



HAL
open science

L'utilisation de la navigation 3D peropératoire dans les arthrodèses C1-C2 type Harms

Pauline Cantogrel

► **To cite this version:**

Pauline Cantogrel. L'utilisation de la navigation 3D peropératoire dans les arthrodèses C1-C2 type Harms. Médecine humaine et pathologie. 2018. dumas-01900951

HAL Id: dumas-01900951

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01900951v1>

Submitted on 22 Oct 2018

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.

UNIVERSITE DE ROUEN

FACULTE MIXTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE DE ROUEN

Année 2018

**THESE POUR LE
DOCTORAT EN MEDECINE**

(Diplôme d'Etat)

Par

Pauline CANTOGREL

Née le 01/12/1988, à Croix (59)

PRESENTEE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 21 SEPTEMBRE 2018

**L'utilisation de la navigation 3D peropératoire dans les
arthrodèses C1-C2 type Harms**

Président du Jury

Monsieur le Professeur Franck DUJARDIN

Directeur de thèse

Monsieur le Docteur Rémi GAUTHE

Membres du Jury

Monsieur le Professeur Joël LECHEVALLIER

Monsieur le Professeur Jean-Paul STEIB

Monsieur le Docteur Mourad OULD-SLIMANE

Monsieur le Docteur Emmanuel FOULONGNE

ANNEE UNIVERSITAIRE 2017 - 2018
U.F.R. DE MEDECINE ET DE PHARMACIE DE ROUEN

DOYEN : **Professeur Pierre FREGER**

ASSESEURS : **Professeur Michel GUERBET**

Professeur Benoit VEBER

Professeur Pascal JOLY

Professeur Stéphane MARRET

I - MEDECINE

PROFESSEURS DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS

Mr Frédéric ANSELME	HCN	Cardiologie
Mme Gisèle APTER	Havre	Pédopsychiatrie
Mme Isabelle AUQUIT AUCKBUR	HCN	Chirurgie plastique
Mr Fabrice BAUER	HCN	Cardiologie
Mme Soumeya BEKRI	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mr Ygal BENHAMOU	HCN	Médecine interne
Mr Jacques BENICHO	HCN	Bio statistiques et informatique médicale
Mr Olivier BOYER	UFR	Immunologie
Mme Sophie CANDON	HCN	Immunologie
Mr François CARON	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
Mr Philippe CHASSAGNE (<i>détachement</i>)	HCN	Médecine interne (gériatrie) – Détachement
Mr Vincent COMPERE	HCN	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale
Mr Jean-Nicolas CORNU	HCN	Urologie
Mr Antoine CUVELIER	HB	Pneumologie

Mr Pierre CZERNICHOW (<i>surenchère</i>)	HCH	Epidémiologie, économie de la santé
Mr Jean-Nicolas DACHER	HCN	Radiologie et imagerie médicale
Mr Stéfan DARMONI	HCN	Informatique médicale et techniques de communication
Mr Pierre DECHELOTTE	HCN	Nutrition
Mr Stéphane DERREY	HCN	Neurochirurgie
Mr Frédéric DI FIORE	CB	Cancérologie
Mr Fabien DOGUET	HCN	Chirurgie Cardio Vasculaire
Mr Jean DOUCET	SJ	Thérapeutique - Médecine interne et gériatrie
Mr Bernard DUBRAY	CB	Radiothérapie
Mr Philippe DUCROTTE	HCN	Hépatogastro-entérologie
Mr Frank DUJARDIN	HCN	Chirurgie orthopédique - Traumatologique
Mr Fabrice DUPARC	HCN	Anatomie - Chirurgie orthopédique et traumatologique
Mr Eric DURAND	HCN	Cardiologie
Mr Bertrand DUREUIL	HCN	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale
Mme Hélène ELTCHANINOFF	HCN	Cardiologie
Mr Manuel ETIENNE	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
Mr Thierry FREBOURG	UFR	Génétique
Mr Pierre FREGER	HCN	Anatomie - Neurochirurgie
Mr Jean François GEHANNO	HCN	Médecine et santé au travail
Mr Emmanuel GERARDIN	HCN	Imagerie médicale
Mme Priscille GERARDIN	HCN	Pédopsychiatrie
M. Guillaume GOURCEROL	HCN	Physiologie
Mr Dominique GUERROT	HCN	Néphrologie
Mr Olivier GUILLIN	HCN	Psychiatrie Adultes
Mr Didier HANNEQUIN	HCN	Neurologie
Mr Fabrice JARDIN	CB	Hématologie
Mr Luc-Marie JOLY	HCN	Médecine d'urgence
Mr Pascal JOLY	HCN	Dermato – Vénérologie
Mme Bouchra LAMIA	Havre	Pneumologie
Mme Annie LAQUERRIERE	HCN	Anatomie et cytologie pathologiques
Mr Vincent LAUDENBACH	HCN	Anesthésie et réanimation chirurgicale
Mr Joël LECHEVALLIER	HCN	Chirurgie infantile

Mr Hervé LEFEBVRE	HB	Endocrinologie et maladies métaboliques
Mr Thierry LEQUERRE	HB	Rhumatologie
Mme Anne-Marie LEROI	HCN	Physiologie
Mr Hervé LEVESQUE	HB	Médecine interne
Mme Agnès LIARD-ZMUDA	HCN	Chirurgie Infantile
Mr Pierre Yves LITZLER	HCN	Chirurgie cardiaque
Mr Bertrand MACE	HCN	Histologie, embryologie, cytogénétique
M. David MALTETE	HCN	Neurologie
Mr Christophe MARGUET	HCN	Pédiatrie
Mme Isabelle MARIE	HB	Médecine interne
Mr Jean-Paul MARIE	HCN	Oto-rhino-laryngologie
Mr Loïc MARPEAU	HCN	Gynécologie - Obstétrique
Mr Stéphane MARRET	HCN	Pédiatrie
Mme Véronique MERLE	HCN	Epidémiologie
Mr Pierre MICHEL	HCN	Hépatogastro-entérologie
M. Benoit MISSET	HCN	Réanimation Médicale
Mr Jean-François MUIR (<i>surnombre</i>)	HB	Pneumologie
Mr Marc MURAINÉ	HCN	Ophtalmologie
Mr Philippe MUSETTE	HCN	Dermatologie - Vénérologie
Mr Christophe PEILLON	HCN	Chirurgie générale
Mr Christian PFISTER	HCN	Urologie
Mr Jean-Christophe PLANTIER	HCN	Bactériologie - Virologie
Mr Didier PLISSONNIER	HCN	Chirurgie vasculaire
Mr Gaëtan PREVOST	HCN	Endocrinologie
Mr Jean-Christophe RICHARD (<i>détachement</i>)	HCN	Réanimation médicale - Médecine d'urgence
Mr Vincent RICHARD	UFR	Pharmacologie
Mme Nathalie RIVES	HCN	Biologie du développement et de la reproduction
Mr Horace ROMAN	HCN	Gynécologie - Obstétrique
Mr Jean-Christophe SABOURIN	HCN	Anatomie - Pathologie
Mr Guillaume SAVOYE	HCN	Hépatogastrologie
Mme Céline SAVOYE-COLLET	HCN	Imagerie médicale
Mme Pascale SCHNEIDER	HCN	Pédiatrie

Mr Michel SCOTTE	HCN	Chirurgie digestive
Mme Fabienne TAMION	HCN	Thérapeutique
Mr Luc THIBERVILLE	HCN	Pneumologie
Mr Christian THUILLEZ (<i>surnombre</i>)	HB	Pharmacologie
Mr Hervé TILLY	CB	Hématologie et transfusion
M. Gilles TOURNEL	HCN	Médecine Légale
Mr Olivier TROST	HCN	Chirurgie Maxillo-Faciale
Mr Jean-Jacques TUECH	HCN	Chirurgie digestive
Mr Jean-Pierre VANNIER (<i>surnombre</i>)	HCN	Pédiatrie génétique
Mr Benoît VEBER	HCN	Anesthésiologie - Réanimation chirurgicale
Mr Pierre VERA	CB	Biophysique et traitement de l'image
Mr Eric VERIN	HB	Service Santé Réadaptation
Mr Eric VERSPYCK	HCN	Gynécologie obstétrique
Mr Olivier VITTECOQ	HB	Rhumatologie
Mme Marie-Laure WELTER	HCN	Physiologie

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS

Mme Noëlle BARBIER-FREBOURG	HCN	Bactériologie – Virologie
Mme Carole BRASSE LAGNEL	HCN	Biochimie
Mme Valérie BRIDOUX HUYBRECHTS	HCN	Chirurgie Vasculaire
Mr Gérard BUCHONNET	HCN	Hématologie
Mme Mireille CASTANET	HCN	Pédiatrie
Mme Nathalie CHASTAN	HCN	Neurophysiologie
Mme Sophie CLAEYSSENS	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mr Moïse COEFFIER	HCN	Nutrition
Mr Serge JACQUOT	UFR	Immunologie
Mr Joël LADNER	HCN	Epidémiologie, économie de la santé
Mr Jean-Baptiste LATOUCHE	UFR	Biologie cellulaire
Mr Thomas MOUREZ	HCN	Virologie
Mr Gaël NICOLAS	HCN	Génétique

Mme Muriel QUILLARD	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mme Laëtitia ROLLIN	HCN	Médecine du Travail
Mr Mathieu SALAUN	HCN	Pneumologie
Mme Pascale SAUGIER-VEBER	HCN	Génétique
Mme Anne-Claire TOBENAS-DUJARDIN	HCN	Anatomie
Mr David WALLON	HCN	Neurologie

PROFESSEUR AGREGÉ OU CERTIFIÉ

Mr Thierry WABLE	UFR	Communication
Mme Mélanie AUVRAY-HAMEL	UFR	Anglais

II - PHARMACIE

PROFESSEURS

Mr Thierry BESSON	Chimie Thérapeutique
Mr Roland CAPRON (PU-PH)	Biophysique
Mr Jean COSTENTIN (Professeur émérite)	Pharmacologie
Mme Isabelle DUBUS	Biochimie
Mr Loïc FAVENNEC (PU-PH)	Parasitologie
Mr Jean Pierre GOULLE (Professeur émérite)	Toxicologie
Mr Michel GUERBET	Toxicologie
Mme Isabelle LEROUX - NICOLLET	Physiologie
Mme Christelle MONTEIL	Toxicologie
Mme Martine PESTEL-CARON (PU-PH)	Microbiologie
Mr Rémi VARIN (PU-PH)	Pharmacie clinique
Mr Jean-Marie VAUGEOIS	Pharmacologie
Mr Philippe VERITE	Chimie analytique

MAITRES DE CONFERENCES

Mme Cécile BARBOT	Chimie Générale et Minérale
Mr Jérémy BELLIEN (MCU-PH)	Pharmacologie
Mr Frédéric BOUNOURE	Pharmacie Galénique
Mr Abdeslam CHAGRAOUI	Physiologie
Mme Camille CHARBONNIER (LE CLEZIO)	Statistiques
Mme Elizabeth CHOSSON	Botanique
Mme Marie Catherine CONCE-CHEMTOB santé	Législation pharmaceutique et économie de la
Mme Cécile CORBIERE	Biochimie
Mr Eric DITTMAR	Biophysique

Mme Nathalie DOURMAP	Pharmacologie
Mme Isabelle DUBUC	Pharmacologie
Mme Dominique DUTERTE- BOUCHER	Pharmacologie
Mr Abdelhakim ELOMRI	Pharmacognosie
Mr François ESTOUR	Chimie Organique
Mr Gilles GARGALA (MCU-PH)	Parasitologie
Mme Nejla EL GHARBI-HAMZA	Chimie analytique
Mme Marie-Laure GROULT	Botanique
Mr Hervé HUE	Biophysique et mathématiques
Mme Laetitia LE GOFF	Parasitologie – Immunologie
Mme Hong LU	Biologie
M. Jérémie MARTINET (MCU-PH)	Immunologie
Mme Marine MALLETER	Toxicologie
Mme Sabine MENAGER	Chimie organique
Mme Tiphaine ROGEZ-FLORENT	Chimie analytique
Mr Mohamed SKIBA	Pharmacie galénique
Mme Malika SKIBA	Pharmacie galénique
Mme Christine THARASSE	Chimie thérapeutique
Mr Frédéric ZIEGLER	Biochimie

PROFESSEURS ASSOCIES

Mme Cécile GUERARD-DETUNCQ	Pharmacie officinale
Mr Jean-François HOUIVET	Pharmacie officinale

PROFESSEUR CERTIFIE

Mme Mathilde GUERIN	Anglais
----------------------------	---------

ATTACHES TEMPORAIRES D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE

Mme Anne-Sophie CHAMPY	Pharmacognosie
M. Jonathan HEDOUIN	Chimie Organique
Mme Barbara LAMY-PELLETER	Pharmacie Galénique

LISTE DES RESPONSABLES DES DISCIPLINES PHARMACEUTIQUES

Mme Cécile BARBOT	Chimie Générale et minérale
Mr Thierry BESSON	Chimie thérapeutique
Mr Roland CAPRON	Biophysique
Mme Marie-Catherine CONCE-CHEMTOB	Législation et économie de la santé
Mme Elisabeth CHOSSON	Botanique
Mme Isabelle DUBUS	Biochimie
Mr Abdelhakim ELOMRI	Pharmacognosie
Mr Loïc FAVENNEC	Parasitologie
Mr Michel GUERBET	Toxicologie
Mr François ESTOUR	Chimie organique
Mme Isabelle LEROUX-NICOLLET	Physiologie
Mme Martine PESTEL-CARON	Microbiologie
Mr Mohamed SKIBA	Pharmacie galénique
Mr Rémi VARIN	Pharmacie clinique
Mr Philippe VERITE	Chimie analytique

III – MEDECINE GENERALE

PROFESSEUR

Mr Jean-Loup **HERMIL** (PU-MG) UFR Médecine générale

MAITRE DE CONFERENCE

Mr Matthieu **SCHUERS** (MCU-MG) UFR Médecine générale

PROFESSEURS ASSOCIES A MI-TEMPS – MEDECINS GENERALISTE

Mr Emmanuel **LEFEBVRE** UFR Médecine Générale

Mme Elisabeth **MAUVIARD** UFR Médecine générale

Mr Philippe **NGUYEN THANH** UFR Médecine générale

Mme Marie Thérèse **THUEUX** UFR Médecine générale

MAITRE DE CONFERENCES ASSOCIE A MI-TEMPS – MEDECINS GENERALISTES

Mr Pascal **BOULET** UFR Médecine générale

Mr Emmanuel **HAZARD** UFR Médecine Générale

Mme Marianne **LAINÉ** UFR Médecine Générale

Mme Lucile **PELLERIN** UFR Médecine générale

Mme Yveline **SEVRIN** UFR Médecine générale

ENSEIGNANTS MONO-APPARTENANTS

PROFESSEURS

Mr Serguei FETISSOV (med)	Physiologie (ADEN)
Mr Paul MULDER (phar)	Sciences du Médicament
Mme Su RUAN (med)	Génie Informatique

MAITRES DE CONFERENCES

Mr Sahil ADRIOUCH (med) 905)	Biochimie et biologie moléculaire (Unité Inserm 905)
Mme Gaëlle BOUGEARD-DENOYELLE (med)	Biochimie et biologie moléculaire (UMR 1079)
Mme Carine CLEREN (med)	Neurosciences (Néovasc)
M. Sylvain FRAINEAU (med)	Physiologie (Inserm U 1096)
Mme Pascaline GAILDRAT (med)	Génétique moléculaire humaine (UMR 1079)
Mr Nicolas GUEROUT (med)	Chirurgie Expérimentale
Mme Rachel LETELLIER (med)	Physiologie
Mme Christine RONDANINO (med)	Physiologie de la reproduction
Mr Antoine OUVRARD-PASCAUD (med)	Physiologie (Unité Inserm 1076)
Mr Frédéric PASQUET	Sciences du langage, orthophonie
Mme Isabelle TOURNIER (med)	Biochimie (UMR 1079)

CHEF DES SERVICES ADMINISTRATIFS : Mme Véronique DELAFONTAINE

HCN - Hôpital Charles Nicolle

HB - Hôpital de BOIS GUILLAUME

CB - Centre Henri Becquerel

CHS - Centre Hospitalier Spécialisé du Rouvray

CRMPR - Centre Régional de Médecine Physique et de Réadaptation

SJ - Saint Julien Rouen

Par délibération en date du 3 mars 1967, la faculté a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

Remerciements

AUX MEMBRES DU JURY

A Monsieur le Professeur Franck DUJARDIN

Vous me faites l'honneur de présider le jury de cette thèse. Je vous remercie de votre enseignement théorique et pratique au cours de ces années d'internat. Je vous suis particulièrement reconnaissante de m'accepter au sein de votre équipe pour approfondir mes connaissances. Mon investissement sera, je l'espère, digne de mon profond respect.

A Monsieur le Professeur Joël LECHEVALIER

Vous me faites l'honneur de juger ce travail. C'est pour moi source de satisfaction. Je conserve un très agréable souvenir de mon stage d'internat au sein de votre équipe pédiatrique. Votre disponibilité et votre implication auprès des patients autant que des étudiants est remarquable. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de ma gratitude et de mon respect.

A Monsieur le Professeur Jean Paul STEIB

Vous me faites l'honneur de juger ce travail. C'est pour moi un très grand honneur. Mon stage passé à Strasbourg a été une chance inouïe. Votre enseignement chirurgical, en consultation, au lit du malade comme au bloc opératoire a été un véritable enrichissement. Veuillez recevoir ici l'expression de ma gratitude et de mon respect.

A Monsieur le Docteur Mourad OULD SLIMANE

Tu me fais l'honneur de juger ce travail. C'est pour moi une grande fierté. Tes qualités chirurgicales et pédagogiques sont remarquables. Je te remercie du soutien indéfectible dont tu fais preuve. Et même si "c'est pas un boulot d'gonzesses", j'espère être à la hauteur de tes attentes au sein de l'équipe chirurgicale. Trouve dans ce travail l'expression de ma profonde gratitude et de mon plus grand respect.

A Monsieur le Docteur Emmanuel FOULONGNE

Tu me fais l'honneur de juger ce travail et je t'en remercie. Merci de m'avoir fait confiance, je t'en suis très reconnaissante. Travailler avec toi est un réel plaisir grâce à ta maîtrise chirurgicale et ta bonne humeur. Trouve ici l'expression de ma gratitude et de mon profond respect.

A Monsieur le Docteur Rémi GAUTHE

Tu me fais l'honneur de juger ce travail. Un énorme merci pour tes précieux conseils qui m'ont permis de finaliser ce travail. Ta rigueur scientifique et ta disponibilité sont exemplaires. Je te suis énormément reconnaissante de ta patience et de ton investissement. J'espère pouvoir poursuivre ma formation à ton contact. Trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

AUX MEMBRES DE MA FAMILLE

A mes parents

MERCI ! Merci pour votre soutien, votre disponibilité et votre bonne humeur. Je ne vous remercierai jamais assez. Je suis fière d'être votre fille.

A mon frère, ma sœur, Agathe et Sylvain

Merci **Charles et Julie** de m'avoir fait découvrir des centaines de choses et d'avoir toujours une référence à la Cité de la Peur pour me faire rire ! Avoir grandi à vos côtés a été un plaisir. Merci à vous 4 d'accepter les réunions de famille/Sieste en lendemain de garde.

A mes neveux et nièces : Louis, Jeanne, Arthur, Marie et Cerise

Le bonheur de vous avoir dans ma vie est immense. Vous me ressourcez à chaque fois que je vous vois. J'adore partager ces moments avec vous. Je vous aime fort.

A mes mamies et papi André

Vous n'êtes plus là et vous me manquez. J'aurais aimé votre présence aujourd'hui.

A mes oncles et tantes, cousins et cousines, et leurs enfants

Merci des moments partagés au Cuzoul, à La Serre ou ailleurs.

A Romain

Un immense merci pour ton soutien, et ton amour.

Tu as su me faire surmonter la distance et tu as toujours beaucoup plus cru en moi, que moi-même.

J'ai une chance inouïe de partager ma vie avec toi et j'ai hâte de revenir à tes côtés.

Merci d'être là.

AUX AMIS

Aux Lillois

Ines, Joe, Mimoush, Albé et Chloé, Baptiste et Justine, Chrisprols et Marie, Dum et Coco, Guillaume et Chloé, Greg et Alf, Jonath, Prudhi, Raf, Merci d'avoir toujours été là pour me faire rire, depuis notre rencontre. Vous savez, même si on ne se voit plus aussi souvent, combien vous m'êtes essentiel ! Merci pour votre co...rie inégalable.

A ceux de l'externat

A toi ma Stephinsky, sans qui je n'aurais probablement pas réussi à être chir ortho. Et sans qui je me serais bien emm... pendant ces années d'externats. Merci pour ta folie et nos fous rires.

A toi, Anus, à tes cours de judo, aux révisions dans ton appart, et à Sainte Ritta.

A vous toutes : Aude, Justine, Chloutch, Ju Déprez, Marie B, pour ces vacances, ces révisions, ces fous rires.

A ceux de l'internat

A Nyfa, Sab et anne So, pour le soutien, dans l'alcool comme dans le pisse mémé,

Au reste des Barbites, pour ces soirées, et pour votre soutien à la présidence !

A Nathalie, maman de l'internat, merci pour le soutien, l'écoute et l'aide apportée,

A justine, parce que je ne peux pas ne te mettre que dans ceux d'orthopédie. A ton coté Dr Goursat et Misses Justine et à notre trajet pour le 1^{er} G4.

Hadrichou, à notre semestre de pédiatrie, et à la mammothérapie, coeur coeur love.

A Anthony, mon premier co-interne d'amour, c'était pas gagné au début.

Et à Dédé, mon amour de Pédiatrie, et du bout du monde.

A ceux de la coloc : A Fédé et Alex, merci pour cette première année rouennaise, dans le froid.

Je vous adore.

Aux écureuils : merci de vous être occupé de Romain pendant mes aventures Strasbourgeoises et Monégasques.

Aux Strasbourgeois : Aude, Valentin et Laëla, à nos runs mais surtout à nos restos !

A Unzile : Pour ces soirées run et thèse, R.I.P. tes plantes, encore désolée.

A MES MAITRES

Strasbourgeois

Au Professeur Charles, pour cette vertèbrectomie thoracique haute monobloc, et toutes les choses apprises à Strasbourg.

A Sébastien Schuller, Merci pour la patience et l'aide apportée à la rédaction de mon premier article (suspens pour la parution...). Et merci pour l'endoscopie.

Merci Yves Ntilikina pour m'avoir "tout" lâcher. Hâte de se croiser en DIU.

Monégasques

Au Docteur Lascar, pour ce clou fémoral de l'horreur et ces astuces opératoires.

A Cédric, merci pour toutes ces astuces de traumatisme et pour Castel !

A Maxime, pour la "chirurgie de ville" et le "canal en trou de..."

A Matthieu pour ces quelques blocs ensemble et son amour de l'asepsie.

Et Normands

Au Professeur Duparc, pour sa pédagogie et sa rigueur scientifique.

Au Professeur Roussignol, pour sa disponibilité et son aide au bloc opératoire.

A Saad et Julien, pour la découverte du monde de la pédiatrie.

Au Professeur Tobenas, pour ces gardes de neurochirurgie. Et à tous les neurochirurgiens, dont le Pr Proust, que j'ai croisé avec plaisir à Strasbourg.

A Matthieu, pour les chantiers de hanche, magique !

A Antoine, merci pour les conseils, et ta technicité chirurgicale, j'admire ! (et PAS merci pour me laisser galérer sur les avant-bras et se moquer de mon manque de force...) ; Saïd et Cédric, bien joué, avoir reconnu la radio, je vous dit chapeau... . Tata, mais pourquoi t'es partie ????

Vous nous manquez ! Ceci est valable pour Virginie, Payet'tes et Camille. A Papouille, merci pour ta confiance et ton soutien, j'espère qu'on va encore souvent se croiser. Charles, merci pour ta disponibilité et tes conseils d'orga.

AUX COPAINS d'ORTHOPEDIE

Jordane et MarieCa, que l'aventure démarre.

Aux plus jeunes, juanito, micha, gytou, dodo, tesson, tinmar, ricky, richy, matthieu, Lisa, Piero, alexis et aux babys, plein d'autres verres/ bains de minuit/ G4/ et de rires.

Et VIVE l'ORTHOPOWER !!!

