



HAL
open science

Évaluation de la séquence MP2RAGE à 7 Tesla pour la détection des lésions de sclérose en plaques médullaires cervicales

Noëline Fabiani

► **To cite this version:**

Noëline Fabiani. Évaluation de la séquence MP2RAGE à 7 Tesla pour la détection des lésions de sclérose en plaques médullaires cervicales. Sciences du Vivant [q-bio]. 2022. dumas-03827002

HAL Id: dumas-03827002

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03827002v1>

Submitted on 24 Oct 2022

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.

**Évaluation de la séquence MP2RAGE à 7 Tesla pour la détection des
lésions de sclérose en plaques médullaires cervicales.**

THÈSE

Présentée et publiquement soutenue devant

LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE MARSEILLE

Le 5 Octobre 2022

Par Madame Noëline FABIANI

Née le 21 Décembre 1993 à Bastia (2B)

Pour obtenir le grade de Docteur en Médecine

D.E.S. de RADIODIAGNOSTIC ET IMAGERIE MÉDICALE

Membres du Jury de la Thèse :

Madame le Professeur GIRARD Nadine	Président
Monsieur le Dr Maarouf ADIL	Assesseur
Monsieur le Docteur (MCU-PH) STELLMANN Jan-Patrick	Assesseur
Monsieur le Docteur TESTUD Benoit	Assesseur

FACULTÉ DES SCIENCES MÉDICALES & PARAMÉDICALES

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

Asseseurs :

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

Chargés de mission :

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

ÉCOLE DE MEDECINE

Directeur	:	Pr. Jean-Michel VITON
------------------	---	------------------------------

Chargés de mission

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

ÉCOLE DE DE MAIEUTIQUE

Directrice : **Madame Carole ZAKARIAN**

Chargés de mission

- 1^{er} cycle : Madame Estelle BOISSIER
- 2^{ème} cycle : Madame Cécile NINA

ÉCOLE DES SCIENCES DE LA RÉADAPTATION

Directeur : **Monsieur Philippe SAUVAGEON**

Chargés de mission

- Masso- kinésithérapie 1^{er} cycle : Madame Béatrice CAORS
- Masso-kinésithérapie 2^{ème} cycle : Madame Joannie HENRY
- Mutualisation des enseignements : Madame Géraldine DEPRES

ÉCOLE DES SCIENCES INFIRMIERES

Directeur : **Monsieur Sébastien COLSON**

Chargés de mission

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

PROFESSEURS HONORAIRES

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

PROFESSEURS HONORAIRES

DELPERO Jean-Robert
DESSEIN Alain
DELARQUE Alain

MALMEJAC Claude
MARANINCHI Dominique
MARTIN Claude

PROFESSEURS HONORAIRES

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

EMERITAT

2008

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

2009

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

2010

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

2011

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

2012

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

2013

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

2014

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

2015

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

EMERITAT

2016

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

2017

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

2018

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

2019

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

2020

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

EMERITAT

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

2021

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

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

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

2007

M. le Professeur

S. KAUFMANN (Allemagne)

PROFESSEURS DES UNIVERSITES-PRATICIENS HOSPITALIERS

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

PROFESSEURS DES UNIVERSITES-PRATICIENS HOSPITALIERS

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

PROFESSEURS DES UNIVERSITES-PRATICIENS HOSPITALIERS

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

PROFESSEUR DES UNIVERSITES

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

PROFESSEUR CERTIFIE

FRAISSE-MANGIALOMINI Jeanne

PROFESSEUR DES UNIVERSITES ASSOCIE à MI-TEMPS

REVIS Joana

PROFESSEUR DES UNIVERSITES MEDECINE GENERALE

GENTILE Gaëtan

PROFESSEUR DES UNIVERSITES ASSOCIE à TEMPS PLEIN DES DISCIPLINES MEDICALES

BOUSSUGES Alain

PROFESSEUR DES UNIVERSITES ASSOCIE à MI-TEMPS DES DISCIPLINES MEDICALES

DUTAU Hervé

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES-PRATICIENS HOSPITALIERS

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

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

(mono-appartenants)

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

MAITRE DE CONFERENCES DES UNIVERSITES DE MEDECINE GENERALE

CASANOVA Ludovic

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

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

MAITRE DE CONFERENCES ASSOCIE à MI-TEMPS

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

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

ANATOMIE 4201

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

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

THOLLON Lionel (MCF) (60ème section)

