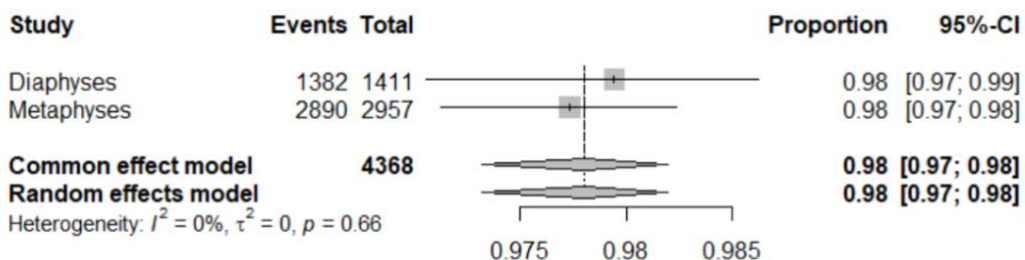


Figure 9 : Valeur prédictive négative du logiciel d'IA dans la détection des fractures classées en lésions métaphysaires et diaphysaires. Events correspond au nombre de "Vrai Négatif" détectés par le logiciel d'IA, tandis que Total représente le nombre total de sites lésionnels considérés comme négatif par le logiciel d'IA (correspondant à la somme des "vrais négatifs" et des "faux négatif" de l'IA).