CEUX de NEUROCHIR

Merci Alexis pour ton côté grand frère quand j'ai débarqué 2ème semestre en neurochir. Bon départ pour Toulouse, tu vas nous manquer !

A Fx, Vianney, Laura et Alice, pour les fistages de bip rachis.

ET CEUX de PLASTIQUE

Iadou, Flore, Déborah, Dorothée et ceux que je connais moins.

AUX EQUIPES PARAMEDICALES

Aux havrais, de dig comme d'ortho. Merci pour les semestres à LH.

A l'équipe de neurochir, du 6ème comme du 7ème. Vous êtes au top, Merci pour ce semestre en Neurochirurgie inoubliable, au soutien et aux verres.

A l'équipe de Strasbourg, pour la bonne ambiance au bloc et dans le service, un grand merci.

A l'équipe de Monaco, merci pour les pic-nique de la consult' ; les dégustations rhum/ fromage corse au bloc et les repas de garde dans le service.

A l'équipe de pédiatrie : pour la gestion des mimi-moy...

A l'équipe d'ortho : service, consult ou bloc, merci de nous supporter au quotidien. Merci aux secrétaires pour pallier aux différents soucis organisationnels...

Au bloc ambu, merci pour votre efficacité.

Au bloc des urgences, merci de nous apprendre des tas de choses et de répondre au bip. Ne cessez pas de nous faire rire.

Table des matières

TABLE DES MATIERES.....	19
TABLE DES ABREVIATIONS	21
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	22
1 INTRODUCTION	24
1.1 ANATOMIE	24
1.1.1 <i>Système ostéo-ligamentaire</i>	<i>24</i>
1.1.2 <i>Système nerveux.....</i>	<i>29</i>
1.1.3 <i>Système vasculaire artériel et veineux</i>	<i>31</i>
1.2 INSTABILITE ATLANTO-AXOÏDIENNE	34
1.3 CRITERES RADIOLOGIQUES D'INSTABILITE ATLANTO-AXOÏDIENNE	37
1.4 ÉTIOLOGIES DES INSTABILITES ATLANTO-AXOÏDIENNES	41
1.4.1 <i>Instabilité d'origine traumatique.....</i>	<i>41</i>
1.4.2 <i>Instabilité d'origine tumorale.....</i>	<i>48</i>
1.4.3 <i>Instabilité d'origine inflammatoire.....</i>	<i>49</i>
1.4.4 <i>Instabilité d'origine infectieuse</i>	<i>50</i>
1.4.5 <i>Instabilité d'origine congénitale.....</i>	<i>51</i>
1.4.6 <i>Instabilité d'origine dégénérative.....</i>	<i>52</i>
1.5 TECHNIQUES DE STABILISATION DU RACHIS CERVICAL SUPERIEUR PAR VOIE POSTERIEURE	53
1.5.1 <i>Technique de Gallie</i>	<i>53</i>
1.5.2 <i>Technique de Brooks et Jenkins.....</i>	<i>54</i>
1.5.3 <i>Clampage inter-lamaire</i>	<i>54</i>
1.5.4 <i>Technique de Magerl</i>	<i>55</i>
1.5.5 <i>Technique de Goel modifiée par Harms</i>	<i>56</i>
1.5.6 <i>Alternatives aux arthrodèses C1-C2.....</i>	<i>58</i>
1.6 CHOIX THERAPEUTIQUES.....	61
1.6.1 <i>Études biomécaniques.....</i>	<i>61</i>
1.6.2 <i>Complications rapportées de ces techniques</i>	<i>61</i>
1.6.3 <i>Particularités techniques.....</i>	<i>62</i>
1.6.4 <i>Indications</i>	<i>62</i>

1.7	IMAGERIE PER OPERATOIRE	64
1.7.1	<i>Navigation à base fluorosocopique 2D.....</i>	64
1.7.2	<i>Navigation couplée au scanner préopératoire.....</i>	65
1.7.3	<i>Navigation avec scanner peropératoire.....</i>	65
1.7.4	<i>Navigation fluoroscopique 3D.....</i>	66
1.7.5	<i>Dispositif O-Arm®.....</i>	66
1.8	EXPOSITION AUX PARTICULES IONISANTES ET RADIO PROTECTION	68
1.9	OBJECTIF DE L'ETUDE	69
2	TECHNIQUE	70
2.1	INSTALLATION.....	70
2.2	PROCEDURE CHIRURGICALE	72
3	POPULATION	77
4	DISCUSSION	79
5	BIBLIOGRAPHIE	81

Table des Abréviations

C0	Condyles occipitaux de la base du crâne
C1	Atlas
C2	Axis
D	Dose absorbée
E	Dose efficace
F/E	Flexion / Extension
FL	Flexion latérale
H	Dose équivalente
IAA	Instabilité Atlanto-Axoïdienne
OBAR	Oblique en Bas et en ARrière
OBAV	Oblique en Bas et en Avant
PDS	Produit Dose Surface
PDL	Produit Dose Longueur
RA	Rotation Axiale
RCS	Rachis Cervical Supérieur
2D	Deux Dimensions
3D	Trois Dimensions

Table des illustrations

Figure 1 : Atlas et axis.....	25
Figure 2 : Rachis de C1 à C4.....	26
Figure 3 : Ligaments cranio-cervicaux externes.....	27
Figure 4 : Ligaments cranio-cervicaux externes.....	27
Figure 5 : Ligaments cranio-cervicaux internes.....	28
Figure 6 : Ligaments cranio-cervicaux internes.....	28
Figure 7 : Schéma du plexus cervical.....	30
Figure 8 : Plexus cervical représentation in situ.....	30
Figure 9 : Nerfs cutanés de la tête et du cou.....	31
Figure 10 : Schéma du trajet de l'artère vertébrale.....	32
Figure 11 : Représentation selon Breschet des plexus veineux paravertébraux.....	33
Figure 12 : Instabilité atlanto-axoïdienne antérieure.....	34
Figure 13 : Instabilité atlanto-axoïdienne verticale ou impression basilaire.....	34
Figure 14 : Instabilité atlanto-axoïdienne rotatoire.....	35
Figure 15 : Instabilité atlanto-axoïdienne latérale.....	35
Figure 16 : Instabilité atlanto-axoïdienne postérieure.....	36
Figure 17 : Diastasis atlanto-axoïdien.....	37
Figure 18 : Ligne de McGregor et de Wackenheim.....	38
Figure 19 : Index de Ranawat.....	38
Figure 20 : Radiographie de l'odontoïde.....	39
Figure 21 : Radiographies dynamiques.....	39
Figure 22 : Instabilité atlanto-axoïdienne dans le cadre d'une polyarthrite rhumatoïde.....	40
Figure 23 : Classification de Dickman.....	41
Figure 24 : Classification de Fielding et Hawkins.....	42
Figure 25 : Fracture de Jefferson instable.....	43
Figure 26 : Fracture de l'odontoïde.....	44
Figure 27 : Classification des fractures du processus odontoïde.....	45
Figure 28 : Classification d'Effendi et Laurin.....	46
Figure 29 : Fracture bi-pédiculaire de C2, Effendi II.....	46
Figure 30 : Fracture tear drop inversée.....	47

Figure 31 : Métastase C1-C2 d'un cancer primitif rénal	48
Figure 32 : Pannus péri-odontoïdien	49
Figure 33 : Syndrome de la dent couronnée	50
Figure 34 : Abscès rétropharyngé et atteinte de C2.....	50
Figure 35 : Fracture pathologique du processus odontoïde déplacé vers l'avant.....	51
Figure 36 : Os odontoïdum.....	51
Figure 37 : Instabilité atlanto-axoïdienne d'origine dégénérative.....	52
Figure 38 : Laçage selon Gallie	53
Figure 39 : Laçage selon Brooks.....	54
Figure 40 : Clamps inter lamaires	54
Figure 41 : Exposition des articulaires C1-C2 dans la technique de Magerl	55
Figure 42 : Vissage selon Magerl associé à un laçage selon Gallie.....	56
Figure 43 : Représentation des points d'entrée de C1 et C2 selon la technique de Harms.....	57
Figure 44 : Technique de vissage selon Harms	57
Figure 45 : Arthrodèse C1-C2 type Harms.....	58
Figure 46 : Arthrodèse occipito-cervicale	59
Figure 47 : Collier cervical type Philadelphia	60
Figure 48 : Halo veste	60
Figure 49 : Système de Navigation	65
Figure 50 : Système O-Arm [®]	67
Figure 51 : Installation du patient en décubitus ventral dans l'O-Arm [®]	70
Figure 52 : Appareil d'imagerie O-Arm [®] en position d'acquisition.....	71
Figure 53 : Repérage cutané de l'incision médiane.....	72
Figure 54 : Abord chirurgical médial.....	73
Figure 55 : Ancillaire Medtronic, système de navigation NavLock [®]	74
Figure 56 : Projection de la vis en per opératoire	74
Figure 57 : Imagerie pré opératoire.....	75
Figure 58 : Contrôle de la position des vis en fin d'intervention	76
Tableau 1 : Série de patients opérés d'une arthrodèse type Harms sous navigation 3D.....	77
Tableau 2 : Exposition aux radiations ionisantes.....	78

1 Introduction

Les instabilités atlanto-axoïdiennes peuvent trouver des causes traumatiques, tumorales, dégénératives ou inflammatoires (1). L'anatomie du rachis cervical supérieur (RCS) expose à des risques chirurgicaux qui imposent l'utilisation de systèmes de sécurisation.

Plusieurs techniques d'arthrodèses C1-C2 sont décrites avec des propriétés et des risques spécifiques. Celle décrite par Harms *et al.* en 2001 (2) est associée à des performances biomécaniques stabilisatrices fiables (3). A la différence des vissages trans-articulaires et des fixations par laçage ou crochets, elle reste réalisable lorsque l'alignement C1-C2 n'est plus respecté ou lorsque les arcs postérieurs de ces vertèbres sont lésés. Le positionnement des vis dans les masses latérales de C1 et dans les pédicules de C2 peut s'avérer difficile (4) et entraîner des lésions vasculaires ou nerveuses (5).

La navigation, associée à une fluoroscopie peropératoire, permet d'orienter dans les 3 plans de l'espace, les gestes chirurgicaux pour les sécuriser. Ses applications peuvent donc intéresser les vissages de C1 et C2.

1.1 Anatomie

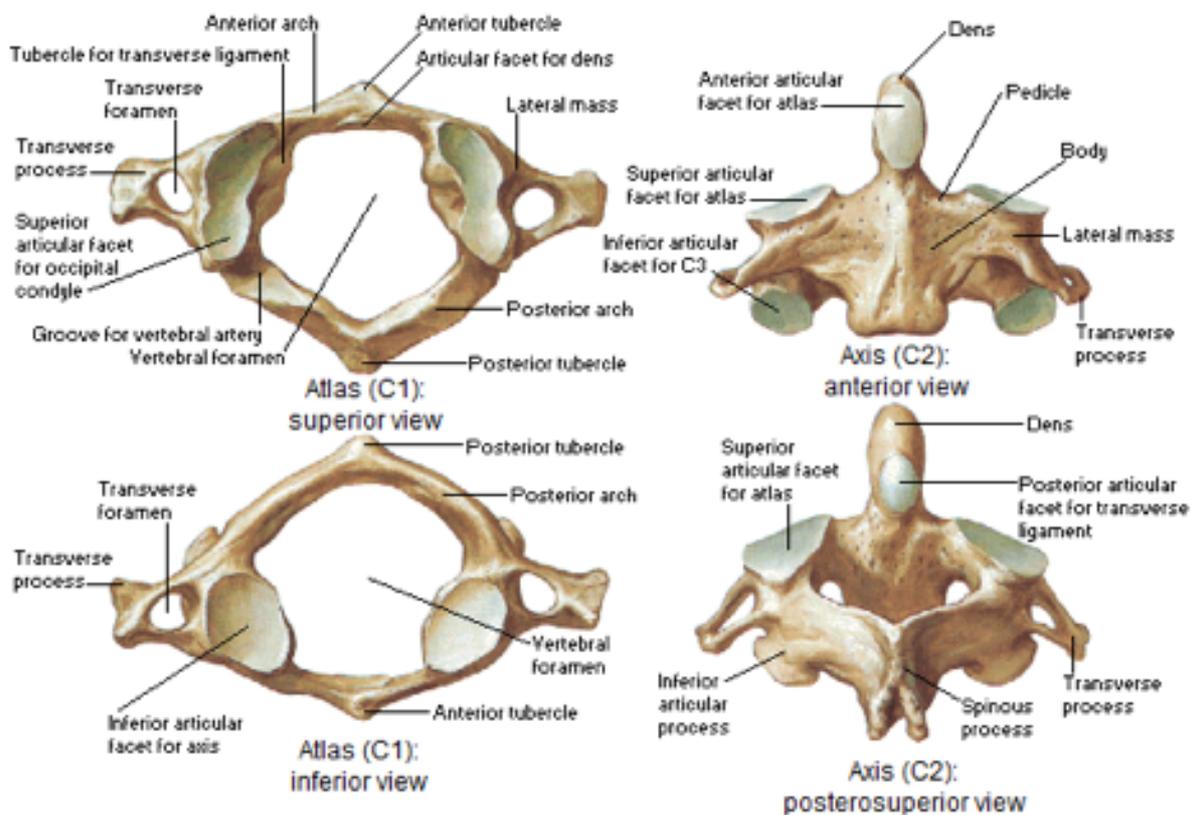
1.1.1 Système ostéo-ligamentaire

Le RCS s'étend de la charnière occipito-cervicale au disque intervertébral C2-C3. Il est constitué des condyles occipitaux (C0) et des 2 premières vertèbres cervicales que sont l'atlas (C1) et l'axis (C2). L'anatomie de C1 et C2 diffère de l'anatomie d'une vertèbre cervicale du rachis cervical inférieur (Figure 1 et Figure 2).

L'atlas n'a pas de corps vertébral, de lame, ni de processus épineux. Il est constitué de 2 masses latérales qui s'articulent avec la base du crâne par l'intermédiaire des condyles occipitaux. Entre ces masses latérales, qui les unissent, un arc osseux antérieur court et trapus, et un postérieur, plus long et grêle. Sur l'arc antérieur s'insèrent le ligament longitudinal antérieur, les ligaments occipito-atloïdien et atloïdo-axoïdien antérieurs.

Sur l'arc postérieur s'insère le ligament nucal, les ligaments occipito-atloïdien et atloïdo-axoïdien postérieurs et le ligament jaune. C1 possède un ligament dit transverse qui réunit les parties internes de ses 2 masses latérales. L'atlas s'articule avec la dent de l'axis à la partie postérieure de son arc antérieur. Il s'articule également à sa face inférieure avec l'axis, par des facettes articulaires au bord inférieur de ses masses latérales.

L'axis possède un processus odontoïde, composée d'une base, un col, un corps et un apex. Son corps porte deux facettes articulaires qui s'articulent en avant avec l'arc antérieur de C1, et en arrière avec le ligament transverse. Le ligament transverse empêche la translation en arrière du processus odontoïde.



*Figure 1 : Atlas et axis
Atlas en vue supérieure et inférieure à gauche
Axis en vue antérieure et postérieure à droite
D'après F. Netter (6)*

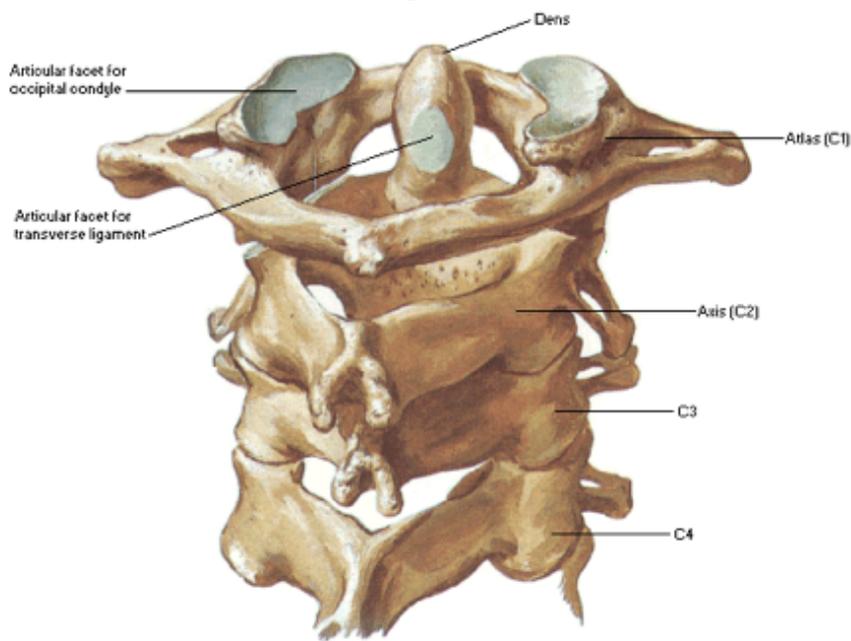


Figure 2 : Rachis de C1 à C4

Vue postéro latérale

D'après F. Netter (6)

L'articulation C1-C2 est le siège principal des mouvements de rotation. C2 est enserrée dans un complexe ligamentaire (Figure 3 et Figure 4). Le ligament apical s'étend de l'apex du processus odontoïde au basion (centre du bord antérieur du trou occipital). Latéralement, les ligaments alaires s'insèrent sur les bords latéro-supérieurs du processus odontoïde et les bords internes des condyles occipitaux (Figure 5). S'ajoute le ligament cruciforme, constitué par le ligament transverse et les faisceaux longitudinaux supérieur et inférieur (Figure 6). Plus en arrière, la *membrana tectoria*, se prolonge par le ligament longitudinal postérieur. Il est important de noter que les capsules articulaires sont également d'importants stabilisateurs.

L'articulation C0-C1 permet 25° de flexion-extension (F/E), 5° de flexion latérale (FL) et 5° de rotation axiale (RA). L'articulation C1-C2 permet 15° de F/E, 5° de FL, 40° de RA, obtenue par décoaptation de l'atlas par rapport à l'axis. Les ligaments alaires sont les freins d'une trop grande rotation (7).

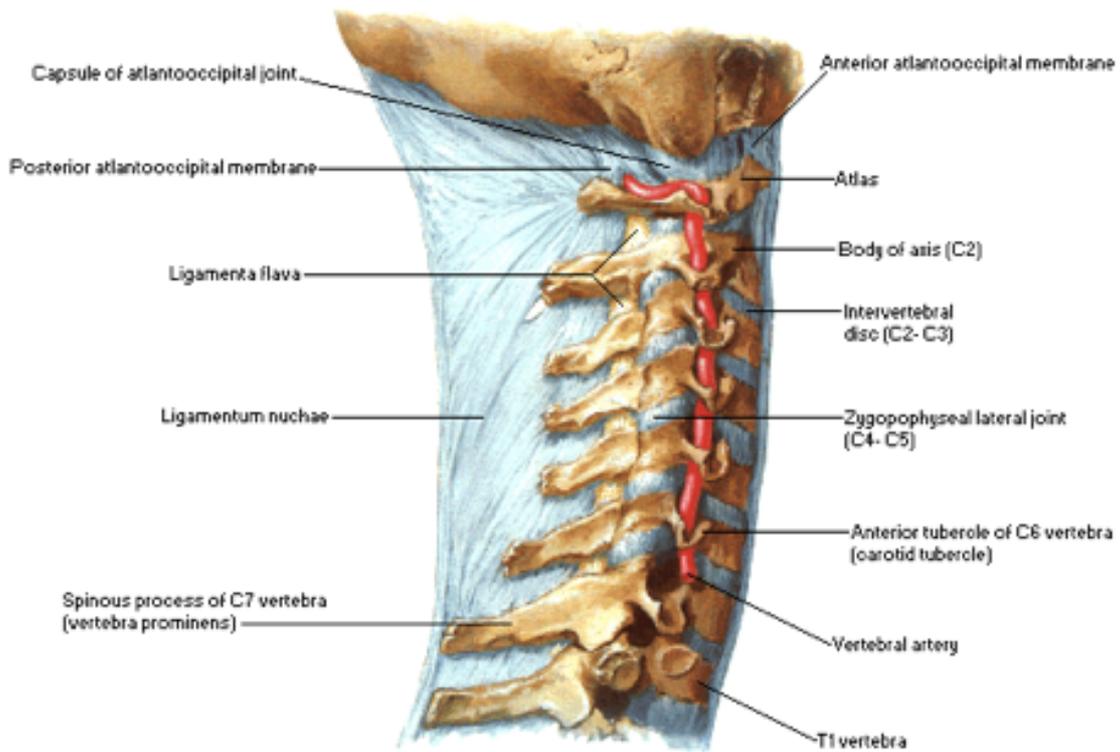


Figure 3 : Ligaments cranio-cervicaux externes

Vue latérale droite

D'après F. Netter (6)

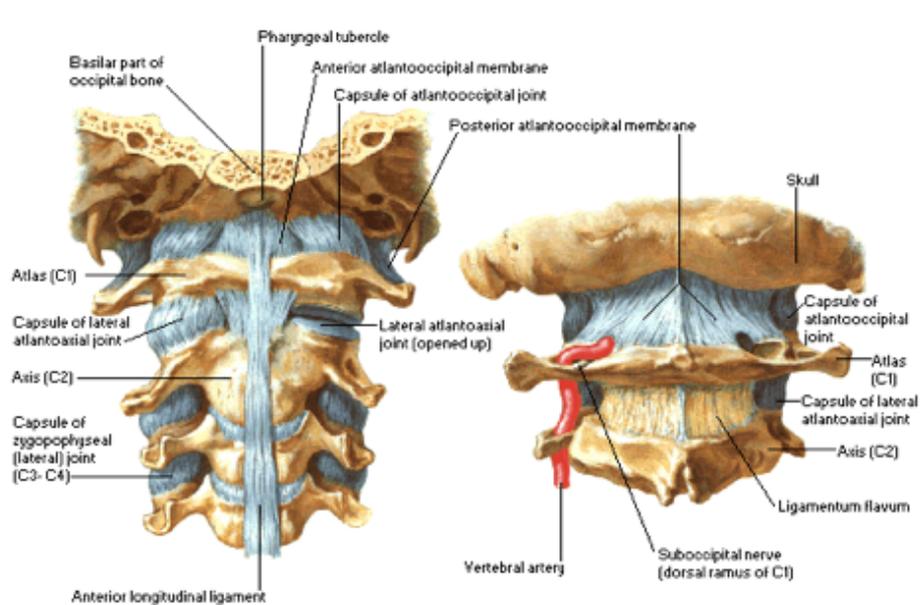


Figure 4 : Ligaments cranio-cervicaux externes

Vue antérieure à gauche

Vue postérieure à droite

D'après F. Netter (6)

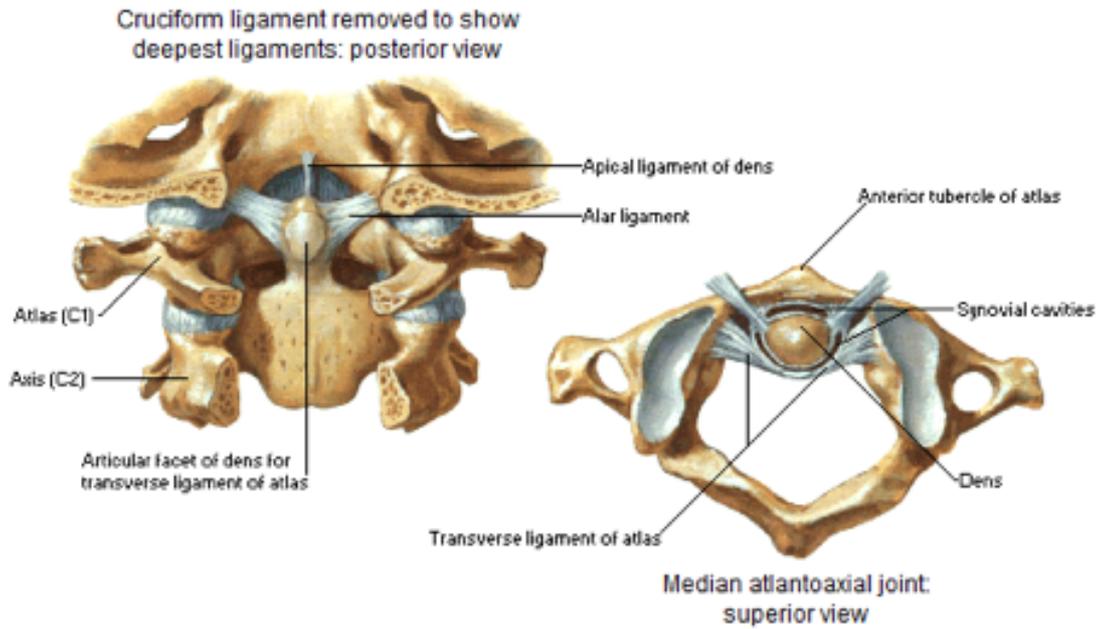


Figure 5 : Ligaments cranio-cervicaux internes

Vue endocanalaire (ligament transverse sectionné)

Vue supérieure à droite

D'après F. Netter (6)

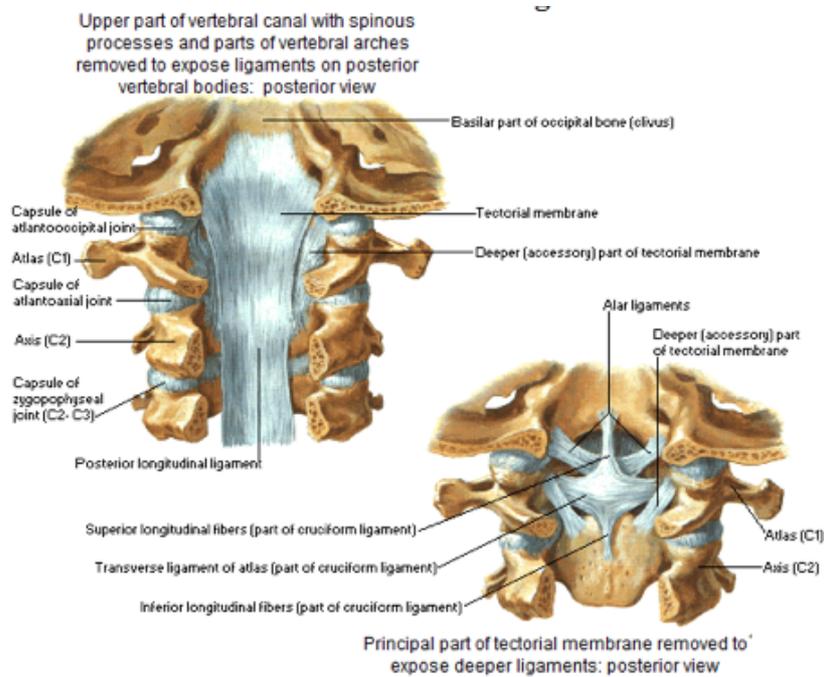


Figure 6 : Ligaments cranio-cervicaux internes

Partie postérieure des arcs vertébraux retirés à gauche

Sous le ligament longitudinal postérieur à droite

D'après F. Netter (6)

1.1.2 Système nerveux

Le tronc cérébral fait suite au cerveau dans la fosse crânienne postérieure, où il est situé en avant du cervelet. Il se prolonge par la moelle épinière après l'émergence de la première racine spinale. C'est une zone de contrôle pour les centres respiratoires et le rythme cardiaque. La moelle spinale fait suite à la moelle allongée (partie distale du tronc cérébral).