ANATOMIE ET CYTOLOGIE PATHOLOGIQUES 4203

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

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

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

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

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

ANGLAIS 11

FRAISSE-MANGIALOMINI Jeanne (PRCE)

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

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

ANTHROPOLOGIE 20

ADALIAN Pascal (PR)

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

BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE ; HYGIENE HOSPITALIERE 4501

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

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

CHABRIERE Eric (PR) (64ème section)

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

BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE 4401

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

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

BIOLOGIE CELLULAIRE 4403

ROLL Patrice (PU-PH)

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

BIOPHYSIQUE ET MEDECINE NUCLEAIRE 4301

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

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

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

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

**BIostatistiques, Informatique Médicale
ET TECHNOLOGIES DE COMMUNICATION 4604**

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

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

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

CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE ET TRAUMATOLOGIQUE 5002

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

CANCEROLOGIE ; RADIOTHERAPIE 4702

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

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

CARDIOLOGIE 5102

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

DEHARO Pierre (MCU PH)

CHIRURGIE VISCERALE ET DIGESTIVE 5202

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

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

CHIRURGIE INFANTILE 5402

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

DARIEL Anne (MCU-PH)

CHIRURGIE MAXILLO-FACIALE ET STOMATOLOGIE 5503

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

FOLETTI Jean-Marc (MCU-PH)

CHIRURGIE THORACIQUE ET CARDIOVASCULAIRE 5103

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

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

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

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

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

CHIRURGIE VASCULAIRE ; MEDECINE VASCULAIRE 5104

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

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

GASTROENTEROLOGIE ; HEPATOLOGIE ; ADDICTOLOGIE 5201

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

HISTOLOGIE, EMBRYOLOGIE ET CYTOGENETIQUE 4202

LEPIDI Hubert (PU-PH)

PAULMYER/LACROIX Odile (MCU-PH)

GONZALEZ Jean-Michel (MCU-PH)

GENETIQUE 4704**DERMATOLOGIE - VENEREOLOGIE 5003**

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

BEROUD Christophe (PU-PH)
KRAHN Martin (PU-PH)
LEVY Nicolas (PU-PH)
NGYUEN Karine (PU-PH)

ZATTARA/CANNONI Hélène (MCU-PH)

DUSI

COLSON Sébastien (MCF)

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

GYNECOLOGIE-OBSTETRIQUE ; GYNECOLOGIE MEDICALE 5403

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

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

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

CUNY Thomas (MCU PH)

EPIDEMIOLOGIE, ECONOMIE DE LA SANTE ET PREVENTION

4601

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

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

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

IMMUNOLOGIE 4703I

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

FERON François (PR) (69ème section)

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

MALADIES INFECTIEUSES ; MALADIES TROPICALES 4503

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

ELDIN Carole (MCU-PH)

MEDECINE D'URGENCE 4805

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

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

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

HEMATOLOGIE ; TRANSFUSION 4701

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

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

POGGI Marjorie (MCF) (64ème section)

MEDECINE LEGALE ET DROIT DE LA SANTE 4603

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

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

BERLAND Caroline (MCF) (1ère section)

MEDECINE PHYSIQUE ET DE READAPTATION 4905

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

MEDECINE ET SANTE AU TRAVAIL 4602

LEHUCHER/MICHEL Marie-Pascale (PU-PH)

SARI/MINODIER Irène (MCU-PH)

MEDECINE GENERALE 5303

GENTILE Gaëtan (PR Méd. Gén. Temps plein)

CASANOVA Ludovic (MCF Méd. Gén. Temps plein)

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

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

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

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

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

ROUSSEAU-DURAND Raphaëlle

(MCF associé Méd. Gén. À mi-temps)

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

(nomination au 1/10/2019)

NUTRITION 4404

BELIARD Sophie (PU-PH)

DARMON Patrice (PU-PH)

RACCAH Denis (PU-PH)

VALERO René (PU-PH)

ATLAN Catherine (MCU-PH) disponibilité

MARANINCHI Marie (MCF) (66ème section)

ONCOLOGIE 65 (BIOLOGIE CELLULAIRE)

CHABANNON Christian (PR) (66ème section)

SOBOL Hagay (PR) (65ème section)

OPHTALMOLOGIE 5502

DAVID Thierry (PU-PH)

DENIS Danièle (PU-PH)

OTO-RHINO-LARYNGOLOGIE 5501

DESSI Patrick (PU-PH)

FAKHRY Nicolas (PU-PH)

GIOVANNI Antoine (PU-PH)