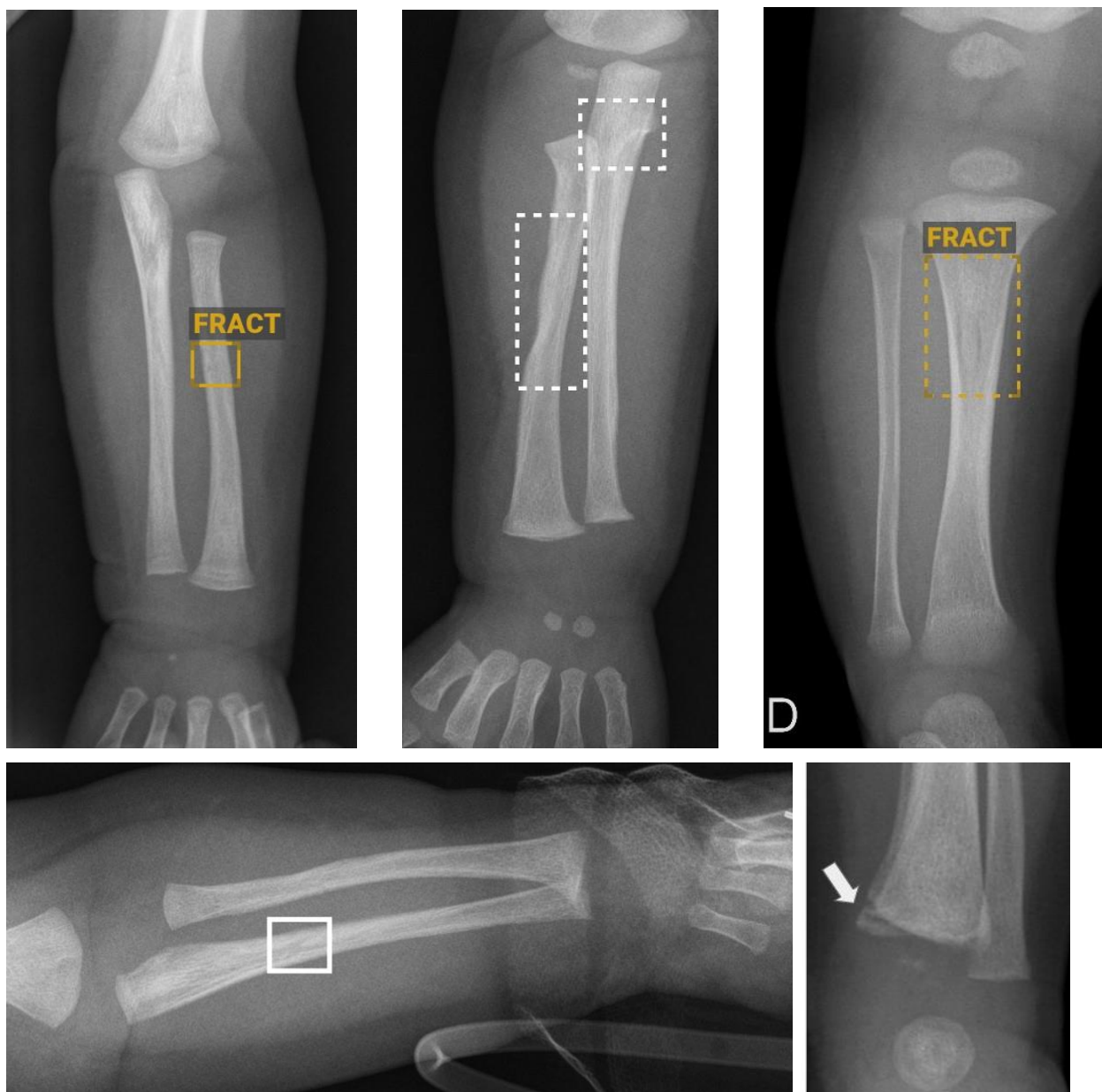


Figure 10 : Exemples de discordance entre le logiciel d'IA et le Gold standard. De gauche à droite et de haut en bas : Faux positif au niveau de la diaphyse du radius gauche ; Doute de l'IA sur des fractures de l'avant-bras ; Doute de l'IA sur une fracture diaphysaire du tibia ; Faux positif au niveau de la diaphyse de l'ulna gauche ; Faux négatif de l'IA sur une fracture métaphysaire (flèche) tibiale distale gauche.

SERMENT

➤ *En présence des Maîtres de cette école, de mes chers condisciples et devant l'effigie d'Hippocrate, je promets et je jure, au nom de l'Être suprême, d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la médecine.*

➤ *Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail.*

➤ *Admis dans l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe, ma langue taira les secrets qui me seront confiés, et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs, ni à favoriser le crime.*

➤ *Respectueux et reconnaissant envers mes Maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leurs pères.*

➤ *Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses. Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque.*

RÉSUMÉ

Contexte :

La maltraitance infantile est un problème majeur de santé publique en France dont il est primordial d'en faciliter la détection. Des travaux réalisés sur la détection assistée par intelligence artificielle (IA) des fractures périphériques chez les adultes et les enfants de plus de deux ans, ont présenté des résultats très encourageants. Il pourrait être utile de disposer d'un outil d'aide d'IA, pour accompagner le radiologue dans le dépistage des fractures non accidentelles chez les nourrissons.

Matériels et méthode :

Dans cette étude rétrospective, ont été inclus des enfants âgés de moins de 2 ans, admis dans le service de radiopédiatrie du CHU de Montpellier, d'octobre 2020 à octobre 2022, pour la réalisation de bilans radiographiques complets standardisés (recommandation SFIPP) à la recherche de lésions osseuses d'origine non accidentelle.

Un logiciel d'IA a traité toutes les radiographies à posteriori afin d'analyser sa capacité de détection des lésions de maltraitance. Le gold standard est le diagnostic final d'une double lecture de l'examen par deux radiopédiatres dont un bénéficiant d'une expertise en maltraitance.

La sensibilité (Se) et la spécificité (Sp) de l'IA dans la détection de fractures de maltraitance ont été analysées, notamment en fonction du type de lésions observées.

Résultats :

Un total de 125 patients (âge moyen 7,9 +/- 6,6 mois) a été inclus pour l'analyse. Parmi eux 44 enfants (35 %) avaient au moins une fracture dans l'ensemble du bilan radiographique de dépistage. Les 82 fractures avérées décelées ont été réparties en 31 lésions diaphysaires et 51 lésions métaphysaires.

Le logiciel d'IA a présenté des performances diagnostiques peu performantes dans la détection des fractures (Se à 29 % ; Sp à 99%), avec une certaine variabilité en fonction du type de lésions osseuses observés : il affiche une sensibilité de 46 % pour le dépistage des fractures diaphysaires, et 18% pour fractures métaphysaires.

Conclusion :

L'IA a montré des performances diagnostiques insuffisantes dans la détection des lésions diaphysaires chez les enfants de moins de deux ans. Concernant les fractures métaphysaires dites classiques, très spécifiques de maltraitance chez les nourrissons, la performance est quasi nulle. Ceci s'explique par le fait que l'outil d'IA n'a pas été entraîné dans cette intention. Les mauvaises performances concernant les lésions diaphysaires, non spécifiques de maltraitance, montrent qu'on ne peut pas extrapoler systématiquement et facilement les bonnes performances d'un logiciel d'IA obtenues chez des adultes et enfants plus âgés, à une population de nourrisson.

Il serait nécessaire d'entraîner ce logiciel d'IA sur un jeu de données contenant spécifiquement ce type de lésions et de population pour en améliorer les performances diagnostiques.

Mots-clés : intelligence artificielle ; os ; maltraitance ; fractures métaphysaires ; dépistage ; radiographie : nourrisson

Résultats clés :

Il n'est pas possible d'extrapoler ce jour les performances diagnostiques de fractures d'un logiciel d'IA, chez des nourrissons de moins de deux ans, et cela quel que soit le type de fracture.

Abréviations et acronymes : IA : Intelligence Artificielle ; Se : Sensibilité ; Sp : Spécificité SFIPP : Société Francophone d'Imagerie Pédiatrique et Périnatale