Les racines nerveuses cervicales supérieures sont sensibles et motrices. Les racines spinales sortent au-dessus de la vertèbre du même nom au niveau cervical. Chaque racine se divise en 2 rameaux, un antérieur et un postérieur.

La racine C1 sort du foramen situé entre l'occiput et l'atlas. Elle contourne la masse latérale de l'atlas et passe au-dessus du processus transverse de celui-ci en contournant en arrière l'artère vertébrale. Les rameaux postérieurs restent individualisés formant le nerf sous-occipital. Il est le nerf moteur des muscles du plan profond de la nuque : *rectus capitis posterior major*, *obliquus capitis superior* et *obliquus capitis inferior*, *rectus capitis posterior minor* et *semi spinalis capitis*.

La racine C2 sort entre les vertèbres C1 et C2, son rameau antérieur passe en avant de l'artère vertébrale. Le rameau dorsal de la racine C2, appelé nerf grand occipital ou nerf d'Arnold est volumineux et se dirige en arrière en contournant le bord inférieur du *obliquus capitis inferior*. Il monte ensuite entre ce muscle et le *semi spinalis capitis* qu'il va traverser avant de perforer le muscle *trapezius* près de son insertion occipitale. Il se termine ensuite par de nombreuses branches d'innervation du cuir chevelu et de la région occipitale. Il innerve les muscles *splénius*, le *longissimus* et le *semi spinalis capitis*.

Les rameaux antérieurs des 2 premiers nerfs cervicaux se rejoignent par une anse nerveuse, l'anse de l'atlas. Avec les rameaux antérieurs des racines nerveuses C3 et C4, ils vont former le plexus cervical superficiel qui donnera des nerfs collatéraux moteurs et des nerfs terminaux moteurs et sensitifs (Figure 7, Figure 8 et Figure 9).

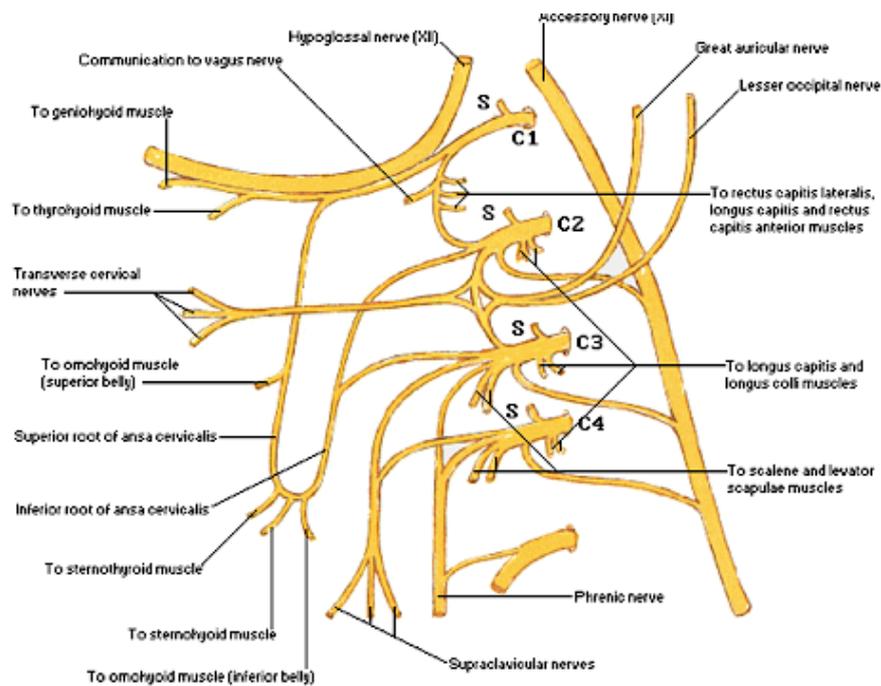


Figure 7 : Schéma du plexus cervical
D'après F. Netter (6)

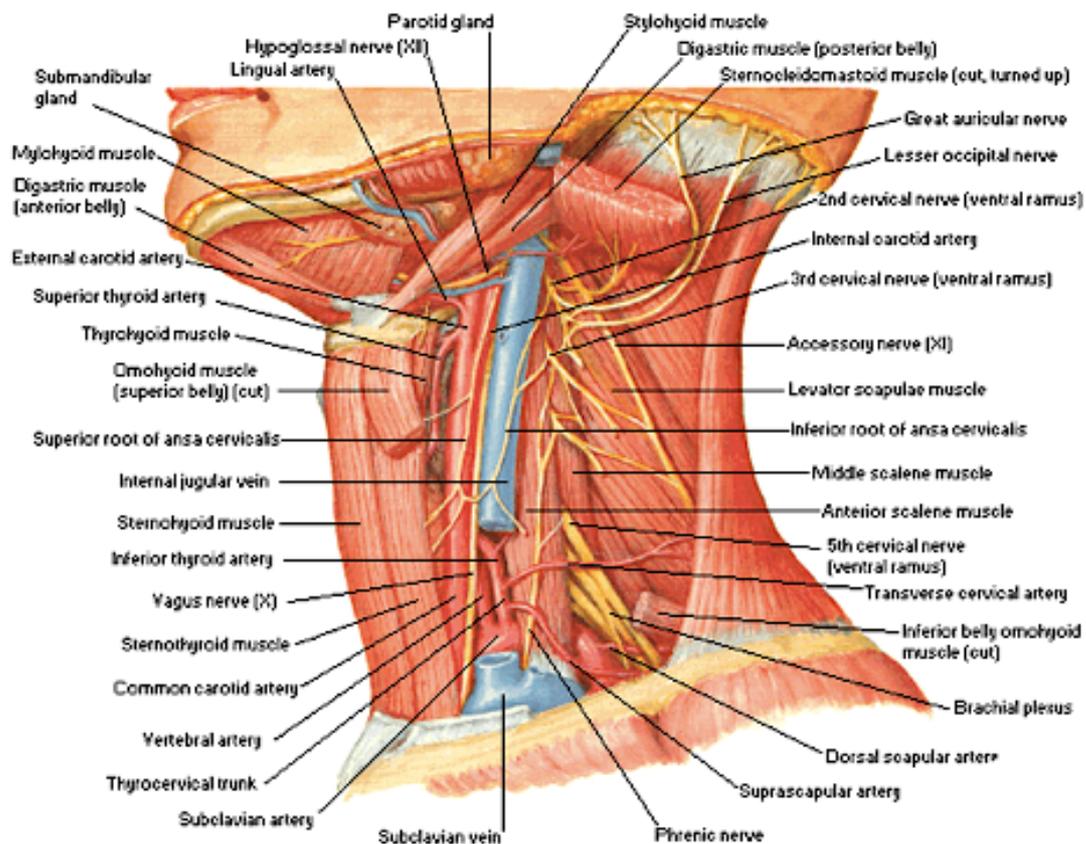


Figure 8 : Plexus cervical représentation in situ
D'après F. Netter (6)

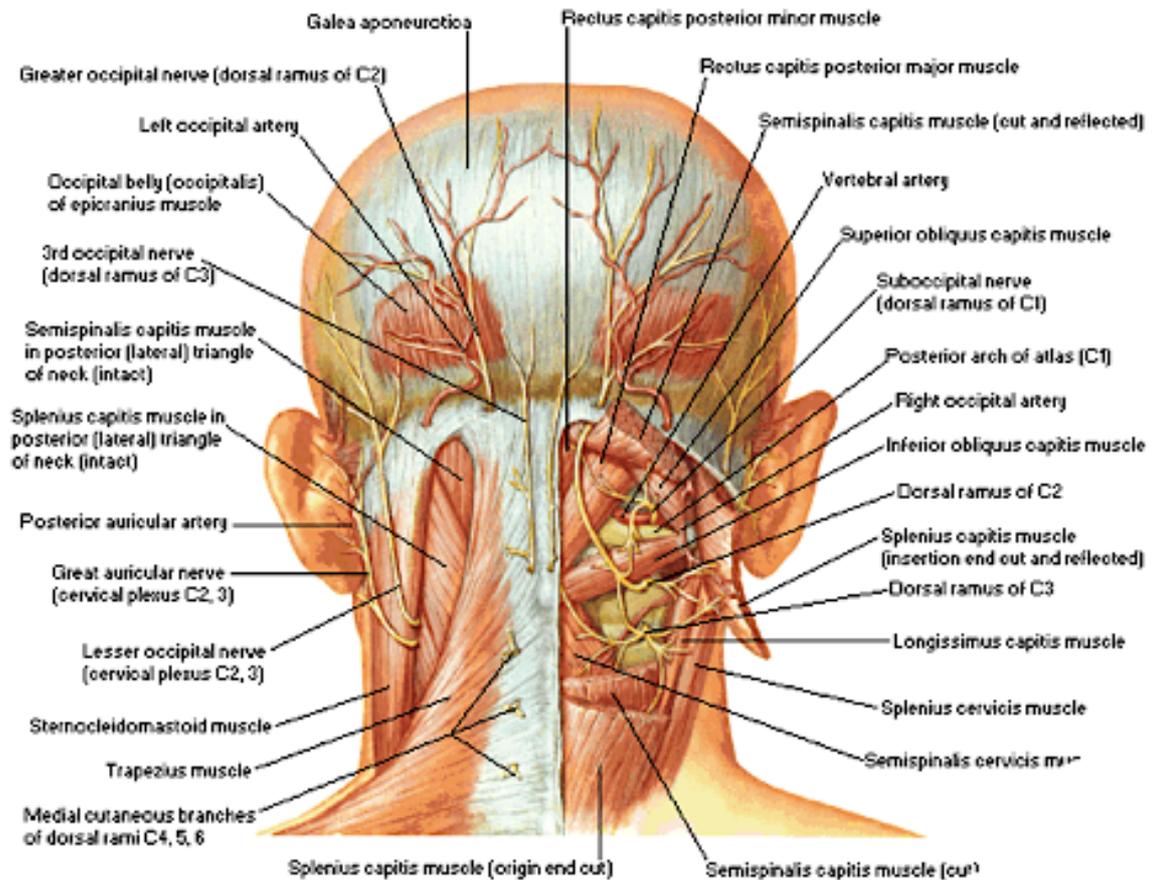


Figure 9 : Nerfs cutanés de la tête et du cou

Vue postérieure

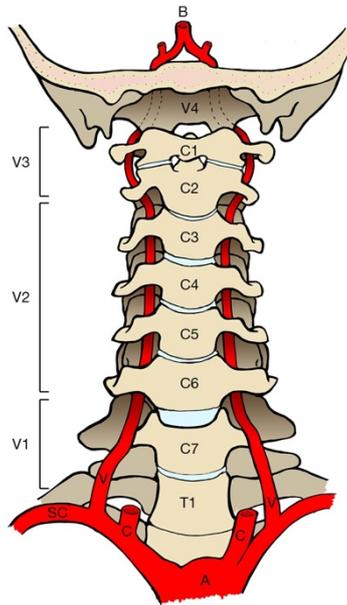
D'après F. Netter (6)

1.1.3 Système vasculaire artériel et veineux

1.1.3.1 L'artère vertébrale

Il existe 2 artères vertébrales, une à droite et une à gauche. Elles sont chacune accompagnées de 2 veines. Elles sont divisées en 4 portions de V1 à V4 (Figure 10). Le premier segment V1 est pré foraminale. Il prend son origine dans la région cervico thoracique et provient habituellement de l'artère subclavière à droite, et de l'arc aortique à gauche. Le deuxième segment V2 est foraminale. L'entrée foraminale de l'artère vertébrale est variable mais elle entre le plus souvent au niveau du foramen de C6, dans 90% des cas (8). La portion V3 s'étend de la sortie de l'artère en C2 jusqu'à son entrée dans la boîte crânienne. Dans cette partie horizontale, elle contourne le bord postérieur de la masse latérale de C1 et repose sur la portion supérieure de l'arc postérieur de C1. V4 est intra durale, elle rejoint son homologue controlatérale et vont former le tronc basilaire qui participe au polygone de Willis à la base du crâne.

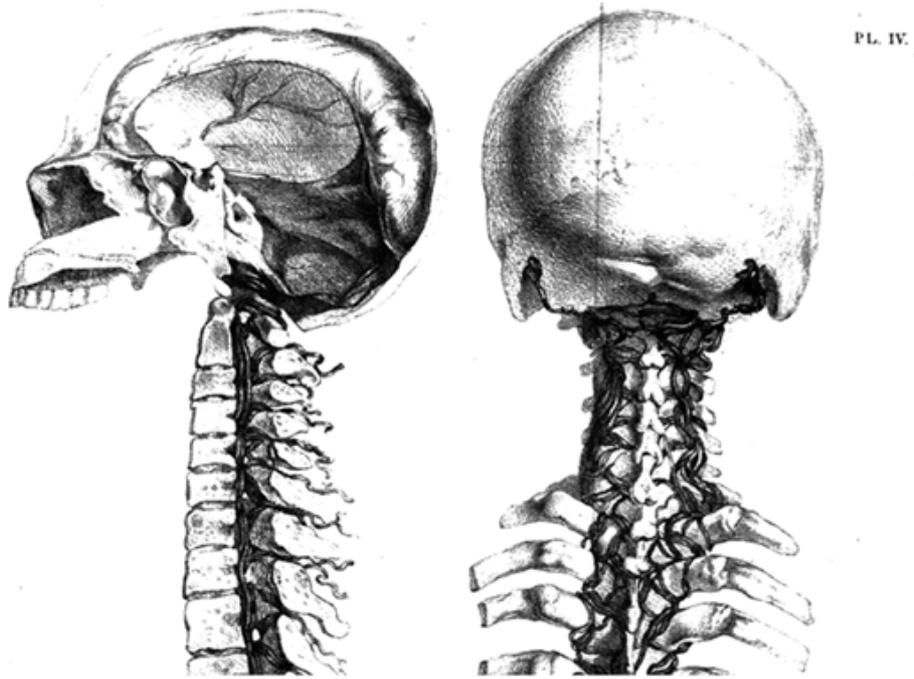
Les artères vertébrales sont le siège de nombreuses variations anatomiques (9), avec souvent une asymétrie chez un même patient et un côté dominant par rapport à l'autre (10).



*Figure 10 : Schéma du trajet de l'artère vertébrale
D'après Shafafy et al. (11).*

1.1.3.2 Le réseau veineux vertébral

Breschet a décrit le système veineux de la colonne vertébrale comme un réseau de 3 systèmes interconnectés entre eux (Figure 11) (12). Le plexus veineux de la pie mère entoure la moelle épinière, c'est le réseau intra dural. Le réseau épidual entoure ce réseau. Le troisième réseau est constitué des veines vertébrales externes qui forment un plexus entourant la colonne vertébrale, le plexus para vertébral. Ce plexus veineux para vertébral relie les veines segmentaires des régions cervicale, thoracique, abdominale et pelvienne, reçoit le sang de la musculature dorsale profonde et se connecte librement avec les 2 autres réseaux de veines. Il existe un plexus veineux para vertébral de part et d'autre des vertèbres cervicales (12). C'est un réseau veineux sans valves et de grande capacité, où le flux est bi-directionnel. Il joue un important rôle dans la régulation de la pression intra crânienne, notamment aux changements de posture (13).



*Figure 11 : Représentation selon Breschet des plexus veineux paravertébraux
Vue latérale à gauche et vue postérieure à droite
D'après Brechet (12)*

1.2 Instabilité atlanto-axoïdienne

L'instabilité atlanto-axoïdienne (IAA) est définie comme une mobilité excessive de la jonction entre l'atlas et l'axis (14). Elle témoigne d'une atteinte des structures osseuses ou ligamentaires unissant ces vertèbres. L'IAA peut être antérieure avec un glissement de l'atlas en avant de l'axis (Figure 12).

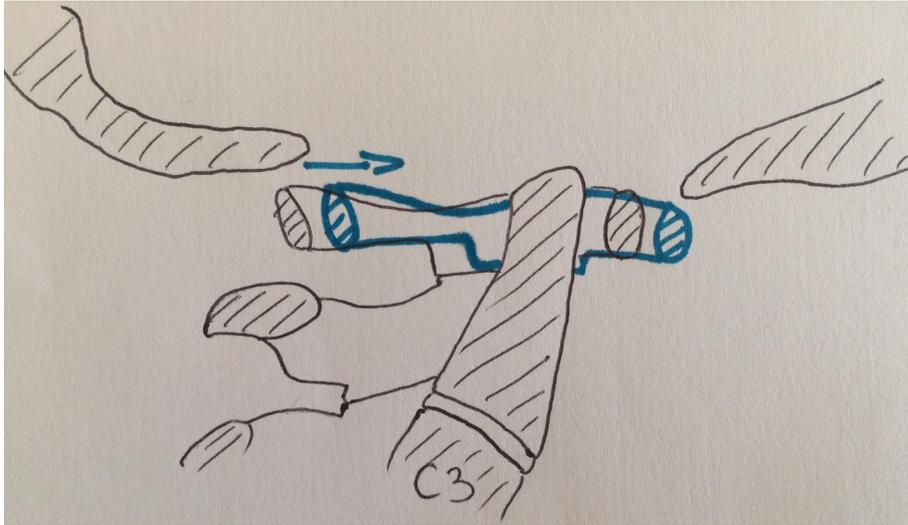


Figure 12 : Instabilité atlanto-axoïdienne antérieure

Elle peut également être verticale par impaction de l'atlas sur l'axis ou par invagination congénitale des pourtours du trou occipital dans la fosse postérieure, appelée impression basilaire (Figure 13).

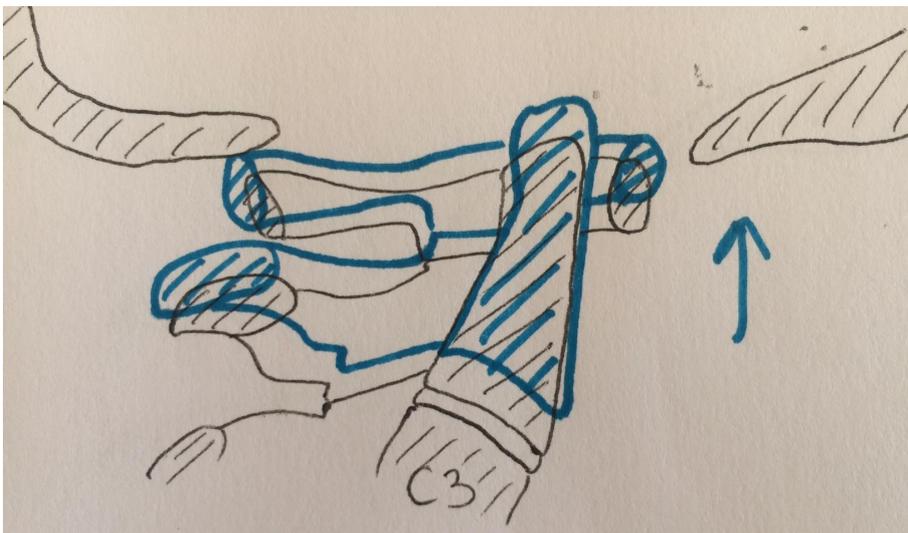


Figure 13 : Instabilité atlanto-axoïdienne verticale ou impression basilaire

L'IAA peut être rotatoire (Figure 14). L'atlas effectue une rotation trop importante. La rotation peut s'effectuer autour de la dent de l'axis ou être excentrée sur une des masses latérales.

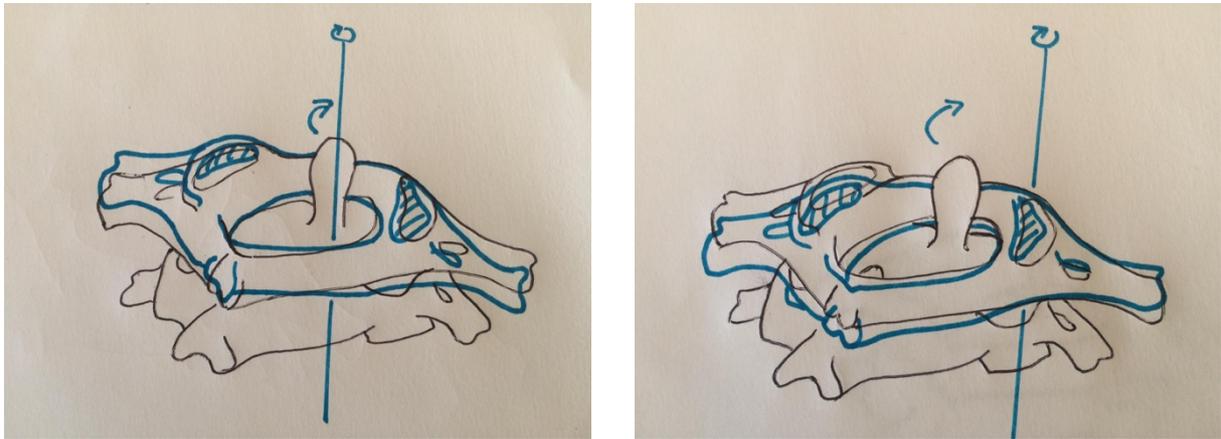


Figure 14 : Instabilité atlanto-axoïdienne rotatoire

L'IAA peut être latérale caractérisée par un glissement coronal de C1 sur C2 (Figure 15).