LAVIEILLE Jean-Pierre (PU-PH)

MICHEL Justin (PU-PH)

NICOLLAS Richard (PU-PH)

TRIGLIA Jean-Michel (PU-PH) Surnombre

RADULESCO Thomas (MCU-PH)

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

NEPHROLOGIE 5203

BRUNET Philippe (PU-PH)

BURTEY Stéphanne (PU-PH)

DUSSOL Bertrand (PU-PH)

JOURDE CHICHE Noémie (PU PH)

MOAL Valérie (PU-PH)

ROBERT Thomas (MCU-PH)

NEUROCHIRURGIE 4902

DUFOUR Henry (PU-PH)

FUENTES Stéphane (PU-PH)

REGIS Jean (PU-PH)

ROCHE Pierre-Hugues (PU-PH)

SCAVARDA Didier (PU-PH)

CARRON Romain (MCU PH)

GRAILLON Thomas (MCU PH)

TROUDE Lucas (MCU-PH)

NEUROLOGIE 4901

ATTARIAN Sharham (PU PH)

AUDOIN Bertrand (PU-PH)

AZULAY Jean-Philippe (PU-PH)

CECCALDI Mathieu (PU-PH)

EUSEBIO Alexandre (PU-PH)

FELICIAN Olivier (PU-PH)

PELLETIER Jean (PU-PH)

SUISSA Laurent (PU-PH)

MAAROUF Adil (MCU-PH)

PEDOPSYCHIATRIE; ADDICTOLOGIE 4904

DA FONSECA David (PU-PH)

POINSO François (PU-PH)

GUIVARCH Jokthan (MCU-PH)

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

BLIN Olivier (PU-PH)

MICALLEF/ROLL Joëlle (PU-PH)

SIMON Nicolas (PU-PH)

BOULAMERY Audrey (MCU-PH)

RANQUE Stéphane (PU-PH)

LE COZ Pierre (PR) (17ème section)

CASSAGNE Carole (MCU-PH)

MATHIEU Marion (MAST)

L'OLLIVIER Coralie (MCU-PH)

TOGA Isabelle (MCU-PH)

PEDIATRIE 5401

ANDRE Nicolas (PU-PH)

BARLOGIS Vincent (PU-PH)

CHAMBOST Hervé (PU-PH)

DUBUS Jean-Christophe (PU-PH)

FABRE Alexandre (PU-PH)

GIRAUD/CHABROL Brigitte (PU-PH)

MICHEL Gérard (PU-PH)

MILH Mathieu (PU-PH)

OVAERT-REGGIO Caroline (PU-PH)

REYNAUD Rachel (PU-PH)

TOSELLO Barthélémy (PU-PH)

TSIMARATOS Michel (PU-PH)

COZE Carole (MCU-PH)

PHYSIOLOGIE 4402

BARTOLOMEI Fabrice (PU-PH)

BREGEON Fabienne (PU-PH)

GABORIT Bénédicte (PU-PH)

MEYER/DUTOUR Anne (PU-PH)

TREBUCHON/DA FONSECA Agnès (PU-PH)

BOUSSUGES Alain (PR associé à temps plein)

BONINI Francesca (MCU-PH)

BOULLU/CIOCCA Sandrine (MCU-PH)

DADOUN Frédéric (MCU-PH) (disponibilité)

DELLIAUX Stéphane (MCU-PH)

LAGARDE Stanislas (MCU-PH)

LAMBERT Isabelle (MCU-PH)

RUEL Jérôme (MCF) (69ème section)

THIRION Sylvie (MCF) (66ème section)

PSYCHIATRIE D'ADULTES ; ADDICTOLOGIE 4903

BAILLY Daniel (PU-PH)

LANCON Christophe (PU-PH)

NAUDIN Jean (PU-PH)

RICHERI Raphaëlle (PU-PH)

CERMOLACCE Michel (MCU-PH)

PNEUMOLOGIE; ADDICTOLOGIE 5101

ASTOUL Philippe (PU-PH)

BARLESI Fabrice (PU-PH)

CHANEZ Pascal (PU-PH)

GREILLIER Laurent (PU PH)

REYNAUD/GAUBERT Martine (PU-PH)

PSYCHOLOGIE - PSYCHOLOGIE CLINIQUE, PSYCHOLOGIE SOCIALE

AGHABABIAN Valérie (PR)

LAZZAROTTO Sébastien (MAST)

TOMASINI Pascale (MCU-PH)

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

RADIOLOGIE ET IMAGERIE MEDICALE 4302

BARTOLI Jean-Michel (PU-PH)

CHAGNAUD Christophe (PU-PH)

CHAUMOITRE Kathia (PU-PH)

GIRARD Nadine (PU-PH)

JACQUIER Alexis (PU-PH)

MOULIN Guy (PU-PH)

PANUEL Michel (PU-PH) surnombre

PETIT Philippe (PU-PH)

VAROQUAUX Arthur Damien (PU-PH)

VIDAL Vincent (PU-PH)

STELLMANN Jan-Patrick (MCU-PH)

RHUMATOLOGIE 5001

GUIS Sandrine (PU-PH)

LAFFORGUE Pierre (PU-PH)

PHAM Thao (PU-PH)

ROUDIER Jean (PU-PH)

THERAPEUTIQUE; MEDECINE D'URGENCE; ADDICTOLOGIE 4804

AMBROSI Pierre (PU-PH)

DAUMAS Aurélie (PU-PH)

VILLANI Patrick (PU-PH)

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

HRAIECH Sami (MCU-PH)

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

Remerciements

Mme Nadine Girard, merci d'accepter d'évaluer ce travail et de présider ce jury de thèse.

Je tiens également à vous remercier pour vos enseignements lors de mon stage d'interne en neuroradiologie.

Soyez assurée de ma reconnaissance et de mon profond respect.

Dr Jan-Patrick Stellman, merci pour votre aide précieuse à l'élaboration de ce travail.

Dr Adil Maarouf, merci pour votre participation qui agrmente ce travail du regard du neurologue clinicien.

Dr Sarah Demortière, merci pour votre disponibilité et vos précieux conseils lors de nos rencontres.

Dr Virginie Callot, merci pour votre aide tout au long de l'élaboration de ce travail.

Benoit, merci pour ta grande disponibilité et ta détermination à mener à bien ce projet.

Tu es une personne brillante et je suis heureuse d'avoir eu l'occasion de réaliser ce travail de thèse à tes côtés.

J'espère avoir su me montrer à la hauteur de la confiance que tu m'accordes ici.

Maman,

Les mots ne sont pas assez forts pour dire ma gratitude et mon amour pour toi.

Tu es l'amour, la gentillesse, la bienveillance même.

Merci pour toutes les nuits écourtées, pour toutes les larmes essuyées et pour chaque moment de partage.

Je t'aime.

Papa,

Ce travail t'est dédié.

Merci d'avoir été un modèle de ténacité et d'endurance.

Ton parcours de vie m'a montré l'importance d'être fidèle à soi-même et d'écouter ce que dit le cœur, quoi qu'il en coûte.

Je t'aime, protège-moi de là-haut s'il te plaît.

Pauline,

Ma sœur et compagne de jeux d'enfance.

Je suis tellement fière de l'intelligente et pétillante jeune femme que tu es devenue.

Sois certaine de mon affection profonde.

Cathy, Élisabeth et Gilles,

Merci pour l'affection et les beignets au brocciu.

À tous les membres de ma famille tant de l'Île de Corse que de Lorraine.

Nos différends comme l'affection que nous nous portons nous construisent.

Tagliami mani è pedi è lampami frà i mei.

Lorène,

Ma Lorène, merci d'être toujours là pour partager ce qui me fait rire et pour tout le reste. Nous ne sommes pas de vraies blondes, nous avons un karma amoureux désastreux (17 000 individus seulement ...) et sommes incapables de choisir rapidement un bar ou un restaurant.

Mais qu'est-ce qu'on est bien ensemble ! La distance n'a pas su entamer notre amitié et je pense que c'est à cela qu'on en mesure l'importance et la valeur.

Merci d'être toi mon amie.

Romain, Sam et Carlyne,

Aux galériens, aux voyages en avion, aux hôtels et aux restaurants.

À toutes ses soirées autour d'un verre de blanc.

À cette amitié que des semaines, parfois des mois d'éloignement n'altère pas.

Enfin, à tous les projets à venir.

Les internes en herbe,

Alexandra, merci pour ton écoute et ta gentillesse.

Tu es une amie précieuse et chère à mes yeux et tu feras une merveilleuse mère j'en suis certaine.

Raphaël, merci de prendre soin de mon amie et d'en faire une femme comblée.

Merci également d'élargir ma culture par tes nombreuses références cinématographiques !

Cédric, merci pour ta bonne humeur et ton légendaire sourire.

Merci également pour les découvertes gastronomiques du quotidien sur les réseaux.