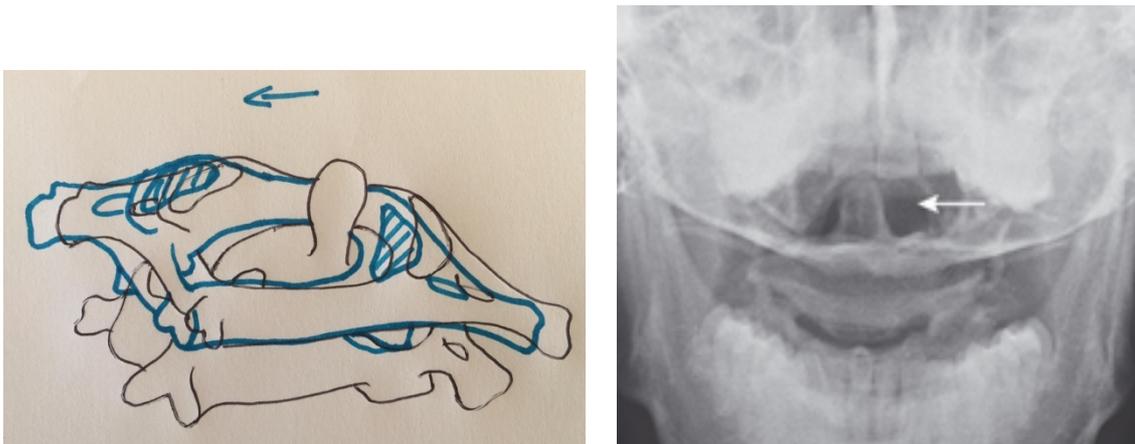


Figure 15 : Instabilité atlanto-axoïdienne latérale

Schéma à gauche

Radiographie de face bouche ouverte à droite, d'après Molière et al. (7)

Enfin L'IAA peut être postérieure (Figure 16). Dans ce cas, l'atlas vient en arrière de sa position normale sur l'axis.

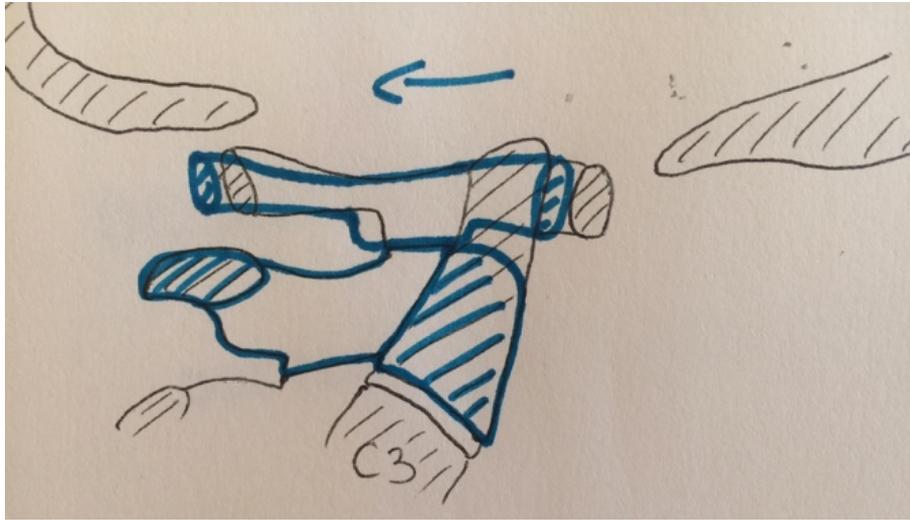


Figure 16 : Instabilité atlanto-axoïdienne postérieure

Le tableau clinique de l'IAA est très variable (15). L'IAA peut être parfaitement asymptomatique. Elle peut aussi se manifester par de simples cervicalgies ou céphalées de type névralgie d'Arnold. Elle peut parfois se manifester par un torticolis fixé, devant faire évoquer une IAA rotatoire. La compression du tronc cérébral, apanage de l'impression basilaire, associe un déficit médullaire sensitivo-moteur à une atteinte des IX^{ème} (nerfs glosso-pharyngiens), X^{ème} (nerfs vagues) et XI^{ème} (nerfs accessoires) paires crâniennes. Elle peut parfois s'accompagner de signes neurologiques à type d'ataxie ou d'apraxie. A l'extrême, une atteinte neurologique des centres régulateurs parasympathiques peut entraîner une vasoplégie sous lésionnelle, une hypovolémie, une baisse du débit cardiaque et une diminution des possibilités d'adaptation, voir un arrêt cardio-circulatoire. Sur le plan ventilatoire, une paralysie diaphragmatique peut apparaître par atteinte des nerfs phréniques.

Aucun signe clinique n'est cependant spécifique d'une instabilité atlanto-axoïdienne et le diagnostic repose sur des critères radiologiques.

1.3 Critères radiologiques d'instabilité atlanto-axoïdienne

L'analyse radiologique du rachis cervical est possible par plusieurs techniques d'imagerie.

Une analyse statique du rachis par simple clichés radiographiques de face et surtout de profil permet de rechercher un diastasis entre l'arc antérieur de C1 et la corticale antérieure du processus odontoïde, témoin d'une IAA antérieure (Figure 17), cette distance ne devant physiologiquement pas excéder 3mm chez l'adulte (12).

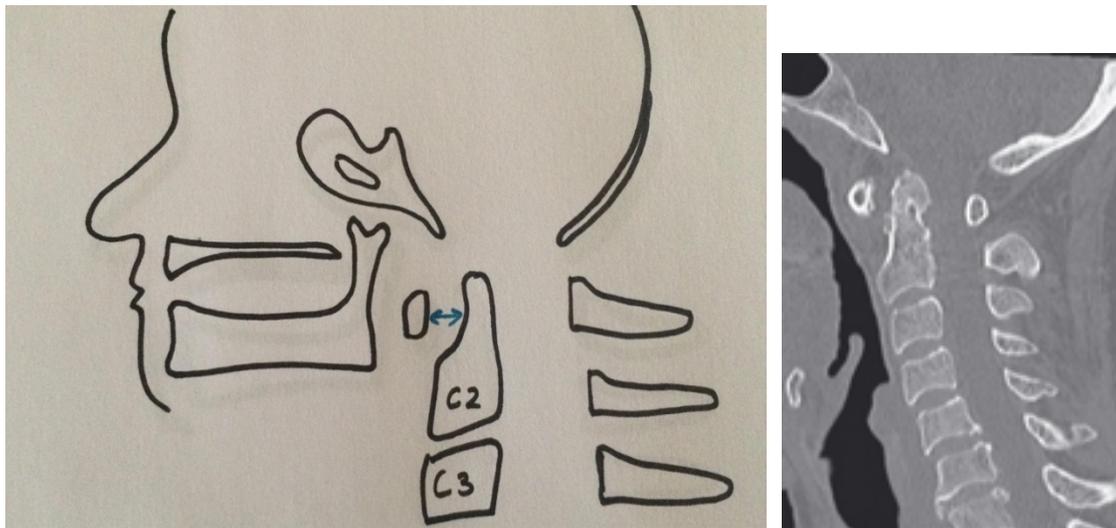


Figure 17 : Diastasis atlanto-axoïdienne

Coupe tomographique sagittale à droite, d'après Molière et al. (7)

Plusieurs repères biométriques ont été définis sur les imageries radiographiques de profil pour analyser la charnière occipito cervicale et le RCS. La ligne de McGregor unit le bord postérieur du palais osseux au point le plus déclive de l'occiput (Figure 18). Physiologiquement, l'extrémité supérieure du processus odontoïde ne doit pas être située à plus de 8 mm au-dessus de cette ligne chez la femme et de 9,5 mm chez l'homme. Physiologiquement, le processus odontoïde doit être situé dans le quadrant antéro inférieur formé par le croisement de la ligne de McGregor avec la ligne tangente au clivus (ou ligne de Wackenheim) (18). Le non-respect de ces repères radio-anatomiques est le signe d'une IAA verticale avec impression basilaire.

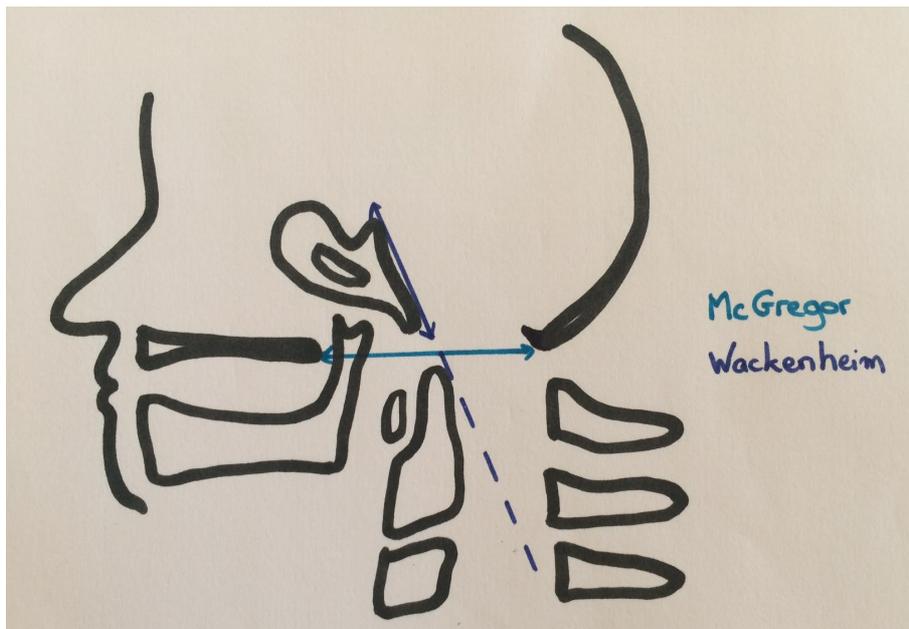


Figure 18 : Ligne de McGregor et de Wackenheim

L'index de Ranawat (Figure 19) correspond à la distance entre la ligne rejoignant les centres de l'arc antérieur et postérieur de C1 et le centre du pédicule de l'axis. Physiologiquement, cette distance est supérieure ou égale à 13 mm chez les femmes et 14 mm chez les hommes. Lorsqu'il est diminué, il est également le reflet d'une IAA verticale.

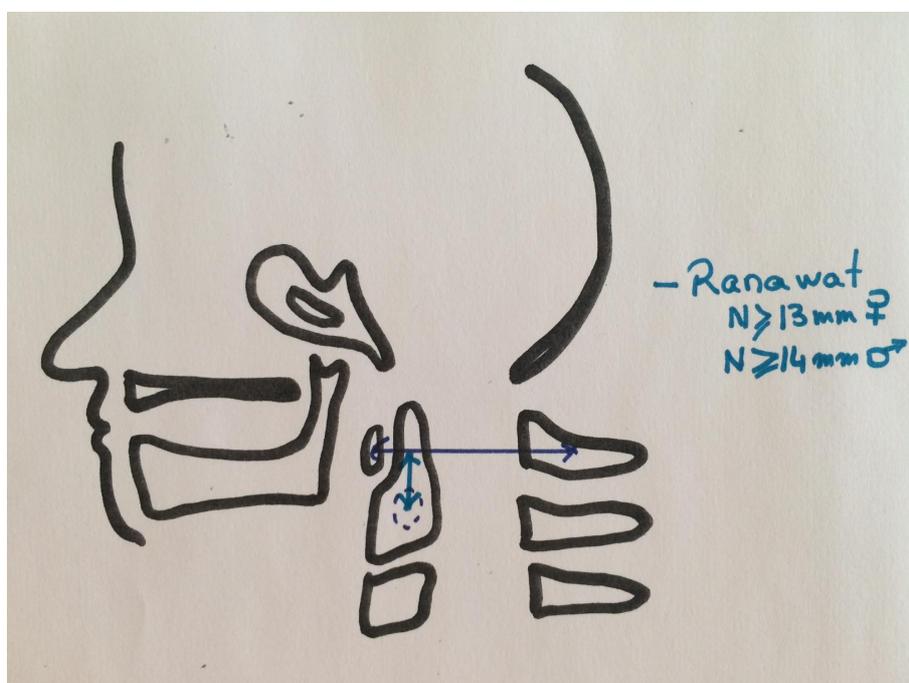


Figure 19 : Index de Ranawat

La réalisation d'un cliché radiographique de face dit bouche ouverte, permet une bonne visualisation des masses latérales de la vertèbre C1 et l'étude de face du processus odontoïde (Figure 20). Le déplacement des masses latérales de C1 de plus de 2 mm par rapport aux masses latérales de C2 traduit une IAA latérale. Un écart supérieur à 7 mm mesuré entre les masses latérales témoigne d'une lésion du ligament transverse associée à une fracture concomitante des arcs antérieurs et postérieurs de C1 appelée fracture de Jefferson (19).



*Figure 20 : Radiographie de l'odontoine
Radiographie de face bouche ouverte
Pas d'anomalies radiographiques*

La réalisation de clichés radiographiques dynamiques de profil réalisés en extension et en flexion du rachis cervical permet de démasquer d'éventuelles instabilités non visualisées sur des clichés de profil conventionnel (20) (Figure 21).



*Figure 21 : Radiographies dynamiques
Diastasis entre l'arc antérieur de C1 et la corticale antérieure
du processus odontoïde découvrant une IAA
D'après Molière et al. (7)*

La tomodensitométrie (TDM) devient aujourd'hui indispensable dans l'analyse du RCS (21). Facilement accessible en urgence, elle est l'examen de référence de l'analyse osseuse permettant le diagnostic de toutes les fractures vertébrales. Elle permet également l'analyse des rapports entre chaque élément osseux permettant un diagnostic indirect des lésions ligamentaires (Figure 22).

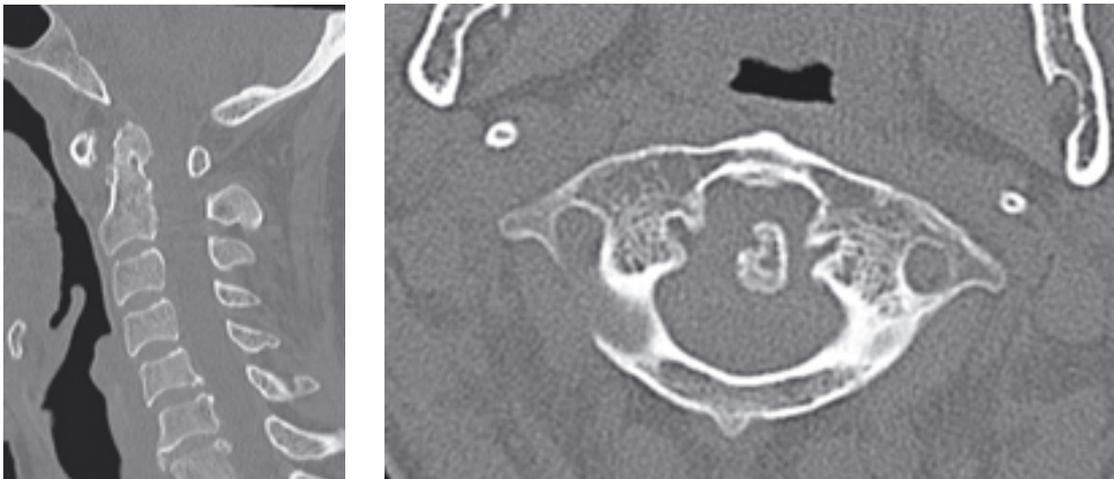


Figure 22 : Instabilité atlanto-axoïdienne dans le cadre d'une polyarthrite rhumatoïde

Coupe tomodensitométrie sagittale à gauche

Coupe tomodensitométrie axiale à droite

D'après Molière et al. (7)

L'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) permet, quant à elle, l'analyse fine des structures ligamentaires retrouvant un hyper-signal T2 et STIR témoignant d'un œdème local. Elle permet également une analyse de la moelle et des racines nerveuses permettant de diagnostiquer une éventuelle compression (22).

1.4 Étiologies des instabilités atlanto-axoïdiennes

1.4.1 Instabilité d'origine traumatique

Selon Joaquim *et al.* (23), il faut catégoriser les lésions de la colonne cervicale supérieure en deux groupes : les lésions osseuses et les lésions ligamentaires. Cette dichotomie est basée sur le principe que les blessures osseuses ont un potentiel de guérison alors que les blessures ligamentaires ne consolident pas spontanément.

1.4.1.1 Les luxations axoïdo-atloïdiennes

Les luxations odonto-atloïdiennes sont secondaires à un mouvement en hyper-flexion, entraînant une rupture du ligament transverse. Ce sont des lésions responsables d'IAA antérieures. Dickman distingue les lésions ligamentaires (type I) des lésions osseuses (type II) (Figure 23) (24). Pour les lésions ligamentaires, la rupture peut être située au milieu du ligament transverse (type Ia) ou à son insertion osseuse (type Ib). Dans le cas d'une fracture entraînant une incontinence du ligament transverse, celle-ci peut se situer sur la masse latérale de C1 (type IIa) ou au niveau du tubercule d'insertion du ligament (type IIb).

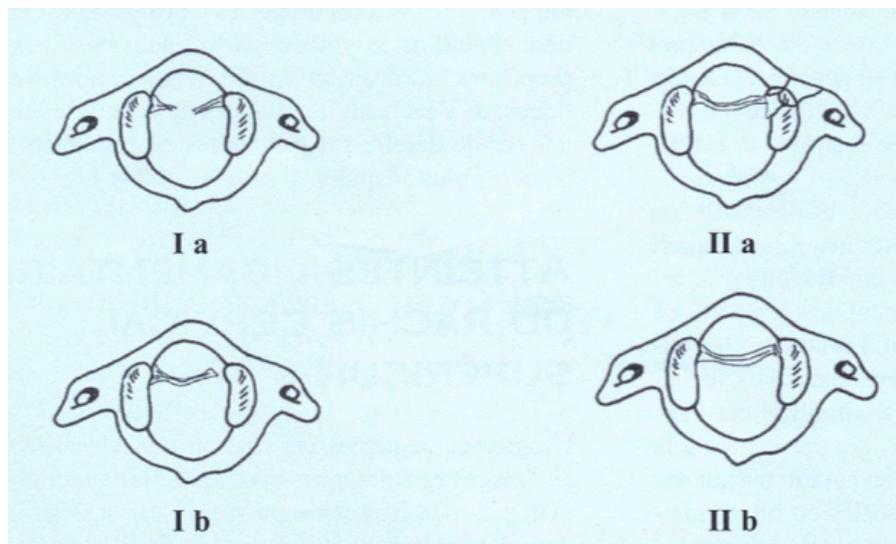


Figure 23 : Classification de Dickman

Atteintes du ligament transverse

D'après Dickman *et al.* (24)

Les luxations axoïdo-atloïdiennes sont des lésions responsables d'une IAA rotatoires. Elles résultent d'un mécanisme de rotation (25). Cette rotation peut s'effectuer autour de la dent ou être excentrée autour d'une des masses latérales. Dans le premier cas, il existe une décoaptation des masses latérales articulaires C1 et C2. Le deuxième cas peut aboutir soit à un diastasis atloïdo-odontoïdien et le ligament transverse est alors rompu, soit à une situation où la dent est fracturée et la seconde masse latérale est décoaptée.

Fielding et Hawkins ont proposé une classification de ces luxations axoïdo-atloïdiennes en 4 types différents (Figure 24). Le Type 1 correspond à une rotation centrée sur le processus odontoïde sans translation, le ligament transverse est intègre. Le type 1 n'est pas pourvoyeur d'IAA. Pour le Type 2, la rotation est centrée sur l'une des masses latérales. Il existe une translation antérieure avec une distance odonto-atloïdienne comprise entre 3 et 5 mm. Le ligament transverse est rompu. Dans le Type 3, la translation antérieure est supérieure à 5 mm avec un ligament transverse rompu. Les types 2 et 3 sont responsables d'IAA rotatoires. Le Type 4 correspond à une luxation rotatoire avec translation postérieure. Il suppose une fracture ou une agénésie du processus odontoïde, et est responsable d'une IAA postérieure.

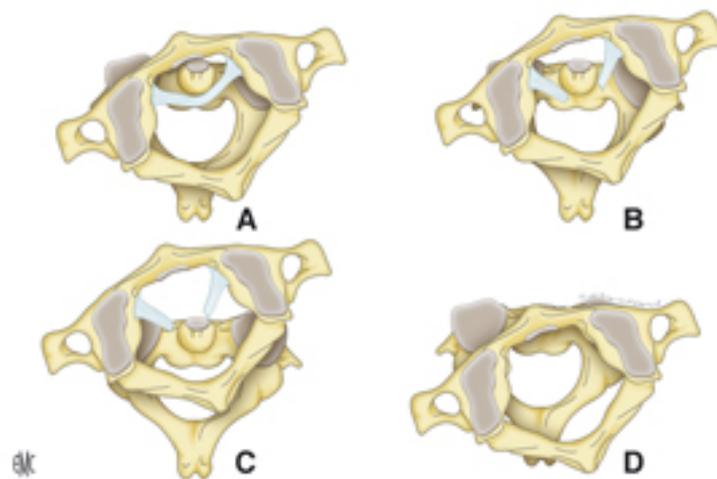


Figure 24 : Classification de Fielding et Hawkins

Luxations axoïdo-atloïdiennes

A. Type 1, B. Type 2, C. Type 3, D type 4

D'après Molière et al. (7)

1.4.1.2 Les fractures de l'atlas

Les fractures de C1 comprennent les fractures de l'arc antérieur isolé, de l'arc postérieur isolé, les fractures d'une ou des deux masses latérales et les fractures de Jefferson (26). La fracture dite de Jefferson correspond à une association d'une fracture de l'arc antérieur et de l'arc postérieur (Figure 25). Elle résulte d'un mécanisme en compression, qui sépare et éloigne les masses latérales (27). Cette lésion n'est pas pourvoyeuse d'IAA. La lésion peut atteindre le ligament transverse, ce qui entraîne une lésion instable.

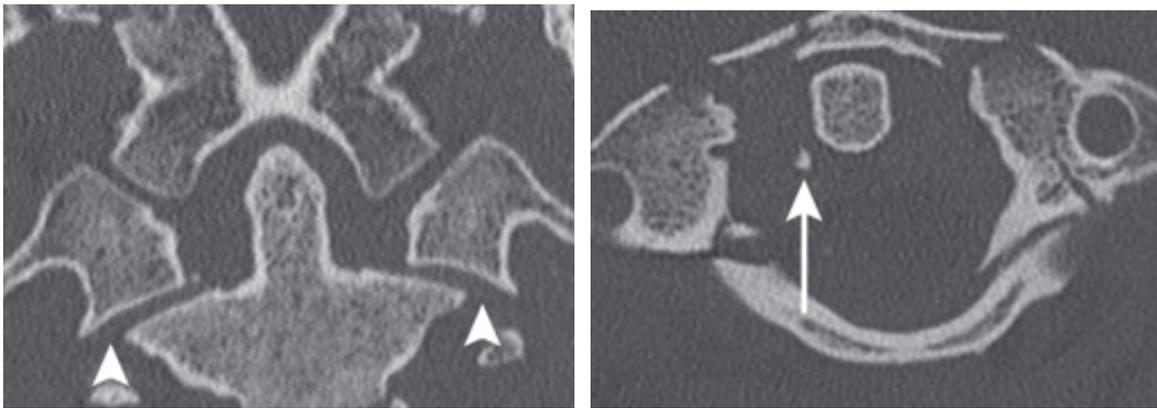


Figure 25 : Fracture de Jefferson instable

Coupe tomodensitométrique coronale à gauche,

Les flèches représentent le déplacement des masses latérales de plus de 2 mm

Coupe tomodensitométrique axiale à droite,

La flèche représente l'arrachement osseux où s'insère le ligament transverse

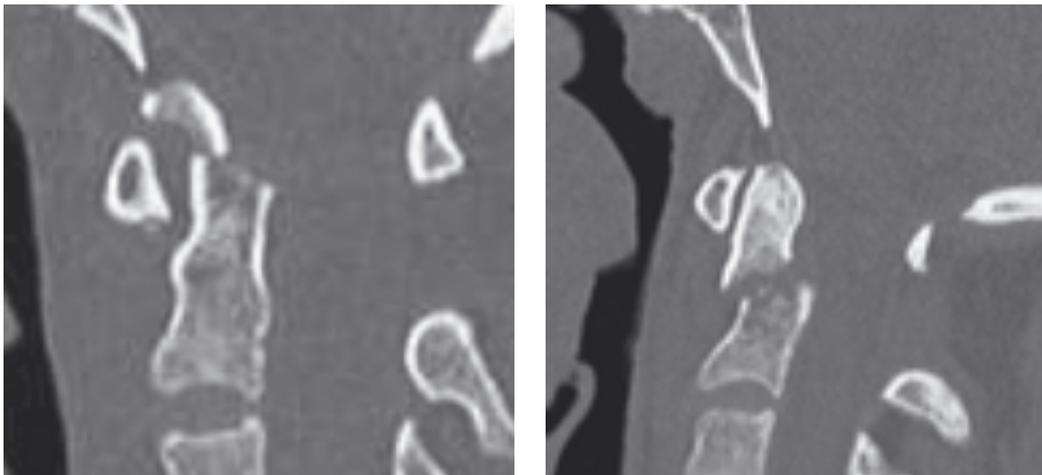
D'après Molière et al. (7)

1.4.1.3 Les fractures de l'axis

Les fractures de C2 sont marquées majoritairement par les fractures du processus odontoïde qui représentent 60% des fractures de l'axis (25).