Je t'attends un matin pour manger quelques viennoiseries aixoises.

Jean-François, merci d'avoir été si souvent à mes côtés pendant cet internat (Et de m'avoir si souvent véhiculée ! Je souhaite à ta voiture un futur repos paisible au paradis automobile d'ailleurs).

Merci de supporter mes messages contenant généralement mes coups de gueule et étant généralement envoyés à des heures assez tardives.

Nous avons beaucoup en commun et plus qu'un collègue, je me suis fait un ami.

Ana, merci d'être à ses côtés.

Merci également de tolérer mon humour souvent bizarre.

Éléna, tu es une personne intelligente, belle et au bon cœur (Tu ne voudras pas me croire, mais tu devrais), je tenais à ce que ce soit dit.

Coralie, petit bout de femme toujours un peu en retard (Et jamais très bien garée) !

Peut-être qu'un jour tu finiras par en savoir plus sur ma mystérieuse vie sentimentale, qui sait.

Ingrid, Sofia, Anna, Vincent et Moustapha, au plaisir d'un prochain verre à vos côtés.

La radiologie marseillaise,

Merci aux équipes des Pr K. Chaumoître, Pr A. Jacquier, Pr V. Vidal, Pr P. Petit, Pr N. Girard et enfin du Pr Chagnaud pour leurs enseignements.

De l'humour toujours incisif de Guillaume Louis, aux sujets de conversations passionnants d'Arthur Varoquaux, aux petits surnoms si bien trouvés de Stéphanie Coze en passant par le sourire communicatif d'Alexia Dabadie, merci d'avoir ponctué mon internat de souvenirs impérissables et d'enseignements.

Je remercie tout particulièrement et chaleureusement les chefs de clinique et assistants pour leur présence au quotidien.

Je promets d'arrêter de me confondre en excuses quand je vous demande de l'aide ou un avis.

À mes chers co-internes ...

Arnaud, je peux tout dire à ton propos en disant que j'adore que tu m'agaces.

Nous différons sur à peu près tout dans la vie mais je pense justement que c'est ce qui fait la richesse de notre amitié.

Pense à ta fistule qui fragilise, limite la dialyse.

Mélanie, nous sommes également très différentes mais j'ai beaucoup de plaisir à travailler avec toi, merci pour ton aide lors de nos premiers pas d'internes (Crois en toi un peu plus, s'il te plaît).

Baptiste, liés à jamais par une paire de crocs d'un rose indescriptible – Prends en bien soin (Je n'aime pas les voir tachées, tu le sais).

Benjamin, notre business man, référent « Paperasse » et père de famille !

Pense à ton cœur, limite le burger.

Hector, sans doute la plus belle chevelure de cette promotion (Et je valide, il faut que tu articules plus).

Louis, Antoine et Mohamed, que je regrette de ne pas avoir eu l'occasion de partager un choix de stage avec vous pendant cet internat.

Aux « Premiers socles », Christelle, Laurent (Liés que nous sommes par notre incapacité à conduire un véhicule), Siv', Blandine, Julien, Antoine et Léa, merci. Kwatar (Si terrifiante au téléphone mais si gentille au fond), Farah (Merci de toujours accepter de bon cœur de m'aider), Idir (En baaaaambe BB !), Mathias (La quintessence du flegme), Thomas (Les cacahouètes me font penser à toi et trembler pour ta vie), PYI, Margaux, Quentin et Ahmed (La haine de notre prochain en commun), merci pour votre aide à mes débuts (Souvent hésitants ...).

Alexis (Le patron de l'internat) et Judith (La force pas si tranquille), j'espère avoir pu vous transmettre un peu de mon savoir lors de vos premiers pas au CHU.

Antoine, Jean, Ahmed, Charlène, Paul, Zaccharie et Mathieu, merci d'avoir été à mes côtés pour m'aider à traverser une période si difficile de ma vie.

Paul et Zaccharie, merci d'avoir su me faire rire même quand le cœur n'y était pas.

Vous êtes adorables et j'espère avoir encore le plaisir de travailler avec vous.

Antoine (Dit AMC), merci d'avoir une voix si apaisante ... Je me sens toujours un peu coupable d'être agacée ou en colère quand tu es dans les parages tant tu inspires la sagesse ! Profite bien de ta disponibilité et de tes voyages.

Thibault Agrip', toujours plus de muscles et de neurones - J'ai adoré travailler avec toi, merci de tolérer mon humour toi aussi.