1.4.1.3.1 Les fractures du processus odontoïde

Les fractures du processus odontoïde (Figure 26) peuvent être décrites selon la Classification d'Anderson et D'Alonzo (28). Les fractures de type I correspondent à des fractures du sommet de la dent de l'axis par avulsion des ligaments alaires. Le trait de fracture est situé au-dessus du bord inférieur de l'arc antérieur de C1. La fracture peut parfois être confondue avec un noyau d'ossification secondaire. Le type II comprend les fractures du col du processus odontoïde. Le type III comprend les fractures de la base de la dent de l'axis, pouvant parfois intéresser les masses latérales. Le risque de pseudarthrose associé aux fractures de l'odontoïde est plus important pour les type II (29).



*Figure 26 : Fracture de l'odontoïde
Coupe tomodensitométrique sagittale
Type I d'Anderson et D'Alonzo à gauche
Type II d'Anderson et D'Alonzo à droite
D'après Molière et al. (7)*

Roy Camille classifie les fractures du col du processus odontoïde selon la direction du trait de fracture (30) (Figure 27). Les fractures obliques en bas et en arrière (OBAR) présentent un risque de déplacement postérieur pouvant comprimer les structures nerveuses. Les fractures obliques en bas et en avant (OBAV) présentent, quant à elle, un risque de déplacement antérieur. Enfin, les fractures horizontales (HTAL) présentent une certaine stabilité du trait de fracture en comparaison des autres fractures de cette classification.

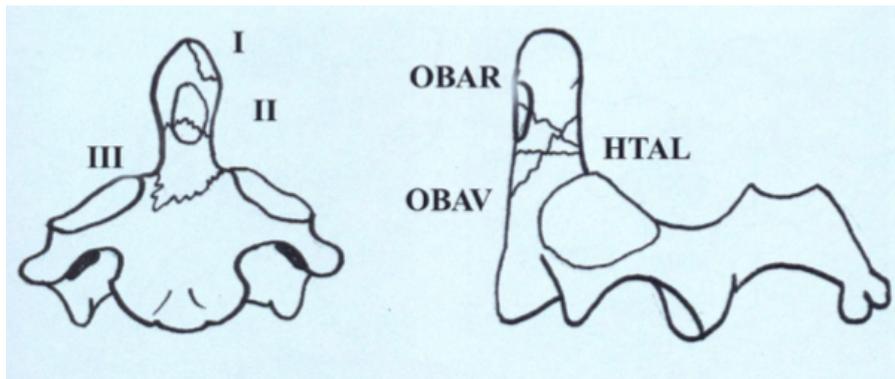


Figure 27 : Classification des fractures du processus odontoïde
 Classification d'Anderson et D'Alonzo (1974) à gauche (28),
 Classification de Roy-Camille (1979) à droite (30),
 D'après Toussaint et al. (25)

Grauer *et al.*(31) propose une classification qui détaille les fractures type II d'Anderson et D'Alonzo. Il y ajoute un facteur d'instabilité A, B ou C. Le Type IIA correspond aux fractures non déplacées et stables, le Type IIB équivaut à un trait de fracture oblique en bas et en arrière, responsable d'une instabilité postérieure, et le type IIC correspond à un trait de fracture oblique en bas et en avant, responsable d'une instabilité antérieure.

1.4.1.3.2 Les fractures bi-pédiculaires de C2

Les fractures bi-pédiculaires de C2 sont également nommées fractures bi-isthmiques, « C2 ring fracture » (fracture de l'anneau de C2) ou « hangman's fractures » (fracture du pendu). Ces fractures étaient observées chez les prisonniers de la Couronne d'Angleterre condamnés à la mort par pendaison. Le nœud de la corde était placé en avant du cou, relativement lâche. La pendaison entraînait un traumatisme très violent en hyper-extension, responsable d'une fracture bi pédiculaire assurant une mort quasi immédiate. Elles sont décrites dans la classification d'Effendi et Laurin (Figure 28) (32).

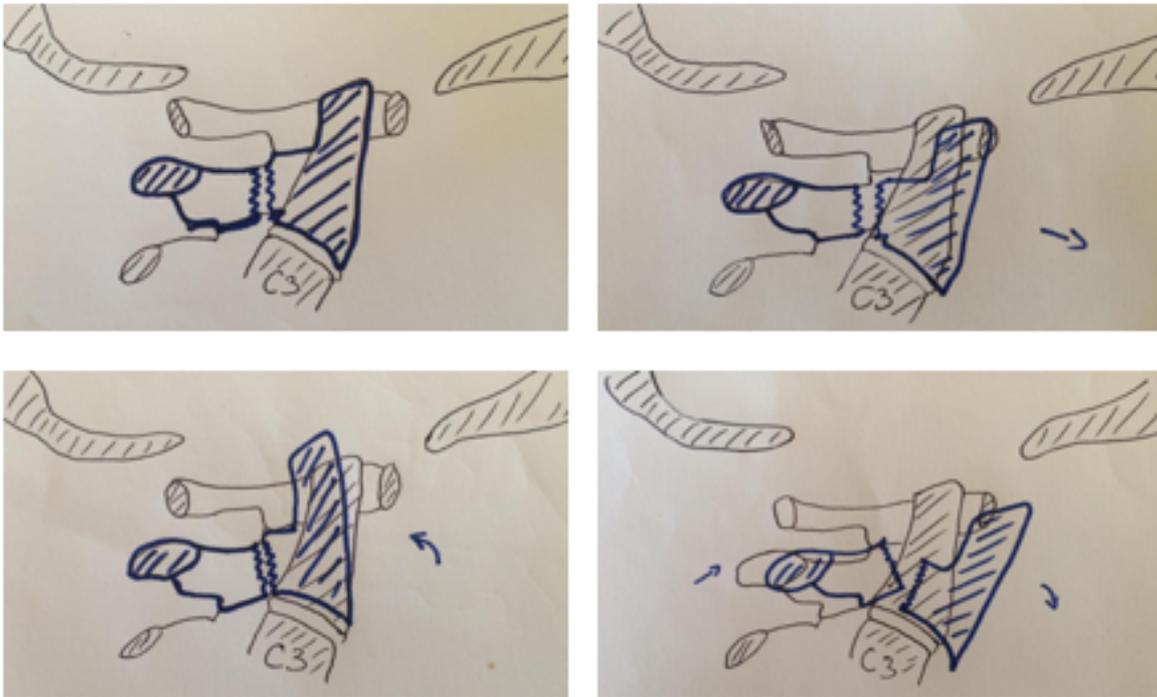


Figure 28 : Classification d'Effendi et Laurin

Type I en haut à gauche

Type II en haut à droite et en bas à gauche

Type III en bas à droite



Figure 29 : Fracture bi-pédiculaire de C2, Effendi II

Radiographie de profil

D'après Molière et al. (7)

La classification d'Effendi et Laurin est organisée en 3 types. Le type I correspond à une fracture peu ou non déplacée, sans atteinte ligamentaire ni discale. Cette lésion n'est pas pourvoyeuse d'IAA. Le type II correspond à une atteinte du disque C2-C3 avec une angulation supérieure à 11° (Figure 29). Le type III correspond à une dislocation des articulaires postérieures C2-C3 associées. Le type II et le type III sont responsables d'IAA.

1.4.1.3.3 Les fractures du corps de C2

Elles regroupent des fractures polymorphes, faisant l'objet de multiples classifications. Une variété isolée correspond à la fracture appelée « tear drop inversée » qui comprend une atteinte de la base du processus odontoïde et s'étend dans le corps de C2 puis dans le disque C2/C3 et le ligament inter-épineux en arrière (Figure 30) (33). Elle résulte d'un traumatisme en hyper extension et est souvent associée à des lésions de la face.



Figure 30 : Fracture tear drop inversée

D'après Ma et al. (33)

1.4.1.4 Les pseudarthroses du processus odontoïde

Les pseudarthroses correspondent à un défaut de consolidation osseuse d'un trait de fracture. Certaines localisations fracturaires, telles que les fractures de type II d'Anderson et D'Alonzo du processus odontoïde sont à risque d'évoluer vers une pseudarthrose (29). Les pseudarthroses peuvent être atrophiques ou hypertrophiques. Ces dernières sont caractérisées par un développement trop important du cal osseux de régénération pouvant, dans le cas d'une fracture du processus odontoïde, être responsable d'une compression bulbo-médullaire (34).

1.4.2 Instabilité d'origine tumorale

Les tumeurs du RCS sont rares et représentent moins de 0,5% de l'ensemble des tumeurs du rachis (35). Majoritairement d'origine secondaire (Figure 31), elles peuvent entraîner une IAA par fracture pathologique sur une lésion ostéolytique ou envahir le canal vertébral et provoquer une compression neurologique et une épидurite (35).



Figure 31 : Métastase C1-C2 d'un cancer primitif rénal

Coupe sagittale d'IRM pondérée en T2

D'après Molière et al. (7)

1.4.3 Instabilité d'origine inflammatoire

Les rhumatismes inflammatoires, majoritairement représentés par la polyarthrite rhumatoïde, la chondrocalcinose, la spondylarthrite ankylosante (36), le rhumatisme psoriasique (37) ou le syndrome de Fiessinger-Leroy-Reiter (syndrome associant arthrite réactionnelle, spondyarthropathie, urétrite et conjonctivite) atteignent le RCS et peuvent entraîner une IAA.

La pathologie rhumatismale la plus pourvoyeuse d'IAA est la polyarthrite rhumatoïde. Elle entraîne une destruction capsulaire, ligamentaire et osseuse pouvant créer une dislocation atlanto-axoïdienne antérieure, postérieure ou verticale (38). De plus, la polyarthrite rhumatoïde induit le développement d'un pannus synovial (Figure 32) qui, associé à l'IAA, peut aboutir à une compression médullaire. Cette atteinte classique du RCS est moins fréquente depuis l'avènement des biothérapies.

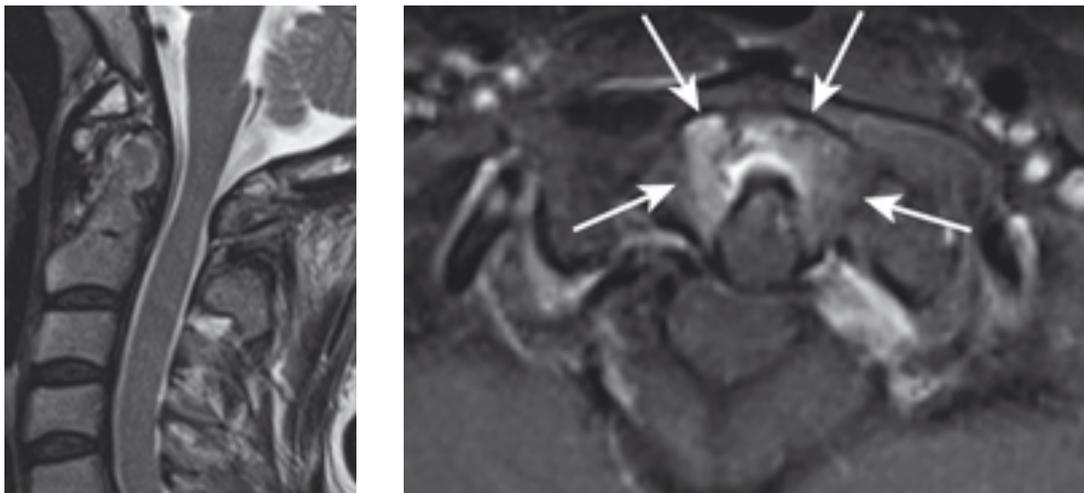


Figure 32 : Pannus péri-odontoidien

Coupe sagittale d'IRM T2 à gauche

Coupe axiale d'IRM pondérée en T2 à droite, les flèches indiquent le pannus péri-odontoidien

D'après Molière et al. (7)

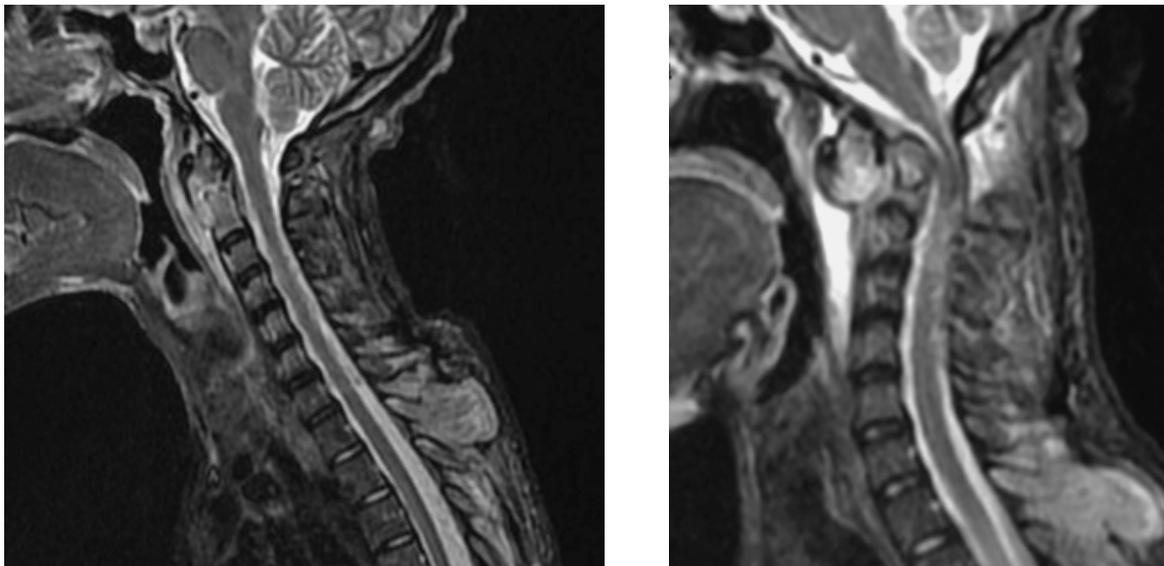
Le syndrome de la dent couronnée est retrouvé dans la chondrocalcinose (Figure 33). Il est la séquelle d'une ossification du ligament transverse associé à des dépôts de pyrophosphates de calcium. Il est rarement associé à une IAA (39).



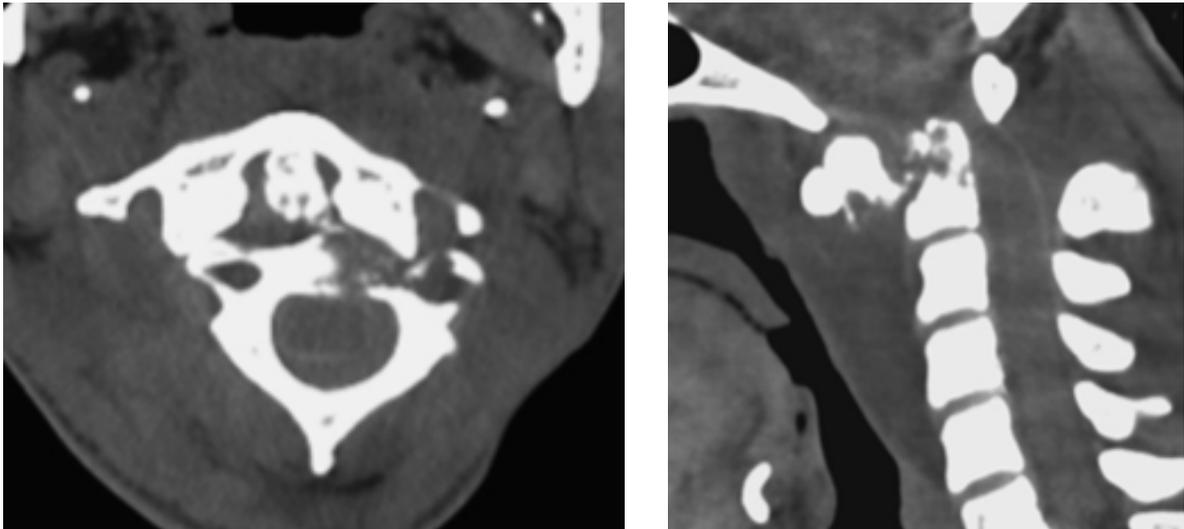
*Figure 33 : Syndrome de la dent couronnée
Coupe tomodensitométrique sagittale à gauche
Coupe tomodensitométrique coronale à droite
D'après Molière et al. (7)*

1.4.4 Instabilité d'origine infectieuse

La tuberculose de la charnière cervico-occipitale est devenue rare en Europe occidentale (40). Elle peut atteindre le clivus, les condyles occipitaux, les masses latérales de C1 et C2 ou encore le processus odontoïde (41). La destruction osseuse et le fuseau para-vertébral peuvent parfois entraîner une compression bulbo-médullaire (Figure 34 et Figure 35) (42).



*Figure 34 : Abscès rétropharyngé et atteinte de C2
Absence de fracture et de déplacement à droite
Compression médullaire 10 jours après la consultation à gauche
D'après Ould-Slimane et al. (41)*



*Figure 35 : Fracture pathologique du processus odontoïde déplacé vers l'avant
D'après Ould-Slimane et al. (41)*

Quelques cas de spondylodiscites ou d'ostéomyélites affectant les vertèbres C1 ou C2 ont été décrits. Il s'agit d'affections relativement rares (41).

1.4.5 Instabilité d'origine congénitale

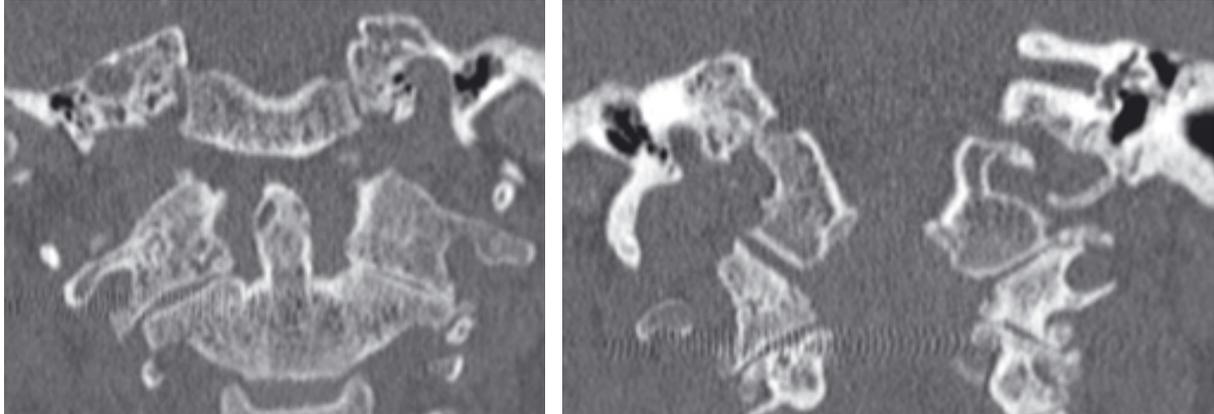
L'agénésie du ligament transverse est une cause d'IAA. Cette anomalie est principalement retrouvée chez des patients atteints de trisomie 21 (20 à 50% des cas) (43). Des malformations du processus odontoïde sont également possibles. Il en existe 2 formes majeures que sont la dysplasie (absence ou hypoplasie du processus odontoïde) et l'os odontoïdum (Figure 36) (non fusion de la dent avec le corps de l'atlas) (44).



*Figure 36 : Os odontoïdum
D'après Le Pape et al. (45)*

1.4.6 Instabilité d'origine dégénérative

La dégénérescence des massifs articulaires de C1 et C2 peut conduire à une IAA (Figure 37).



*Figure 37 : Instabilité atlanto-axoïdienne d'origine dégénérative
Coupe tomodensitométrique coronale à gauche et à droite
D'après Molière et al. (7)*

1.5 Techniques de stabilisation du rachis cervical supérieur par voie postérieure

Les premières tentatives de stabilisation de C1-C2 par abord postérieur datent de 1910, quand Mixter et Osgood ont décrit l'utilisation de fils de soie épais pour maintenir l'arc postérieur de C1 et le processus épineux de C2 ensemble (14).

1.5.1 Technique de Gallie

En 1939, Gallie (46) décrit une chirurgie postérieure du RCS avec fixation de l'arc postérieur de C1 par des fils d'acier (Figure 38). Une greffe à partir d'un greffon iliaque est insérée sur le processus épineux de C2 et s'appuie sur l'arc postérieur de C1. Le greffon est maintenu en place par un câble d'acier passé sous l'arc postérieur de C1 et enroulé autour du processus épineux de C2. Le câble n'est pas passé sous la lame de C2 afin de diminuer les risques neurologiques. Cette technique nécessite une immobilisation post-opératoire par halo.

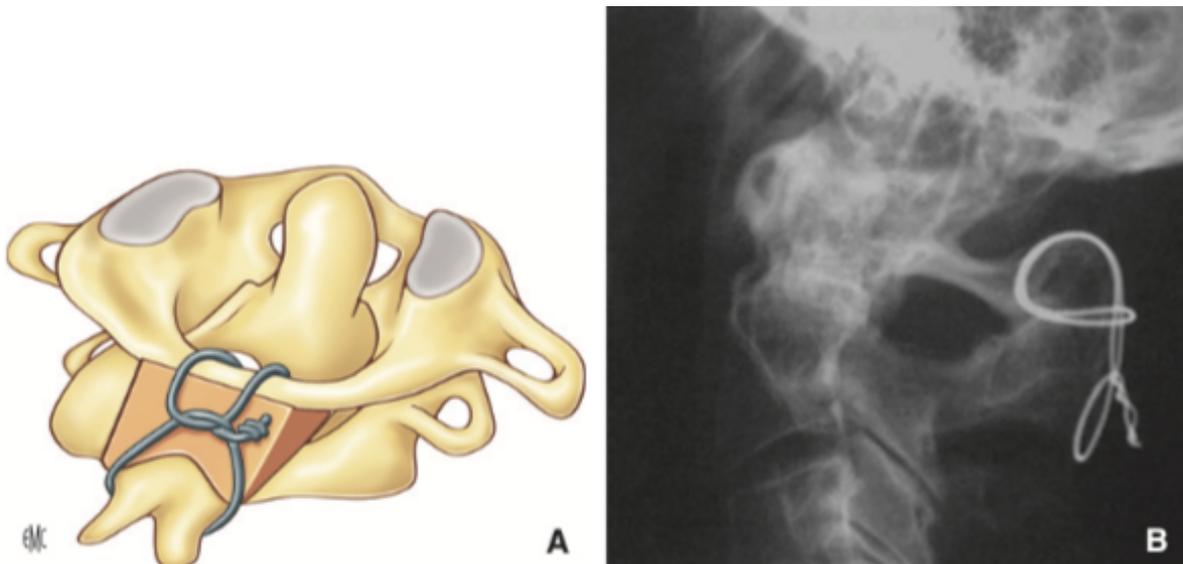


Figure 38 : Laçage selon Gallie

Schéma à gauche (A)

Radiographie post opératoire de profil à droite (B)

D'après Cloché et Vital (20)

1.5.2 Technique de Brooks et Jenkins

Brooks *et al.* modifient la technique de Gallie dans les années 70. Dans cette technique opératoire, 2 greffons iliaques sont placés entre C1 et C2. Chaque greffon autologue est biseauté à ses extrémités et calé entre les lames de C1 et C2 de part et d'autre de la partie centrale (Figure 39). Un câble est passé sous l'arc postérieur de C1 et la lame de C2, de chaque côté de la ligne médiane. Chaque câble est enroulé et resserré autour de son greffon. Dans les suites post opératoires, la technique de Brooks nécessite une immobilisation post-opératoire par halo veste.

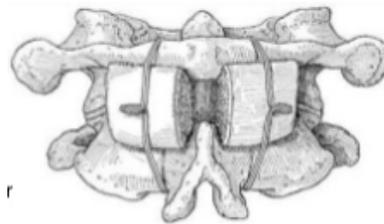


Figure 39 : Laçage selon Brooks

D'après Molière et al. (7)

1.5.3 Clampage inter-lamaire

Dans les années 1980, les « clamps inter-lamaire » ou crochets (Figure 40) deviennent une méthode alternative de fixation C1-C2 (47). Ils nécessitent la mise en place d'un crochet sur la partie supérieure de l'arc postérieur de C1 et d'un autre crochet sur la partie inférieure de la lame de C2. Une greffe osseuse est placée entre les 2 reliefs osseux avant que le clamp ne soit resserré.

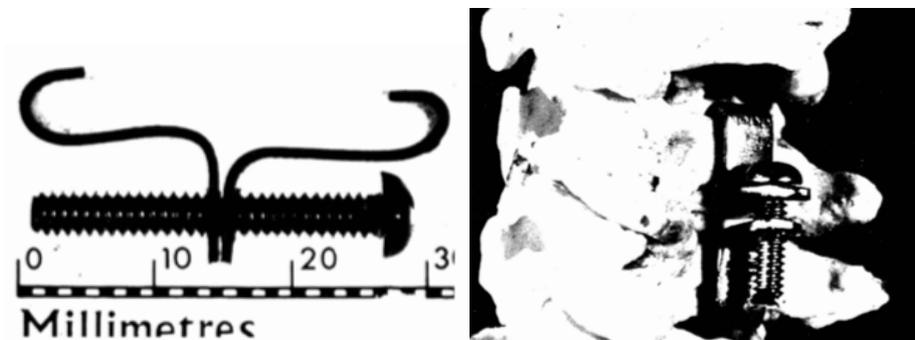


Figure 40 : Clamps inter lamaires

D'après Holness et al. (47)

1.5.4 Technique de Magerl

En 1987, Grob et Magerl (48), puis en 1992, Jeanneret et Magerl (49) décrivent une technique de fixation chirurgicale trans-articulaire par voie postérieure (48). Elle nécessite la réalisation pré opératoire d'un TDM injecté du rachis cervical afin de vérifier la position des artères vertébrales et l'état osseux local. Il est également recommandé de réaliser une IRM pré opératoire afin de s'assurer de l'intégrité du ligament transverse et de rechercher une compression neurologique.

Le patient est installé avec une tête à pointe de Mayfield, le rachis cervical en position neutre et les bras maintenus le long du corps. Un repérage fluoroscopique du niveau est réalisé afin de centrer l'incision cutanée. L'incision est médiane permettant une exposition des arcs postérieurs de C1 à C7 (50). Par une dissection sous-périostée soignée, on expose la partie supérieure de l'isthme de C2 bilatéralement puis les facettes des articulations de C1-C2 sont ouvertes. Des broches métalliques sont insérées dans le massif articulaire inférieur de C1 et sont utilisées pour écarter les tissus mous contenant le nerf grand occipital et le plexus veineux qui l'accompagne (Figure 41). S'il survient une lésion du plexus veineux, il faut mettre un dérivé hémostatique. La réduction peut être vérifiée visuellement et la direction des vis peut être déterminée (49).

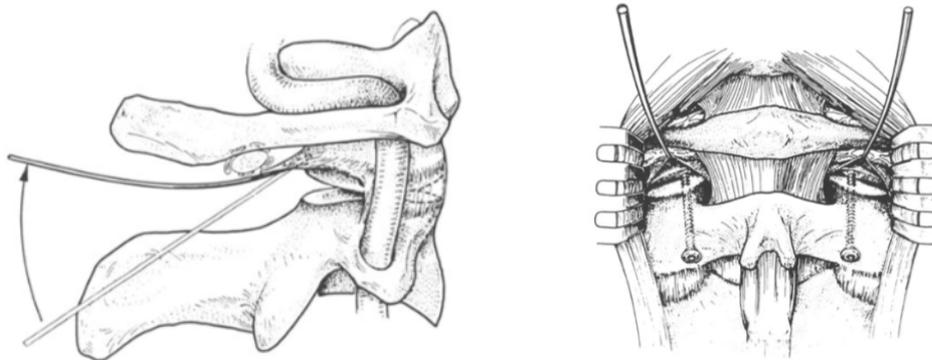


Figure 41 : Exposition des articulaires C1-C2 dans la technique de Magerl

Vue latérale droite à gauche

Vue postérieure à droite

D'après Magerl (50)

Les vis sont insérées sagittalement. Le point d'entrée en C2 est situé près du bord inférieur du processus articulaire inférieur de C2 (50). Leur direction est ascendante, sortant au bord postérieur de la surface articulaire supérieure en C2. Les vis sont placées à travers les articulations facettaires dans les masses latérales de C1 (Figure 42). La longueur des vis peut être vérifiée à l'aide d'un amplificateur de brillance. La prise doit être quadri corticale.

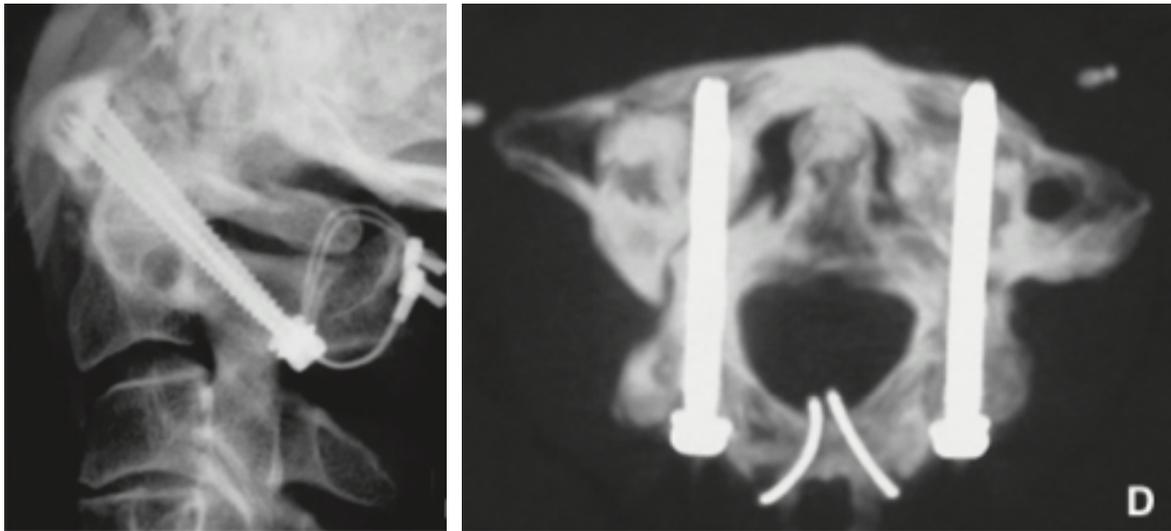


Figure 42 : Vissage selon Magerl associé à un laçage selon Gallie

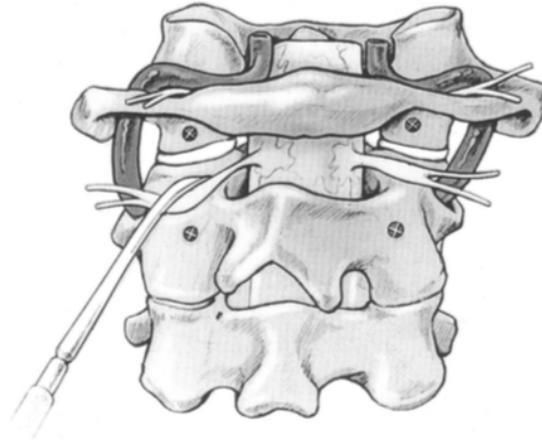
Radiographie de profil à gauche

Coupe tomographique passant par les vis à droite

D'après Cloché et Vital (20)

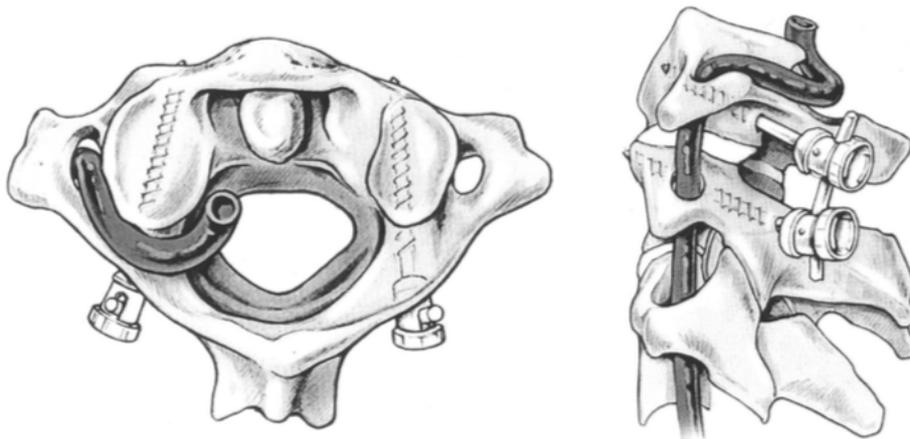
1.5.5 Technique de Goel modifiée par Harms

Goel et Laheri (51) décrivent une technique de fixation dans les masses latérales de C1 et les pédicules de C2 avec des plaques postérieures. Cette technique a été modifiée par Harms et Melcher en 2001. Ils décrivent une technique permettant la fixation des masses latérales de C1 avec les isthmes de C2 en utilisant des vis polyaxiales (52). L'installation du patient est la même que pour la technique de Magerl. L'incision est médiane permettant une exposition de l'occiput et des arcs postérieurs de C1 à C3. L'exposition est étendue jusqu'au bord latéral de l'articulation C1-C2, au contact du plexus veineux para-vertébral. Ce plexus est souvent le siège d'un important saignement qu'il convient de coaguler à la pince bipolaire ou à l'aide de tissus hémostatiques (52). L'articulation C1-C2 est exposée et ouverte. La racine C2 est identifiée et mobilisée. Le point d'entrée dans la masse latérale de C1 se trouve en regard de l'amincissement postéro-latéral de son arc dorsal.



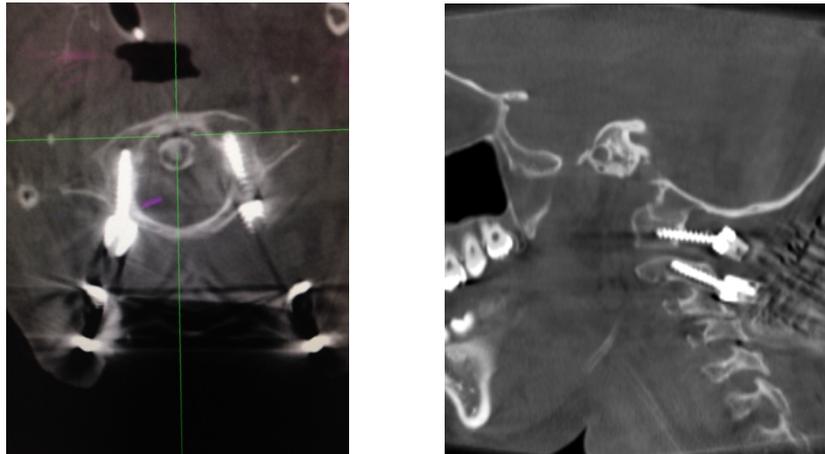
*Figure 43 : Représentation des points d'entrée de C1 et C2 selon la technique de Harms
D'après Harms (52)*

Le point d'entrée est marqué par une fraise de 1 à 2 mm, pour éviter le glissement de la pointe de forage (Figure 43). Le trajet est ensuite percé selon une trajectoire droite ou légèrement convergente, la pointe du foret étant dirigée vers l'arc antérieur de C1. Le trou est taraudé et une vis polyaxiale de 3,5 mm, de longueur appropriée, est insérée de manière bicorticale dans la masse latérale de C1. La longueur de la vis utilisée peut être déterminée par scanner préopératoire. Une partie non filetée de la vis C1 reste au-dessus de la surface osseuse de la masse latérale, minimisant ainsi tout risque d'irritation du nerf grand occipital et permettant à la partie polyaxiale de la vis de se situer au-dessus de l'arc postérieur de C1. La position des vis est vérifiée par un amplificateur de brillance.



*Figure 44 : Technique de vissage selon Harms
Vue supérieure de C2 montrant les vis polyaxiales bi-corticales à gauche
Vue latérale de la fixation C1-C2 à droite
D'après Harms et al. (47)*

Le point d'entrée de C2 est décrit dans le quadrant supéro-médian de l'isthme de C2 (52). La direction de la mèche est convergente d'environ 20° à 30° et ascendante de 20°. L'intégrité du trou est vérifiée à l'aide d'un palpeur. Le trou est taraudé et une vis polyaxiale de 3,5 mm, de longueur appropriée, est insérée de manière bi-corticale. Une fois les vis controlatérales mises en place, on positionne les tiges et les écrous (Figure 44 et Figure 45). Une greffe spongieuse iliaque est mise en place après décortication des arcs postérieurs de C1 et C2.



*Figure 45 : Arthrode C1-C2 type Harms
Coupe axiale de TDM, passant par les vis de C2
Coupe sagittale de TDM, passant par les vis*

1.5.6 Alternatives aux arthrodeses C1-C2

1.5.6.1 L'arthrodèse occipito-cervicale

Roy Camille décrit en 1983 un traitement par arthrode occipito-cervicale d'une dislocation atlanto-axoïdienne avec empreinte basilaire et retentissement médullaire dans le cadre d'une polyarthrite Rhumatoïde (53).

Le patient est installé en décubitus ventral dans une têtère à pointes de Mayfield. Il faut être particulièrement vigilant à la position du regard qui sera fixé une fois l'intervention réalisée.

Un angle occipito-cervical de 0 à 30° est souhaitable (20). Cet angle est mesuré entre la ligne de McGregor et le plateau inférieur de C2.

L'abord est médian, de l'occiput au processus épineux de C4 ou plus bas. Les masses musculaires sont écartées latéralement. Une hémostase soignée à la pince bipolaire est réalisée.

La position idéale des vis occipitales est située sous la tubérosité occipitale externe, proche de la ligne centrale entre les deux lignes occipitales supérieure et inférieure (20). La plaque occipitale est prolongée par des tiges et reliée à la colonne cervicale basse par des vis polyaxiales insérées dans les massifs articulaires postérieurs. La fixation de C1 et C2 est optionnelle et parfois difficile à réaliser (Figure 46).

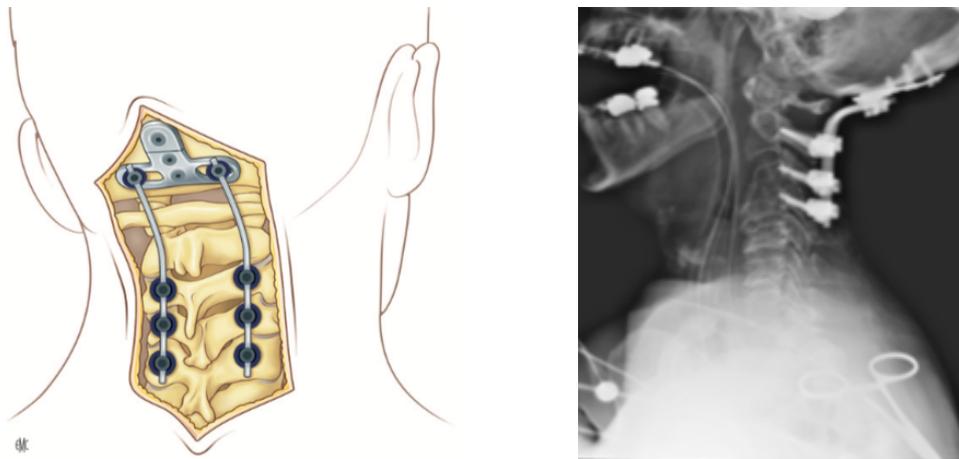


Figure 46 : Arthrodeuse occipito-cervicale

Illustration à gauche, d'après Cloché et Vital (20)

Radiographie de profil, d'après Mead et al. (1)

1.5.6.2 Le traitement orthopédique

Le traitement orthopédique du RCS est réalisé à l'aide d'une immobilisation par collier cervical. Il peut s'agir d'un maintien par minerve mousse souple, d'une immobilisation par minerve rigide type Philadelphia (Figure 47) ou d'appareillage plus invasif tel que le halo veste (Figure 48). La durée d'immobilisation varie selon les pathologies et selon les auteurs entre 8 semaines et 14 semaines (54, 55).



Figure 47 : Collier cervical type Philadelphia



*Figure 48 : Halo veste
D'après Kamal (54)*

1.6 Choix thérapeutiques

1.6.1 Études biomécaniques

Plusieurs études biomécaniques ont étudié la qualité de la fusion de chacune des techniques d'arthrodèse de C1-C2. Ainsi, la technique historique de Gallie permet d'éviter la translation antérieure de l'atlas, mais autorise des mouvements de RA (56). La technique de Brooks, ajoutant un passage sous-lamaire en C2, augmenterait la stabilité axiale (57). Les taux de fusion de ces 2 techniques restent assez faibles (58).

La technique de Magerl bloque 50% de la RA de l'articulation atlanto-axiale (20) et permet une fusion tomодensitométrique dans 98% des cas selon Dickman *et al.* (59). Ces résultats semblent liés à un meilleur contrôle des mouvements de FE et de RA que les techniques de laçage (60). La stabilité offerte par la technique de Harms est équivalente à celle de Magerl selon Bourdillon *et al.* (60).

1.6.2 Complications rapportées de ces techniques

Toutes ces techniques chirurgicales sont associées à des complications plus ou moins graves. Le traitement orthopédique par halo veste est associé à de nombreuses complications : la perte d'un des picot de maintien (36%), l'infection du site de mise en place du picot (20%), les plaies cutanées liées à l'appui de la veste (11%) et l'inconfort lié aux picots (18%) (61). Le halo veste est associé à une morbidité plus élevée que la chirurgie ou l'immobilisation par orthèse rigide dans les populations de plus de 65 ans (62).

Les risques propres à la technique de Magerl correspondent à des lésions neurologiques, principalement des nerfs spinaux cervicaux, les lésions du nerf hypoglosse ou les lésions de l'artère vertébrale (56). Pour limiter les risques d'atteinte de l'artère vertébrale, certains auteurs recommandent de ne positionner les vis qu'en cas d'anatomie habituelle éventuellement en réalisant un montage unilatéral (56). En cas de lésion de l'artère vertébrale au cours du vissage du premier côté, il est conseillé d'arrêter l'intervention et de n'effectuer qu'un vissage unilatéral. Une artériographie doit être réalisée. Elle permet une analyse de la vascularisation résiduelle, par la compétence du polygone de Willis. Une embolisation de l'artère vertébrale atteinte peut être discutée en cas d'hémorragie persistante (63).

L'atteinte radriculaire de C2 est aussi décrite (64, 65). Certains auteurs proposent de sacrifier cette racine pour augmenter la surface de fusion par une meilleure décortication des surfaces articulaires sans conséquence clinique majeure (66).

Les risques rapportés pour la technique de Harms sont identiques à ceux décrit pour l'intervention de Magerl (67). La dissection des plexus veineux latéro-cervicaux pour permettre l'exposition du point d'entrée de la vis de C1 est régulièrement associé à un temps hémorragique dont l'hémostase difficile est obtenue par tamponnement et produits hémostatiques locaux.

1.6.3 Particularités techniques

Les techniques de laçage et d'arthrodèse par clamps sous lamaires ne peuvent être utilisées que si l'arc postérieur de C1 et les lames de C2 sont solides. La technique de Magerl nécessite une réduction de la fracture, avant mise en place des vis (50). L'axe de visée est souvent contraint par le relief de la cyphose thoracique haute. Une contre incision cutanée en regard de celle-ci peut être alors nécessaire. La technique de Harms reste possible même en cas d'atteinte de l'arc postérieur ou d'une perte de l'alignement C1-C2 (52).

Les difficultés des techniques de vissage C1-C2 sont liées à la précision nécessaire pour l'insertion des vis entre la moelle épinière et l'artère vertébrale. La faisabilité du vissage de C2 est inconstante du fait de variabilités anatomiques. Au moins un pédicule de C2 apparaît inadapté au vissage pédiculaire chez 13% des patients (68).

1.6.4 Indications

Elles correspondent aux configurations d'instabilité graves C1-C2 sans lésion occipito-cervicale. En traumatologie, elles correspondent essentiellement aux fractures et pseudarthroses instables du processus odontoïde. Cependant, en cas de fracture récente transversale ou OBAR, nous préférons proposer un vissage direct par voie antérieure qui paraît moins risqué et mieux toléré.

Les lésions tumorales ou infectieuses, déstabilisant le RCS sont polymorphes. La localisation des lésions lytiques guide le choix de la technique qui sera le plus souvent de type Harms.

Pour le traitement des pathologies inflammatoires, il semble nécessaire d'obtenir la stabilisation la plus efficace, qui d'après Coyne *et al.* serait la technique de Harms ou de Magerl (58). Dans notre expérience, le vissage trans-articulaire semble plus aléatoire. Le choix technique de ces arthroèses repose comme souvent sur l'habitude et la formation des opérateurs.

Les rares formes congénitales impose le même raisonnement que pour les formes inflammatoires puisque leur traitement repose sur la suppression de l'hyper mobilité.

1.7 Imagerie per opératoire

Les systèmes de navigation en chirurgie du rachis sont apparus au milieu des années 1990. Ils sont dérivés des systèmes de navigation et de robotique développés pour la chirurgie stéréotaxique en neurochirurgie. Le principe de base de la navigation consiste à localiser en trois dimensions (3D) la position des instruments sur des images pré ou peropératoires. L'objectif de la navigation en chirurgie rachidienne est de sécuriser l'insertion des implants, notamment des vis pédiculaires.

1.7.1 Navigation à base fluoroscopique 2D

Les amplificateurs de brillance basés sur la fluoroscopie sont très largement utilisés dans les blocs opératoires. Leur fonctionnement est basé sur l'absorption d'un faisceau de rayon X permettant d'obtenir une image en 2 dimensions (2D) indispensable à la réalisation de gestes chirurgicaux précis. En orthopédie, ils ont permis, outre le contrôle peropératoire des procédures chirurgicales, de minimiser la taille des incisions en développant les chirurgies mini-invasives ou percutanées (69).

La navigation couplée aux appareils de fluoroscopie est plus récente et permet de localiser dans l'espace des instruments préalablement marqués. Une mire de calibrage permet de définir un référentiel de travail (Figure 49). Des images de références (de face, de profil et éventuellement de trois quart) sont prises en début d'intervention. L'amplificateur de brillance peut ensuite être retiré du champ opératoire et la navigation est réalisée par un ordinateur (70). Cette technique présente l'avantage de ne pas nécessiter d'imagerie pré opératoire et par conséquent de s'affranchir de toute étape de recalage (procédure cherchant une relation mathématique entre l'image pré opératoire et la situation per opératoire). Elle ne permet pas, contrairement à l'imagerie tomodensitométrie, une visualisation tridimensionnelle.



Figure 49 : Système de Navigation

A : Moniteur et B : Caméra infra rouge

D'après Merloz et al. (71)

1.7.2 Navigation couplée au scanner pré opératoire

Cette technique impose la réalisation d'une tomodensitométrie pré opératoire qui est transférée dans l'ordinateur de navigation (72). Un repérage des surfaces ou « bone morphing » est ensuite réalisé à l'aide des instruments dédiés permettant de repérer des points clés sur le patient. L'ordinateur calcule alors la correspondance exacte entre l'enregistrement de la position de ces points clés et la tomodensitométrie pré opératoire. Ce processus est appelé recalage (73). Les instruments peuvent ensuite être navigués avec une excellente précision. La phase de recalage peut être fastidieuse et parfois poser des problèmes de précision. L'examen préopératoire étant réalisé en décubitus dorsal et l'intervention en décubitus ventral, il peut exister des différences entre le repérage per opératoire et l'examen pré opératoire. Cette technique permet une navigation dans les 3 plans de l'espace (72).

1.7.3 Navigation avec scanner per opératoire

L'imagerie tomodensitométrique peut avoir lieu dans la position opératoire, au début de l'intervention, après la mise en place des mires de navigation. La navigation est directement connectée au scanner et les images sont directement importées. Pas de nécessité de recalage. L'avantage de ce type de navigation est la qualité de l'image, mais ce système reste limité. En effet, il nécessite une assistance technique pour sa manipulation, son coût est élevé et le coût de son entretien également. De plus, cet appareil est très volumineux et ne rentre pas dans la

plupart des salles opératoires, voir même dans certains bâtiments. Il nécessite un renfort des sols devant son poids important (74).