Je reste très peinée de savoir que ton daltonisme t'empêche de voir les couleurs éclatantes de mes tenues.

Badr, mon Dieu que toi et Arnaud avez pu me faire rigoler !
Ton accent est l'un de mes préférés, ne change pas.

Oinis, quel plaisir de pouvoir discuter de tout (Vraiment de tout ...) avec toi.
Jean-Philippe, malgré un zodiaque très douteux et une capacité incommensurable à me faire sortir de mes gonds, j'ai beaucoup aimé travailler à tes côtés.
Ma tête à cogner préférée me manque.

Rayid, toi qui occupes toujours la console que je souhaite récupérer lors de mes gardes, merci pour ta bonne humeur !

Un merci tout particulier à Marine et Florian, mes gastro-entérologues préférés.
Marine, merci pour ta gentillesse, ta bonne humeur et ton entrain – Avec toi, faire des échographies aux enfants geignards devenait un plaisir.
Florian, ton accent du sud chantant restera dans ma mémoire (De même que les trognons de pomme dans ta voiture).

La radiologie d'ailleurs,

Merci aux radiologues du service d'imagerie CH d'Hyères-les-Palmiers (L'incomparable JPB, Yann, Pierre, Marjorie, Djamel et Teodor).

Jean-Philippe, j'ai pour vous une grande estime, tant du point de vue professionnel qu'humain.

Je suis chanceuse d'avoir pu croiser votre route, prenez bien soin de votre santé.
(Et je vous le promets, nous irons voir Taylor Swift !).

Je tiens également à remercier chaleureusement les manipulateurs et les secrétaires de ce service.

Je ne vais pas vous lister mais chacun de vous, à sa manière, a su faire en sorte que ce choix soit l'un des plus agréables de mon internat.

Je resterai votre dévouée Boutinette.

Au plaisir de vous revoir un de ces jours.

Merci aux radiologues du CH d'Aix-en-Provence pour votre accueil chaleureux et pour votre confiance, je suis heureuse de poursuivre cette aventure pour ce choix d'hiver à vos côtés.

Merci à chacun d'entre vous de m'avoir permis de finaliser ce travail de thèse dans de bonnes conditions.

Merci Mohammed pour le café à profusion (Arrête de l'aromatiser avec de la lavande par pitié) et les jolies photos du bord de mer.

Merci à toi Robin (Alias Rockin' Robin) pour ton aide et ta bonne humeur cette été (Vive la cassolette de moules et les très grandes cavités pleurales).

Les « Amis d'avant » mais que le cœur n'oublie pas ...

Manon et Morgane - Mes chères amies du lycée.

Je suis souvent désolée que la vie ait choisi de nous séparer.

Vous avez beaucoup fait pour moi, je vous souhaite une vie heureuse.

J'ai une pensée également pour vos deux frères et vos parents que j'embrasse chaleureusement.

Marie-Ève, Amine, Christopher et Sarah ! Que de belles soirées passées à vos côtés.

Marie-Ève, mon petit panda ... Il faut impérativement que je me décide à venir te rendre visite !

Sarah, ta compagnie et ta gastronomie me manquent ... J'espère vite te voir.

Christopher, ta douce folie me manque aussi ! J'espère toujours un peu te croiser le dimanche matin vers 11h au super marché.

Amine, c'est toujours un plaisir de converser avec toi, tu sais tant de choses !

Je vous souhaite le meilleur et espère vous voir très vite.

Les patients ...

Merci pour votre confiance et le partage de vos histoires.

Merci de m'avoir fait rire, pleurer et réfléchir.

Ces années de travail sont à votre service.

Et enfin ... Bravo à toi Noëline.

Per chì ne sà prufittà, e disgrazie ne imparanu ancu più chè a fortuna.

Table des matières

PARTIE 1- Thèse article – Version française

ABREVIATIONS	3
RÉSUMÉ	5
INTRODUCTION	6
MATERIELS ET METHODES	8
• Population	8
• Acquisition des images	8
• Détection des lésions et cotation	10
• Statistiques	11
RÉSULTATS	12
• Population	12
• Caractéristiques des lésions et confiance	12
DISCUSSION	15
REMERCIEMENTS	19
FINANCEMENTS	19
REFERENCES	19
FIGURES ET TABLEAUX	21
MATERIEL ADDITIONNEL	25