1.7.4 Navigation fluoroscopique 3D

Cette technique, basée sur la fluoroscopie 2D, diffère de cette dernière par ses modalités d'acquisition de l'image. Le bras en C (C-arm) est cette fois-ci motorisé et permet une rotation automatisée à 180 degrés autour de la zone opératoire. Pendant cette rotation, des acquisitions régulières bidimensionnelles sont réalisées puis traitées par l'ordinateur afin d'obtenir une reconstruction tridimensionnelle. Cette acquisition peut ensuite être couplée à un dispositif de navigation. Cette modalité d'imagerie ne nécessite pas de procédure de recalage, car l'acquisition est per opératoire (73).

1.7.5 Dispositif O-Arm®

L'O-Arm® (Medtronic, Minneapolis, MIN, USA) est un dispositif de navigation fluoroscopique 3D (Figure 50). A la différence des autres navigations 3D, le bras n'est pas en C, mais en forme d'anneau. Celui-ci s'ouvre pour permettre l'installation du patient, et se referme autour de lui. Une position dite « parking » est définie en début d'intervention, à distance du site d'intervention pour permettre la réalisation de l'intervention. Cette position est gardée en mémoire. La zone d'acquisition est également définie et gardée en mémoire. La mobilisation entre la zone d'acquisition et la position parking est automatisée.

Le rayonnement X de l'O-Arm® utilise le système Cone Beam ou imagerie volumétrique par faisceau conique permettant une meilleure qualité d'image (75).



Figure 50 : Système O-Arm®

D'après Van De Kelft (76)

Les limites de cette technologie sont la zone limitée à scanner (12 cm^3) et la courbe d'apprentissage de la procédure (74). De plus, ce dispositif nécessite une salle d'opération spécifique avec au moins 35 m^2 de surface, un sol pouvant résister à au moins 440 kg/m^2 et une hauteur de porte d'au moins 1,95 m et 90 cm de largeur (77).

1.8 Exposition aux particules ionisantes et radio protection

Plusieurs grandeurs dosimétriques sont utilisées pour mesurer l'irradiation des dispositifs d'imagerie. La dose absorbée (D) correspond à la quantité d'énergie déposée par unité de masse du rayonnement. Elle s'exprime en joule par kilogramme (J.kg^{-1}) appelé gray (Gy). Elle est mesurable. La dose équivalente (H) mesure l'impact sur les tissus biologiques d'une exposition à un rayonnement ionisant. Elle se définit comme la dose absorbée corrigée d'un facteur de pondération du rayonnement qui prend en compte la dangerosité relative du rayonnement considéré, et s'exprime en Sievert (Sv). La dose efficace (E) est utilisée pour prédire les risques stochastiques, c'est-à-dire les risques de développer, à moyen ou long terme, un cancer lié à une faible irradiation ou à une irradiation chronique. Elle se définit comme la dose équivalente corrigée d'un facteur de pondération tissulaire. Elle s'exprime également en Sievert (Sv). Cette grandeur dosimétrique est la plus intéressante cliniquement mais n'est pas mesurable.

Le produit dose surface (PDS) est le produit de la dose absorbée, rapporté à la surface sur laquelle elle est déposée. Il s'exprime en Gy.cm^2 . Il existe, en effet, un rapport direct entre la dose, la surface d'irradiation et la gravité des lésions observées. Cette mesure est adaptée au dispositif fluoroscopique et directement disponible dans le rapport d'irradiation de l'appareil. Dans le cas d'une imagerie tomodensitométrique, l'irradiation délivrée est reflétée par le produit dose longueur (PDL). Il permet de caractériser la dose moyenne délivrée mais également la longueur du volume irradié. Il s'exprime en mGy.cm . Cette mesure est adaptée au dispositif tomodensitométrique et directement disponible dans le rapport d'irradiation de l'appareil.

1.9 Objectif de l'étude

Ce travail vise à décrire la technique de navigation 3D appliquée aux arthroèses C1-C2 type Harms à partir d'une série de cas.

2 Technique

2.1 Installation

L'intervention était réalisée sous anesthésie générale, l'induction se faisait en décubitus dorsal permettant une intubation orotrachéale. Une têtère à pointes de Mayfield était installée une fois le patient endormi. La têtère permettait d'éviter tout risque de compression des globes oculaires ainsi qu'un positionnement optimal du rachis cervical. Le patient était installé en décubitus ventral sur table en carbone (Allen® Advance Table and Spine System, Allen Medical, Acton, MA, USA) (Figure 51). Les membres supérieurs étaient disposés le long du corps et placés dans des gouttières. Des bandes collantes élastiques (Elastoplast®) étaient installées sur les épaules et tendues sur des piquets afin de dégager le rachis cervical. Elles permettaient également de déplisser la peau de la nuque.

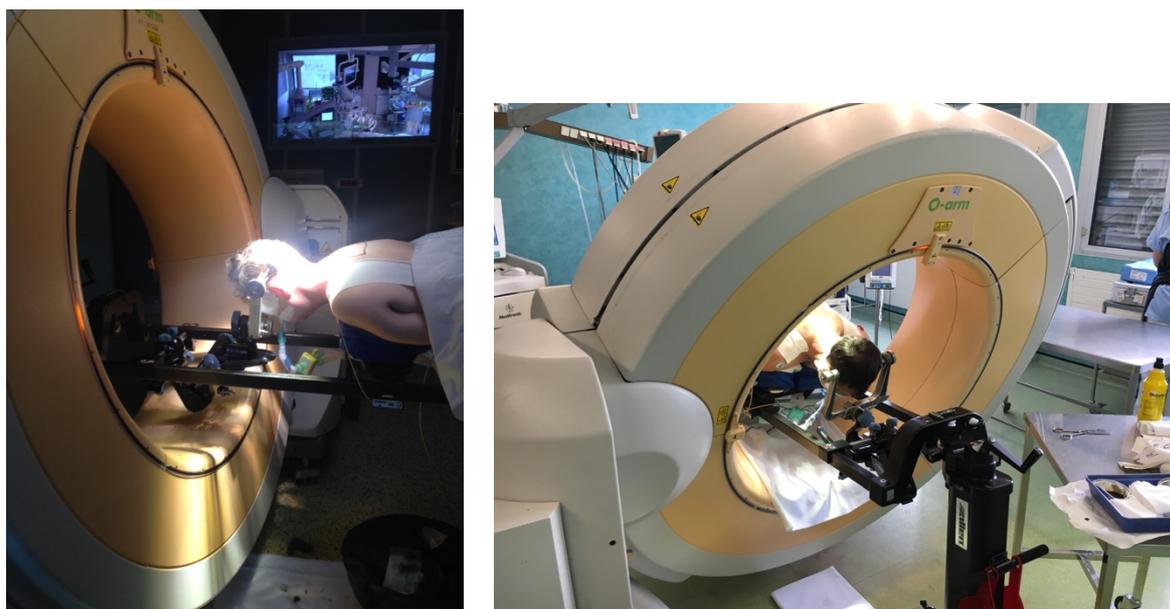


Figure 51 : Installation du patient en décubitus ventral dans l'O-Arm®

La position du regard était vérifiée afin d'éviter l'introduction d'un trouble rotatoire. La table était inclinée en proclive afin de limiter les saignements per opératoires. L'appareil d'imagerie O-Arm® (Medtronic, Minneapolis, MIN, USA) était positionné pour obtenir une acquisition 2D de face et de profil et pour se translater suffisamment en station de « parking » vers la tête du patient, sans gêner le bon déroulement de la chirurgie par son encombrement.

L'acquisition 2D initiale confirmait la qualité des rapports anatomiques entre C1 et C2. Chacune des positions était enregistrée par la machine afin qu'un mouvement automatisé les retrouve à tout moment (Figure 52).



Figure 52 : Appareil d'imagerie O-Arm® en position d'acquisition

2.2 Procédure chirurgicale

Un abord postérieur médian était réalisé (Figure 53). L'incision cutanée était poursuivie jusqu'au ligament nuchal qui était ouvert au bistouri électrique, permettant l'exposition des processus épineux et de la crête occipitale. Les lames vertébrales étaient ruginées à la rugine de Cobb jusqu'aux massifs articulaires en respectant les capsules articulaires. L'extension latérale de l'exposition para-vertébrale impliquait une hémostase soignée des plexus veineux. Des compresses roulées étaient mises en place dans les gouttières para-vertébrales afin de diminuer les saignements para-vertébraux veineux. La mise en place d'écarteurs auto-statiques permettait l'exposition des arcs postérieurs vertébraux de C1 à C3 et de la partie inférieure de l'occiput (Figure 54).



Figure 53 : Repérage cutané de l'incision médiane



*Figure 54 : Abord chirurgical médial
Exposition de l'occiput à C3*

A la fin de l'abord chirurgical, les mirettes de référence de l'appareil de navigation (Spine Referencing[®], Medtronic, Minneapolis, MIN, USA) étaient positionnées sur le processus épineux de C3. Une acquisition tomodensitométrique était ensuite réalisée puis reconstruite dans les trois plans de l'espace par le logiciel StealthStation Navigation[®] (Medtronic, Minneapolis, MIN, USA) sur la console O-Arm[®] (Medtronic, Minneapolis, MIN, USA). Pendant l'acquisition, tout le personnel rejoignait une zone assurant sa radio-protection, située en dehors de la salle. Les instruments étaient marqués par des mirettes spécifiques, reconnues par les caméras de navigation (NavLock[®] Navigation instrumentation, Medtronic, Minneapolis, MIN, USA) (Figure 55).

La projection de la vis, selon la taille souhaitée et son orientation étaient représentées par le logiciel sur les images tomodensitométriques acquises et reconstruites (Figure 56).

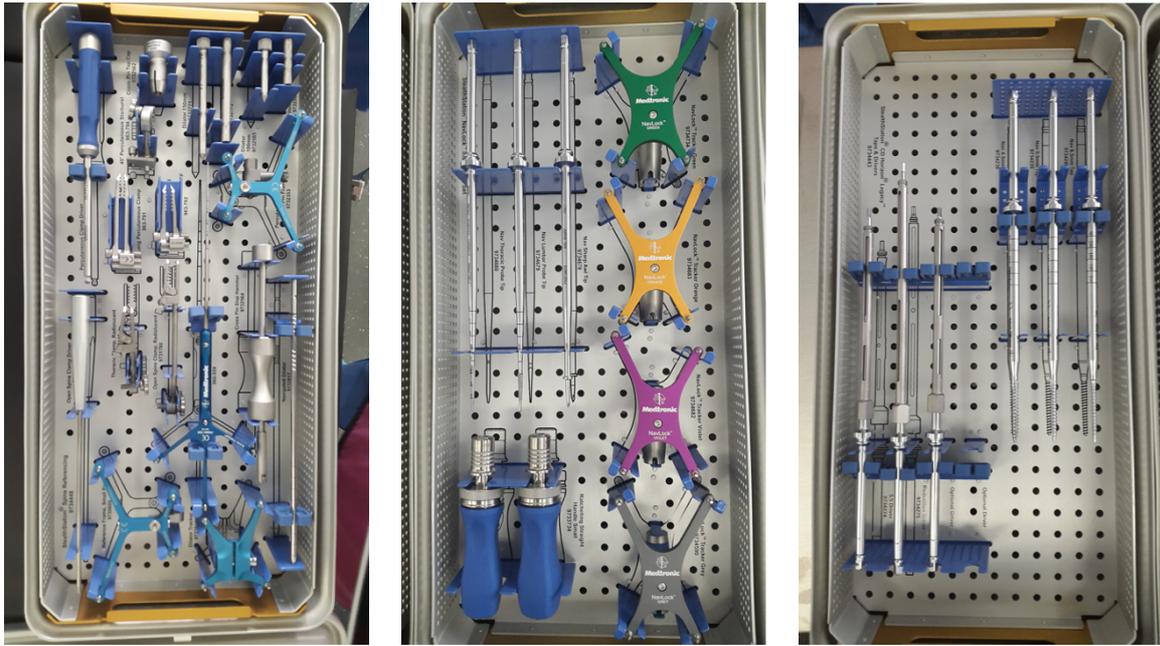


Figure 55 : Ancillaire Medtronic, système de navigation NavLock®

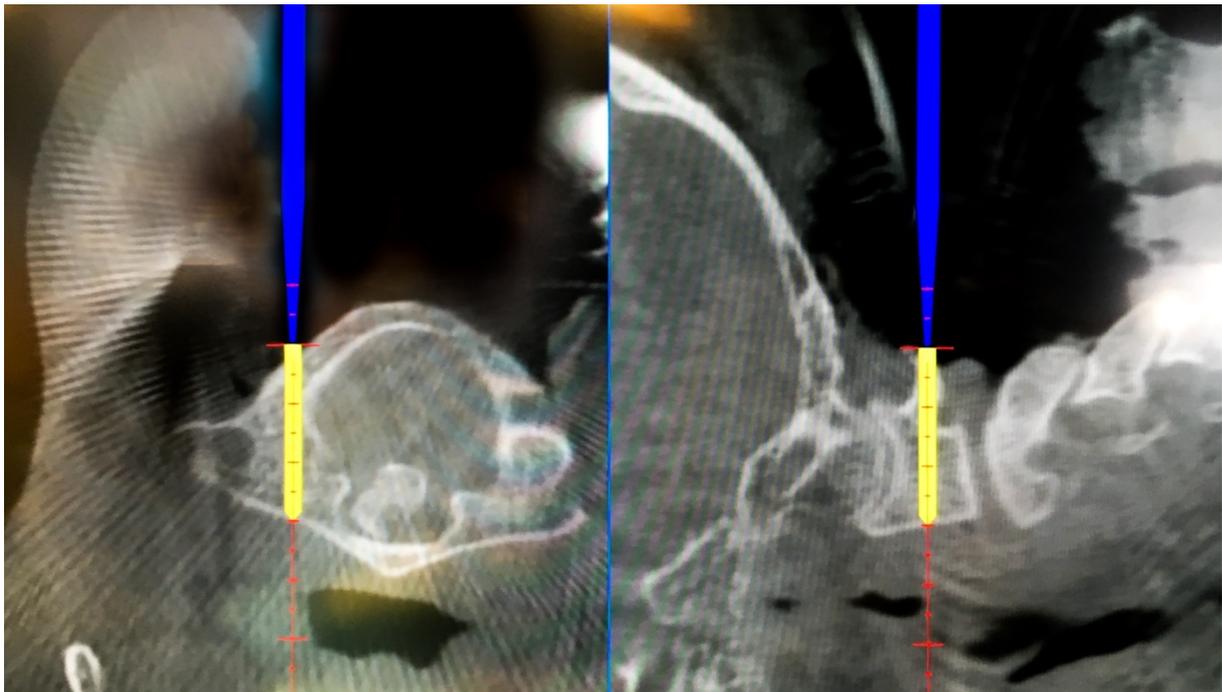


Figure 56 : Projection de la vis en per opératoire

Afin de vérifier la précision du système, la position de plusieurs repères osseux était contrôlée à l'aide du pointeur navigué. Il s'agissait, en particulier, de l'extrémité la plus postérieure de chaque processus épineux et des bords supérieurs et inférieurs de l'arc postérieur de C1. Ces vérifications étaient renouvelées régulièrement pendant l'intervention. Dans notre pratique, le

forage et le vissage n'étaient pas spécifiquement navigués mais leurs axes étaient contrôlés à l'aide du pointeur navigué.

Le point d'entrée dans la masse articulaire de C1 était défini en regard de l'amincissement postéro-latéral de son arc dorsal. Il était systématiquement confirmé par la navigation avant de fraiser la corticale osseuse et de progresser dans l'axe sagittal à l'aide d'une mèche ou d'une fraise boule de diamètre 3 mm. La direction était régulièrement contrôlée dans les 3 plans par l'instrument de navigation. Des vis en titane de diamètre 3,5 mm et de longueurs variant de 22 à 28 mm Vertex® (Medtronic, Minneapolis, MIN, USA) étaient introduites. La même méthode de navigation était appliquée aux vissages des pédicules de C2 dont le point d'entrée théorique est situé au centre du massif articulaire (68). Les vis introduites étaient reliées entre elles par des tiges en titane de diamètre 3,5 mm.

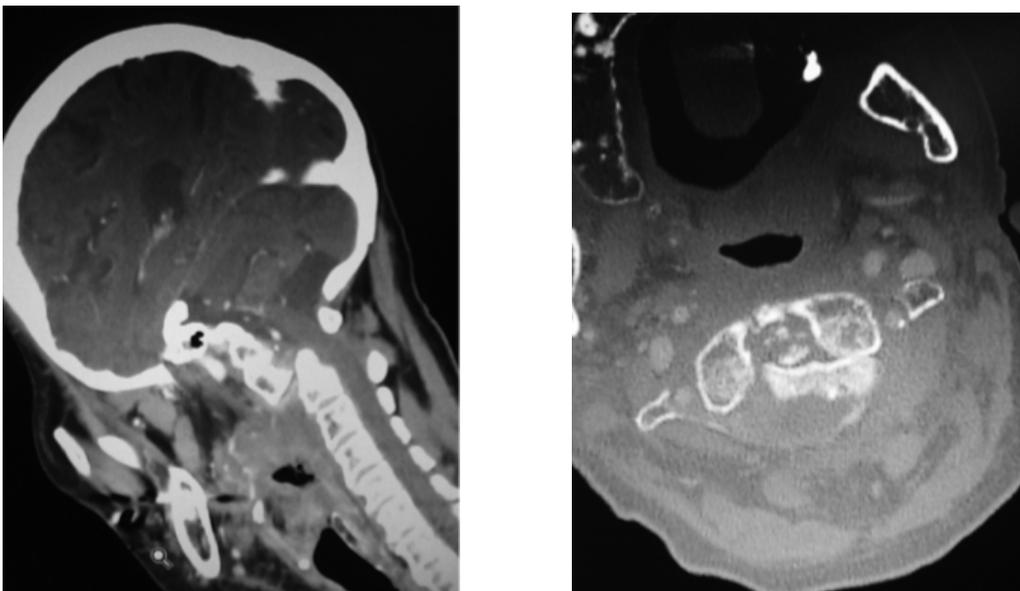


Figure 57 : Imagerie pré opératoire

Luxation C1-C2 sur fracture pathologique du processus odontoïde.

Coupe sagittale de TDM à gauche

Coupe axiale de TDM à droite

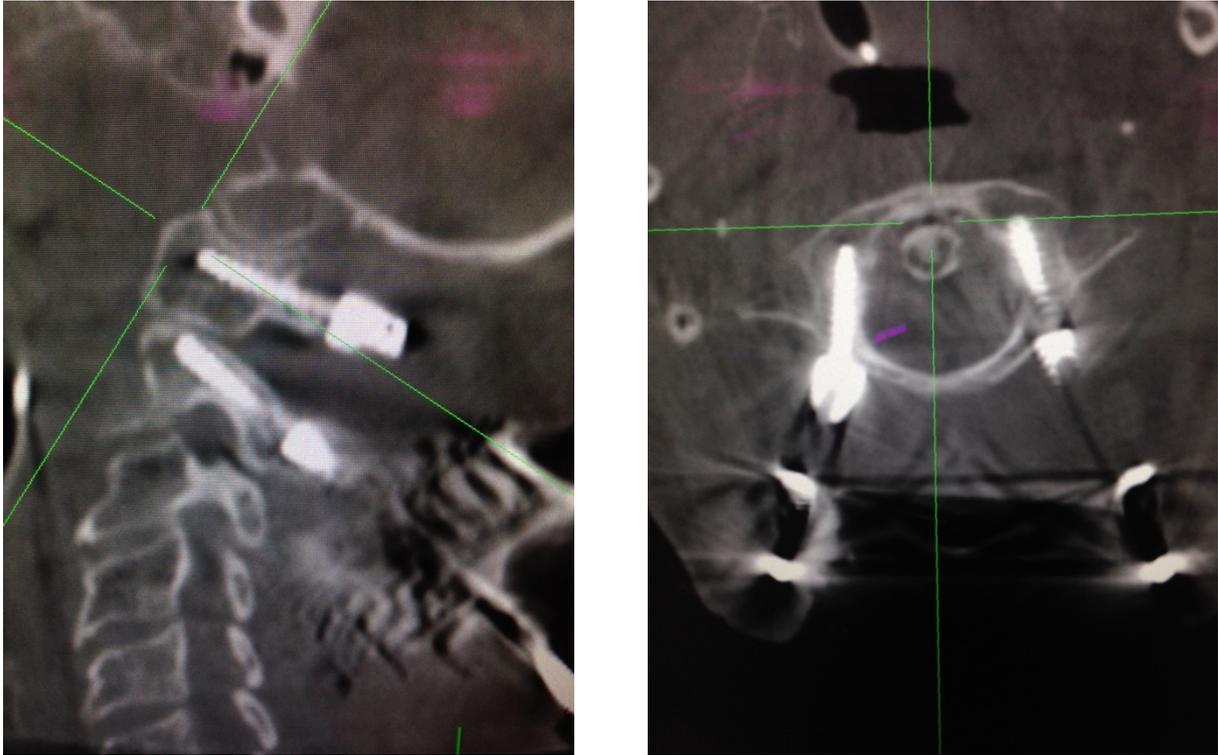


Figure 58 : Contrôle de la position des vis en fin d'intervention

Coupe sagittale TDM passant par les vis à gauche

Coupe axiale TDM passant par les vis de C2 à droite

Les arcs postérieurs de C1 et C2 étaient ensuite avivés pour accueillir une autogreffe osseuse spongieuse d'origine iliaque. En fin de procédure, une nouvelle acquisition 3D per opératoire contrôlait le positionnement de chaque implant et la qualité des rapports anatomiques obtenus (Figure 57 et Figure 58).

Un dispositif de drainage était positionné en sous aponévrotique. La fermeture se faisait plan par plan, au fil résorbable pour l'aponévrose nucale, des points inversés de sous peau et des points séparés au fil non résorbable pour la peau. Un pansement sec était mis en place sur la plaie.

3 Population

Cette technique d'arthrodèse naviguée a été réalisée chez 11 patients entre Janvier 2015 et Janvier 2017 (Tableau 1). Quarante-cinq pourcent des patients étaient des femmes (n=5). L'âge moyen était de 55 ans. Quatre-vingt-un pourcent des indications opératoires étaient traumatiques (n=9), dont un traumatisme sur lésion lytique métastatique. Une patiente présentait une atteinte rhumatoïde et la dernière une atteinte dégénérative. Un patient présentait un score de Frankel A, tandis que 90% des patients étaient évalués Frankel E.

La technique a pu être appliquée jusqu'à son terme dans tous les cas, sans discordance entre les repères osseux visuels et la navigation. La tomодensitométrie per opératoire de contrôle, réalisée en fin d'intervention, n'a constaté aucune effraction corticale. Les rapports anatomiques entre C1 et C2 étaient jugés satisfaisants avec une bonne congruence articulaire bilatérale. La patiente présentant la lésion lytique métastatique de C2 d'origine ORL, est décédée au 2^{ème} jour post opératoire d'une embolie pulmonaire massive.

	Age	Sexe	Indication	Score de Frankel	Complication
1	63	M	Traumatique	E	Aucune
2	58	F	Traumatique	E	Aucune
3	69	M	Traumatique	E	Aucune
4	26	M	Traumatique	A	Aucune
5	22	F	Rhumatismale	E	Aucune
6	55	M	Traumatique	E	Aucune
7	67	M	Traumatique	E	Cervicalgie
8	65	F	Traumatique/Tumoral	E	Décès
9	51	F	Dégénératif	E	Aucune
10	62	M	Traumatique	E	Aucune
11	67	F	Traumatique	E	Aucune

Tableau 1 : Série de patients opérés d'une arthrodèse type Harms sous navigation 3D

L'exposition aux radiations ionisantes (Tableau 2) a été enregistrée pour chaque procédure. Les paramètres moyens d'irradiation étaient de 120 kVp pour 155,7 mAs avec un temps moyen d'exposition de 6,74 s. Le PDS moyen en fluoroscopie 2D par patient était de 30,7 mGy.cm² et le PDL moyen par acquisition 3D était de 301 mGy.cm. La dose efficace estimée à partir d'un coefficient de conversion adapté au rachis cervical est de 8 microSv en 2D et de 0,6 mSv en 3D

Paramètres moyens d'irradiation	120 kVp pour 155,7 mAs
Temps moyen d'exposition	6,74 s
Produit dose x surface	30,7 mGy.cm ²
Produit dose x longueur	301 mGy.cm
Dose efficace 2D	8 microSv
Dose efficace 3D	0,6 mSv

Tableau 2 : Exposition aux radiations ionisantes

4 Discussion

Les arthrodèses C1-C2 sont le sujet de plusieurs travaux de recherche clinique et biomécanique (56,78,79). La technique de fixation selon Harms apporte des résultats convaincants en termes de stabilité et de fusion. Ses limites reposent sur les risques vasculo-nerveux qui lui sont associés (60). Elle conserve une place dans l'arsenal thérapeutique mais des méthodes de sécurisation technique tendraient à la diffuser.

L'imagerie 3D cone beam (O-Arm[®]) apporte des informations supplémentaires quant à la position des implants et la qualité des rapports anatomiques. Couplée à la navigation, elle guide les visées pédiculaires et articulaires (76). Lorsque cela est nécessaire, cet outil permet d'utiliser ou de modifier les points d'entrée et les axes adaptés à ces techniques complexes. La dissection des plexus veineux compliquant l'accès aux masses latérales de C1 et C2 pourrait être limitée, limitant les pertes sanguines (80). Les vis pédiculaires de C2 pourraient être allongées, voir même être bicorticales. La navigation semble permettre une réduction du temps opératoire pour la mise en place de vis pédiculaires classiques mais aucune donnée n'est disponible concernant l'intervention de Harms (81). Les neuropathies occipitales semblent être diminuées (82).

Au-delà de la sécurité, son intérêt formateur, lié à la confirmation 3D des repères visuels anatomiques, pourrait réduire la courbe d'apprentissage. A l'extrême, l'écueil serait de développer une dépendance à ces technologies qui sont inconstamment disponibles. Pour l'éviter, l'instrumentation postérieure du rachis cervical haut doit rester réalisable à main levée (83).

Plusieurs points techniques peuvent être discutés. La fixation des mires sur l'épineuse de C3 relève d'une décision arbitraire qui vise à les maintenir proches de la zone d'intérêt. L'inconvénient de cette proximité est de les voir involontairement déplacées ou masquées au cours de la procédure. Certains auteurs préfèrent les fixer sur la têtère à pointes. Le choix de cette structure rigide, qui ne suit pas les éventuels mouvements du rachis, semble réduire la fiabilité de la navigation (84). La précision obtenue par cette dernière est souvent jugée insuffisante pour s'appliquer aux arthrodèses cervicales. Les résultats de notre brève série expriment, au contraire, une bonne efficacité par l'absence d'effraction corticale ou de lésion vasculo-nerveuse. Les contrôles per opératoires réguliers des repères osseux visuels sont un

gage de la précision du système. L'acquisition 3D en fin de procédure pour analyser la position des implants et la qualité des rapports anatomiques reste une plus-value indispensable.

La dose d'irradiation reçue par le patient est non-négligeable mais elle reste associée à un événement ponctuel. Les PDL moyens d'un scanner diagnostique du rachis cervical ont été mesurée en 2018 dans notre centre à 630 mGy.cm, soit le double du PDL d'une acquisition cone beam (O-Arm®). Même si les données dosimétriques étaient indisponibles, l'irradiation des équipes soignantes est jugée nulle puisqu'elles sortent de la salle plombée pendant les acquisitions.

De nouvelles possibilités techniques ont récemment été développées. Certains développent l'utilisation de guide sur mesure permettant une insertion facilitée des vis (85). Des techniques percutanées sont à l'étude, éventuellement assistées par robot.

5 Bibliographie

1. Mead LB, Millhouse PW, Krystal J, Vaccaro AR. C1 fractures: a review of diagnoses, management options, and outcomes. *Curr Rev Musculoskelet Med*. 1 sept 2016;9(3):255-62.
2. Harms J, Melcher RP. Posterior C1-C2 fusion with polyaxial screw and rod fixation. *Spine*. 15 nov 2001;26(22):2467-71.
3. Park J, Scheer JK, Lim TJ, Deviren V, Ames CP. Biomechanical analysis of Goel technique for C1-2 fusion. *J Neurosurg Spine*. mai 2011;14(5):639-46.
4. Ould-Slimane M, Le Pape S, Leroux J, Foulongne E, Damade C, Dujardin F, et al. CT analysis of C2 pedicles morphology and considerations of useful parameters for screwing. *Surg Radiol Anat*. août 2014;36(6):537-42.
5. Blagg SE, Don AS, Robertson PA. Anatomic determination of optimal entry point and direction for C1 lateral mass screw placement. *J Spinal Disord Tech*. juin 2009;22(4):233-9.
6. Netter F. Atlas d'anatomie humaine. 6e édition. Elsevier Masson; 2015. 624 p.
7. Molière S, Dosch J-C, Dietemann J-L, Rahal N, Kremer S, Bierry G. Imagerie de la charnière cervico-occipitale : pathologies traumatiques, rhumatismales, infectieuses et tumorales. *EMC - Radiologie et imagerie médicale - musculosquelettique - neurologique - maxillofaciale*. 6 avr 2017;12(2):1-17 Article [31-673-B-21].
8. Kieffer E. Chirurgie de l'artère vertébrale. *EMC - Techniques chirurgicales - Chirurgie vasculaire*. 1987;1-0 [Article 43-130].
9. Currier BL, Maus TP, Eck JC, Larson DR, Yaszemski MJ. Relationship of the internal carotid artery to the anterior aspect of the C1 vertebra: implications for C1-C2 transarticular and C1 lateral mass fixation. *Spine*. 15 mars 2008;33(6):635-9.
10. Vaccaro AR, Ring D, Scuderi G, Garfin SR. Vertebral artery location in relation to the vertebral body as determined by two-dimensional computed tomography evaluation. *Spine*. 1 déc 1994;19(23):2637-41.
11. Shafafy R, Suresh S, Afolayan JO, Vaccaro AR, Panchmatia JR. Blunt vertebral vascular injury in trauma patients: ATLS® recommendations and review of current evidence. *J Spine Surg*. juin 2017;3(2):217-25.
12. Breschet G. Anatomie, physiologie, chirurgie, art de l'anatomiste. Royal College of Physicians of Edinburgh: Paris : Mequignon-Marvis; 1819. 348 p.
13. Nathoo N, Caris EC, Wiener JA, Mendel E. History of the vertebral venous plexus and the significant contributions of Breschet and Batson. *Neurosurgery*. nov 2011;69(5):1007-14;

discussion 1014.

14. Mixter SJ, Osgood RB. IV. Traumatic Lesions of the Atlas and Axis. *Ann Surg.* févr 1910;51(2):193-207.
15. Lioté F, Bouchaud-Chabot A, Zadegan F. Diagnostiquer et suivre le rachis cervical rhumatoïde. *Revue du Rhumatisme monographies.* sept 2017;84(4):359-68.
16. Hinck VC, Hopkins CE. Measurement of the atlanto-dental interval in the adult. *Am J Roentgenol Radium Ther Nucl Med.* nov 1960;84:945-51.
17. Locke GR, Gardner JI, Van Epps EF. Atlas-dens interval (ADI) in children: a survey based on 200 normal cervical spines. *Am J Roentgenol Radium Ther Nucl Med.* mai 1966;97(1):135-40.
18. Wackenheim A, Wenger JJ. Variations in the height of the odontoid process. *Neuroradiology.* juin 1973;5(3):140-1.
19. Spence KF, Decker S, Sell KW. Bursting atlantal fracture associated with rupture of the transverse ligament. *J Bone Joint Surg Am.* avr 1970;52(3):543-9.
20. Cloché T, Vital J-M. Chirurgie des traumatismes récents du rachis cervical. *EMC - Techniques chirurgicales - Orthopédie-Traumatologie.* 19 juill 2016;11(3):1-28 [Article 44-176].
21. Nuñez DB, Quencer RM. The role of helical CT in the assessment of cervical spine injuries. *AJR Am J Roentgenol.* oct 1998;171(4):951-7.
22. Utz M, Khan S, O'Connor D, Meyers S. MDCT and MRI evaluation of cervical spine trauma. *Insights Imaging.* févr 2014;5(1):67-75.
23. Joaquim AF, Patel AA. Craniocervical traumatic injuries: evaluation and surgical decision making. *Glob Spine J.* déc 2011;1(1):37-42.
24. Dickman CA, Sonntag VK. Injuries involving the transverse atlantal ligament: classification and treatment guidelines based upon experience with 39 injuries. *Neurosurgery.* avr 1997;40(4):886-7.
25. Toussaint P, Desenclos C, Peltier J, Le Gars D. Transarticular atlanto-axial screw fixation for treatment of C1-C2 instability. *Neurochirurgie.* nov 2003;49(5):519-26.
26. Jefferson G. Fracture of the atlas vertebra. Report of four cases, and a review of those previously recorded. *Br J Surg.* 1919;7:407-22.
27. Kim HS, Cloney MB, Koski TR, Smith ZA, Dahdaleh NS. Management of Isolated Atlas Fractures: A Retrospective Study of 65 Patients. *World Neurosurg.* mars 2018;111:e316-22.

28. Anderson LD, D'Alonzo RT. Fractures of the odontoid process of the axis. *J Bone Joint Surg Am.* déc 1974;56(8):1663-74.
29. Greene KA, Dickman CA, Marciano FF, Drabier JB, Hadley MN, Sonntag VK. Acute axis fractures. Analysis of management and outcome in 340 consecutive cases. *Spine.* 15 août 1997;22(16):1843-52.
30. Roy-Camille R, Bleyne JF, Saillant G, Judet T. Odontoid process fractures associated with fractures of the pedicles of the axis (author's transl). *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot.* nov 1979;65(7):387-91.
31. Grauer JN, Shafi B, Hilibrand AS, Harrop JS, Kwon BK, Beiner JM, et al. Proposal of a modified, treatment-oriented classification of odontoid fractures. *Spine J Off J North Am Spine Soc.* avr 2005;5(2):123-9.
32. Effendi B, Roy D, Cornish B, Dussault RG, Laurin CA. Fractures of the ring of the axis. A classification based on the analysis of 131 cases. *J Bone Joint Surg Br.* 1981;63-B(3):319-27.
33. Ma L, Yang Y, Gong Q, Ding C, Liu H, Hong Y. Anterior Reduction, Discectomy, and Three Cortical Iliac Bone Grafting With Instrumentation to Treat A Huge Tear Drop Fracture of the Axis: A Case Report and Literature Review. *Medicine (Baltimore).* avr 2016;95(15):e3376.
34. Crockard HA, Heilman AE, Stevens JM. Progressive myelopathy secondary to odontoid fractures: clinical, radiological, and surgical features. *J Neurosurg.* avr 1993;78(4):579-86.
35. Jeszenszky DJ, Haschtmann D, Pröbstl O, Kleinstück FS, Heyde CE, Fekete TF. Tumors and metastases of the upper cervical spine (C0-2). A special challenge. *Orthopade.* sept 2013;42(9):746-54.
36. Ramos-Remus C, Gomez-Vargas A, Guzman-Guzman JL, Jimenez-Gil F, Gamez-Nava JI, Gonzalez-Lopez L, et al. Frequency of atlantoaxial subluxation and neurologic involvement in patients with ankylosing spondylitis. *J Rheumatol.* nov 1995;22(11):2120-5.
37. Quarta L, Corrado A, Melillo N, Trotta A, D'onofrio F, Maruotti N, et al. Cervical myelopathy caused by periodontoid synovial pannus in a patient with psoriatic arthritis: a case report. *Clin Rheumatol.* août 2007;26(8):1380-2.
38. Bénazet JP, Hamma A, Saillant G, Rakover JP, Roy-Camille R. Surgery of the upper cervical spine in rheumatoid arthritis. Indications and results apropos of 28 cases. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot.* 1996;82(8):681-90.
39. Godfrin-Valnet M, Godfrin G, Godard J, Prati C, Toussirot E, Michel F, et al. Eighteen cases of crowned dens syndrome: Presentation and diagnosis. *Neurochirurgie.* juin

2013;59(3):115-20.

40. Krishnan A, Patkar D, Patankar T, Shah J, Prasad S, Bunting T, et al. Craniovertebral junction tuberculosis: a review of 29 cases. *J Comput Assist Tomogr.* avr 2001;25(2):171-6.
41. Ould-Slimane M, Lenoir T, Dauzac C, Breitel D, Hoffmann E, Guigui P, et al. Odontoid process pathologic fracture in spinal tuberculosis. *Orthop Traumatol Surg Res.* févr 2010;96(1):80-4.
42. Chadha M, Agarwal A, Singh AP. Craniovertebral tuberculosis: a retrospective review of 13 cases managed conservatively. *Spine.* 1 juill 2007;32(15):1629-34.
43. La Francis ME. A chiropractic perspective on atlantoaxial instability in Down's syndrome. *J Manipulative Physiol Ther.* avr 1990;13(3):157-60.
44. Wackenheim A, Burguet JL, Sick H. Section of the odontoid process by a shortened transverse ligament (a possible etiology for the mobile odontoid). *Neuroradiology.* 1986;28(3):281-2.
45. Le Pape S, Gauthé R, Latrobe C, Leroux J, Roussignol X, Ould-Slimane M. Cervical myelopathy involving os odontoideum and retro-odontoid cyst treated with Harms C1-C2 arthrodesis. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2016;102(6):817-20.
46. Gallie WE. Skeletal traction in the treatment of fractures and dislocations of the cervical spine. *Ann Surg.* oct 1937;106(4):770-6.
47. Holness RO, Huestis WS, Howes WJ, Langille RA. Posterior stabilization with an interlaminar clamp in cervical injuries: technical note and review of the long term experience with the method. *Neurosurgery.* mars 1984;14(3):318-22.
48. Grob D, Magerl F. Surgical stabilization of C1 and C2 fractures. *Orthopade.* févr 1987;16(1):46-54.
49. Jeanneret B, Magerl F. Primary posterior fusion C1/2 in odontoid fractures: indications, technique, and results of transarticular screw fixation. *J Spinal Disord.* déc 1992;5(4):464-75.
50. Magerl F, Seeman P. Stable posterior fusion of the atlas and axis by transarticular screw fixation. In: *Cervical spine I.* Springer-Verlag; 1986. p. 322-7.
51. Goel A, Laheri V. Plate and screw fixation for atlanto-axial subluxation. *Acta Neurochir (Wien).* 1994;129(1-2):47-53.
52. Harms J, Melcher RP. Posterior C1-C2 fusion with polyaxial screw and rod fixation. *Spine.* 15 nov 2001;26(22):2467-71.
53. Roy-Camille R, Camus JP, Saillant G, Coulon JP, Soulas P. Atloaxoid dislocation with basilar pressure and spinal cord symptoms in rheumatoid arthritis. A case of occipitocervical

arthrodesis followed by resection of the odontoid. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot.* 1983;69(1):81-3.

54. Kamal Y, Ortho MS, Khan HA, Gani N, Haq AU, Gul S, et al. Atlas and axis injuries role of Halovest. *Int J Health Sci.* oct 2014;8(4):335-45.

55. Govender S, Maharaj JF, Haffajee MR. Fractures of the odontoid process. *J Bone Joint Surg Br.* nov 2000;82(8):1143-7.

56. Mummaneni PV, Haid RW. Atlantoaxial fixation: Overview of all techniques. *Neurol India.* 10 janv 2005;53(4):408.

57. Smith MD, Phillips WA, Hensinger RN. Complications of fusion to the upper cervical spine. *Spine.* juill 1991;16(7):702-5.

58. Coyne TJ, Fehlings MG, Wallace MC, Bernstein M, Tator CH. C1-C2 posterior cervical fusion: long-term evaluation of results and efficacy. *Neurosurgery.* oct 1995;37(4):688-92; discussion 692-693.

59. Dickman CA, Sonntag VK. Posterior C1-C2 transarticular screw fixation for atlantoaxial arthrodesis. *Neurosurgery.* août 1998;43(2):275-80; discussion 280-281.

60. Bourdillon P, Perrin G, Lucas F, Debarge R, Barrey C. C1-C2 stabilization by Harms arthrodesis: indications, technique, complications and outcomes in a prospective 26-case series. *Orthop Traumatol Surg Res OTSR.* avr 2014;100(2):221-7.

61. Garfin SR, Botte MJ, Waters RL, Nickel VL. Complications in the use of the halo fixation device. *J Bone Joint Surg Am.* mars 1986;68(3):320-5.

62. Tashjian RZ, Majercik S, Biffi WL, Palumbo MA, Cioffi WG. Halo-vest immobilization increases early morbidity and mortality in elderly odontoid fractures. *J Trauma.* janv 2006;60(1):199-203.

63. Min L, Song Y, Xie X, Wang C, Liu L. Misdiagnosis and management of iatrogenic pseudoaneurysm of vertebral artery after Harms technique of C₁-C₂ fixation. *Chin J Traumatol.* 2012;15(6):355-9.

64. Meyers JE, Vakharia K, Kowalski JM, Dimopoulos VG, Pollina J. Steinmann Pins for C1 Lateral Mass Screw Placement During Atlantoaxial Stabilization. *World Neurosurg.* déc 2017;108:560-5.

65. Dewan MC, Godil SS, Mendenhall SK, Devin CJ, McGirt MJ. C2 nerve root transection during C1 lateral mass screw fixation: does it affect functionality and quality of life? *Neurosurgery.* mai 2014;74(5):475-80; discussion 480-481.

66. Kang MM, Anderer EG, Elliott RE, Kalhorn SP, Frempong-Boadu A. C2 nerve root

- sectioning in posterior C1-2 instrumented fusions. *World Neurosurg.* juill 2012;78(1-2):170-7.
67. Gautschi OP, Payer M, Corniola MV, Smoll NR, Schaller K, Tessitore E. Clinically relevant complications related to posterior atlanto-axial fixation in atlanto-axial instability and their management. *Clin Neurol Neurosurg.* août 2014;123:131-5.
68. Le Pape S, Gauthe R, Latrobe C, Cantogrel P, Proust F, Leroux J, et al. Are C2 pedicles always screwable? Calibration and planning with a pedicle-lamina angle. *Neurochirurgie.* août 2016;62(4):209-12.
69. Yukawa Y, Kato F, Yoshihara H, Yanase M, Ito K. Cervical pedicle screw fixation in 100 cases of unstable cervical injuries: pedicle axis views obtained using fluoroscopy. *J Neurosurg Spine.* déc 2006;5(6):488-93.
70. Merloz P, Troccaz J, Vouaillat H, Vasile C, Tonetti J, Eid A, et al. Fluoroscopy-based navigation system in spine surgery. *Proc Inst Mech Eng [H].* oct 2007;221(7):813-20.
71. Merloz P, Tonetti J, Pittet L, Coulomb M, Lavallée S, Sautot P. Pedicle screw placement using image guided techniques. *Clin Orthop.* sept 1998;(354):39-48.
72. Lavallée S, Sautot P, Troccaz J, Cinquin P, Merloz P. Computer-assisted spine surgery: a technique for accurate transpedicular screw fixation using CT data and a 3-D optical localizer. *J Image Guid Surg.* 1995;1(1):65-73.
73. Holly LT, Foley KT. Intraoperative spinal navigation. *Spine.* 1 août 2003;28(15 Suppl):S54-61.
74. Kendoff D, Ortega G, Citak M, Citak M, Hüfner T, Krettek C, et al. Limitations and pitfalls of 3-D fluoroscopic navigation in orthopaedic trauma surgery. *Technol Health Care Off J Eur Soc Eng Med.* 2009;17(2):133-40.
75. Siewerdsen JH. Cone-Beam CT with a Flat-Panel Detector: From Image Science to Image-Guided Surgery. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect Accel Spectrometers Detect Assoc Equip.* 21 août 2011;648(S1):S241-50.
76. Van de Kelft E, Costa F, Van der Planken D, Schils F. A prospective multicenter registry on the accuracy of pedicle screw placement in the thoracic, lumbar, and sacral levels with the use of the O-arm imaging system and StealthStation Navigation. *Spine.* déc 2012;37(25):E1580-1587.
77. Shevelev IN, Konovalov NA, Starchenko VM, Cherkashov AM, Sharamko TG, Nazarenko AG, et al. Experience of using an intraoperative cone beam computed tomography scanner and the modern navigation system in surgical treatment of spine and spinal cord disorders. *Zh Vopr Neurokhir Im N N Burdenko.* 2014;78(3):21-9.

78. Elliott RE, Tanweer O, Boah A, Morsi A, Ma T, Frempong-Boadu A, et al. Outcome Comparison of Atlantoaxial Fusion With Transarticular Screws and Screw-Rod Constructs: Meta-Analysis and Review of Literature. *Clin Spine Surg.* févr 2014;27(1):11.
79. Papagelopoulos PJ, Currier BL, Hokari Y, Neale PG, Zhao C, Berglund LJ, et al. Biomechanical comparison of C1-C2 posterior arthrodesis techniques. *Spine.* 1 juin 2007;32(13):E363-370.
80. Hitti. Intraoperative Navigation Is Associated with Reduced Blood Loss During C1–C2 Posterior Cervical Fixation. *World Neurosurg.* 1 nov 2017;107:574-8.
81. Patil S, Lindley EM, Burger EL, Yoshihara H, Patel VV. Pedicle screw placement with O-arm and stealth navigation. *Orthopedics.* 16 janv 2012;35(1):e61-65.
82. Ishak B, Schneider T, Tubbs RS, Gimmy V, Younsi A, Unterberg AW, et al. Modified Posterior C1 Lateral Mass Screw Insertion for Type II Odontoid Process Fractures Using Intraoperative Computed Tomography-Based Spinal Navigation to Minimize Postoperative Occipital Neuralgia. *World Neurosurg.* nov 2017;107:194-201.
83. Bourdillon P, Perrin G, Barrey C. Stabilisation C1-C2 selon la technique de Harms : indications, aspects techniques, résultats cliniques et radiologiques à travers une série de 22 cas. *Neurochirurgie.* 1 déc 2012;58(6):439.
84. Mayr E, de la Barrera J-LM, Eller G, Bach C, Nogler M. The effect of fixation and location on the stability of the markers in navigated total hip arthroplasty: a cadaver study. *J Bone Joint Surg Br.* févr 2006;88(2):168-72.
85. Sugawara T, Higashiyama N, Kaneyama S, Sumi M. Accurate and Simple Screw Insertion Procedure With Patient-Specific Screw Guide Templates for Posterior C1-C2 Fixation. *Spine.* 15 mars 2017;42(6):E340-6.

L'utilisation de la navigation 3D per opératoire dans les arthrodèses C1-C2 type Harms

Résumé

Plusieurs types d'instabilité atlanto-axoïdienne peuvent justifier une fixation chirurgicale. L'arthrodèse instrumentée par vissage des masses latérales de C1 et des isthmes de C2 décrite par Harms est une technique exigeante mais qui permet une stabilisation pérenne. Elle est associée à des complications nerveuses ou vasculaires liées à la configuration des rapports anatomiques locaux. Les technologies de navigation per opératoire permettent d'améliorer la précision technique. Cette série présente 11 cas d'arthrodèse C1C2 type Harms réalisées sous navigation et contrôle peropératoire 3D. Toutes les procédures ont pu être menées à leur terme avec une disposition adéquate des implants. Aucun événement indésirable propre à l'arthrodèse n'est survenu dans la période péri-opératoire. Aucune effraction corticale n'a été constatée sur le contrôle tomodensitométrie cone beam (O-Arm[®]) réalisé en fin d'intervention. Les difficultés techniques et les risques des arthrodèses C1C2 type Harms conduisent à utiliser les contrôles d'imagerie 3D per opératoires lorsqu'ils sont disponibles.

Abstract

Several types of atlanto-axial instability may justify surgical fixation. Arthrodesis instrumented by screwing lateral masses of C1 and isthmus of C2 described by Harms is a demanding technique, but which permits a sustainable stabilization. It is associated with nervous or vascular complications related to the configuration of local anatomical relationships. Per-operative navigation technologies improve technical accuracy. This series presents 11 cases of arthrodesis C1C2 using the Harms technique realized under navigation and intraoperative 3D control. All procedures were completed with an adequate layout of the implants. No adverse events specific to arthrodesis occurred during the perioperative period. No cortical fracture was observed on the cone beam O-Arm[®] CT scan performed at the end of surgery. Technical difficulties and risks of C1C2 arthrodesis according to Harms technique lead to the use of intraoperative 3D imaging controls when available.

Mots clés : Imagerie tridimensionnelle ; Tomodensitométrie ; Arthrodèse cervicale ; Rachis ; Navigation