PARTIE 2- Original research

ABSTRACT	27
INTRODUCTION	28
MATERIALS AND METHODS	30
• Population	30
• Image acquisition	30
• Lesion detection and scoring	32
• Statistics	32
RESULTS	33
• Population	33
• Features of lesions and confidence	33
DISCUSSION	37
ACKNOWLEDGEMENTS	40
FUNDINGS	40
REFERENCES	40
FIGURES AND TABLES	42
ADDITIONAL MATERIAL	46

ABREVIATIONS (Françaises et anglaises)

3T : 3 Tesla

7T : 7 Tesla

CNR : Contrast to noise ratio (Rapport contraste sur bruit)

EDESS : Expanded Disability Status Scale

IRM : Imagerie par résonance magnétique

LCR : Liquide céphalo-rachidien

MAGNIMS : Magnetic Resonance Imaging in Multiple Sclerosis

MP2RAGE : Magnetization Prepared 2 Rapid Acquisition Gradient Echo

MS : Multiple sclerosis

SEP : Sclérose en plaque

SNR : Signal to noise ratio (Rapport signal sur bruit)

STIR : Short Tau Inversion-Recuperation

WI : Weighted imaging (*Imagerie pondérée*)

PARTIE 1 - Thèse article – Version française

Résumé

Contexte et objectif

La détection des lésions de la moelle épinière chez les patients atteints de sclérose en plaques est difficile en utilisant les séquences recommandées par le consensus MAGNIMS. La séquence 3D-MP2RAGE a démontré son utilité à 3T pour la détection de ce type de lésion.

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'apport de la séquence 3D-MP2RAGE acquise à 7T pour la détection des lésions de sclérose en plaques dans la moelle cervicale.

Matériaux et méthodes

Dix-neuf patients atteints de SEP ont subi un examen d'imagerie par IRM de la moelle épinière cervicale comprenant le protocole de MAGNIMS avec des images axiales pondérées T2*, la séquence 3D-MP2RAGE isotrope 3T et les séquences isotrope et anisotrope 3D-MP2RAGE à 7T.

Chaque ensemble de données a été lu indépendamment par deux radiologues.

Le consensus a été fait avec un troisième évaluateur. Le nombre de lésions, leur topographie et le degré de confiance ont été analysés.

Résultats

La séquence 3D-MP2RAGE à résolution isotrope à 7 Tesla manquait pour quatre patients.

Pour N = 15, 44 lésions ont été détectées avec l'ensemble des séquences de MAGNIMS optimisé, 40 avec la séquence 3D-MP2RAGE 3T, 52 avec la séquence 3D-MP2RAGE 7T à résolution isotrope et 50 avec la séquence 3D-MP2RAGE 7T à résolution anisotrope.

Le taux le plus faible de lésions notées douteuses a été observé avec la séquence 3D-MP2RAGE 7T (15,5 % pour le deuxième évaluateur sur la séquence isotrope et 25,9 % pour le premier évaluateur sur la séquence anisotrope).

Conclusion

Les séquences 3D-MP2RAGE à 7T ont détecté plus de lésions que tous les autres ensembles avec une confiance élevée pour les deux évaluateurs.

La séquence 3D-MP2RAGE 3T s'est avérée être une bonne alternative au set formé par les séquences de MAGNIMS avec la séquence axiale optionnelle 2D-T2* WI dans la pratique clinique.

Key words : Ultra-high field imaging ; Multiple sclerosis ; Spinal cord ; 3D-MP2RAGE

Introduction

La sclérose en plaques (SEP) est une maladie auto-immune responsable de la formation de lésions démyélinisantes du système nerveux central. L'atteinte de la moelle épinière est très fréquente (80% à 90%¹ des patients diagnostiqués) et responsable d'une grande part du handicap^{2,3}.

L'évaluation des lésions de la moelle épinière est cruciale pour le diagnostic de la SEP dans la mesure où il s'agit de l'une des quatre localisations permettant de confirmer la dissémination à la fois temporelle et spatiale⁴.

Elle joue également un rôle majeur dans l'élimination des différents diagnostics différentiels.

Les guidelines de l'imagerie par résonance magnétique de la sclérose en plaques (MAGNIMS)⁵ recommandent une étude de la moelle épinière en totalité, en utilisant au moins deux séquences d'imagerie IRM (Séquence pondérée T2 dans le plan sagittal, séquence pondérée en densité de protons ou STIR ou bien une séquence pondérée T1 après injection de gadolinium) pour augmenter la confiance en la détection des lésions. La séquence axiale 2D-T2GRE WI est proposée pour corroborer, caractériser ou confirmer la présence de lésions visibles.

En effet, certaines équipes ont précédemment démontré l'intérêt de l'utilisation d'une acquisition complémentaire dans le plan axial pour augmenter le nombre de lésions détectées et la confiance dans l'interprétation⁶⁻⁸.

En pratique, l'évaluation de la moelle épinière chez les patients atteints de SEP est difficile et délicate, même en utilisant des IRM 3T. Ces difficultés sont liées aux bruits physiologiques tels que la respiration ou le flux de liquide céphalo-rachidien^{9,10} et à la résolution spatiale relativement faible des séquences acquises à 1,5 et 3T, ce qui est à l'origine d'effets de volumes partiels.

Grâce à l'augmentation du rapport signal sur bruit (SNR) et du rapport contraste sur bruit (CNR), l'imagerie magnétique à ultra-haut champ (7T) de la moelle épinière cervicale permet d'atteindre une haute résolution spatiale et une visualisation raffinée des détails anatomiques.

L'imagerie 7T permet également un meilleur contraste entre les matières grise et blanche^{10,11}.

Ensemble, ces avantages ont permis d'augmenter le nombre de lésions détectées et de mieux caractériser et délimiter les lésions de SEP de la moelle cervicale par rapport à une évaluation à 3T¹².

Récemment, l'équipe de Demortière et al¹³ a illustré la valeur de la séquence MP2RAGE (Magnetization Prepared 2 Rapid Acquisition Gradient Echo)¹⁴ à 3T. Initialement développée pour s'affranchir des inhomogénéités du champ d'émission B1, la séquence MP2RAGE est une technique de cartographie T1 largement utilisée pour imager le cerveau^{15,16} et plus récemment la moelle cervicale^{17,18}.

Elle permet la détection d'un plus grand nombre de lésions cervicales de sclérose en plaques que toutes les séquences recommandées par le consensus MAGNIMS.

Notre objectif était de comparer la séquence 3D-MP2RAGE à 7T avec la séquence 3D-MP2RAGE à 3T pour la détection des lésions de la moelle épinière cervicale chez les patients atteints de SEP.

Matériel et méthode

Population

Cette étude rétrospective, approuvée par le comité d'éthique local d'Aix-Marseille Université avec consentement éclairé écrit, a inclus 19 patients atteints de SEP de Décembre 2017 à Septembre 2019.

Les critères d'inclusion étaient un diagnostic établi de SEP selon les critères révisés de McDonald 2017⁴, un âge de plus de 18 ans, des symptômes cliniques suggérant une atteinte de la moelle épinière et la possibilité de réaliser les examens d'imagerie par résonance magnétique à au moins trois mois après la dernière perfusion de stéroïdes.

Les patients au diagnostic incertain, en rechute ou présentant une contre-indication à l'examen ont été exclus.

Acquisition des images

Les IRM ont été réalisées au CEMEREM (Center for Magnetic Resonance in Biology and Medicine) sur un système 3T (VERIO, Siemens, Erlangen, Allemagne) et sur un système 7T (MAGNETOM, Siemens, Erlangen, Allemagne).

Chaque patient a été examiné sur les deux machines le même jour.

L'examen 7T a été effectué le matin et l'examen 3T l'après-midi.

Le protocole d'imagerie 3T incluait les séquences recommandées par le consensus MAGNIMS⁵ i.e. séquence sagittale 2D-T2 WI, STIR WI et axiale 2D-T2* WI formant l'ensemble MAGNIMS optimisé et une séquence sagittale 3D-MP2RAGE¹⁴ fournissant deux images contrastées à partir desquelles une image uniforme exempte d'inhomogénéités B1 et une cartographie T1 sont issues.

À 7T, 19 patients ont été examinés à l'aide d'une séquence axiale 3D-MP2RAGE avec une résolution de 0,3 x 0,3 x 4 mm et quinze ont également bénéficié d'une séquence coronale 3D-MP2RAGE avec une résolution isotropique de 0,7 mm³.

Pour localiser le niveau vertébral sur la séquence anisotrope 3D-MP2RAGE, une séquence STIR rapide a également été réalisée.

Cette dernière n'a pas été utilisée pour la visualisation des lésions.

Les principaux paramètres de la séquence sont résumés dans le tableau 1 et la figure 1 montre les quatre différents ensembles d'imagerie.

Sequance	T2EG-WI (2 slabs)	T2-WI	STIR-WI	MP2RAGE at 3T	MP2RAGE 7T ISOTROPIC	MP2RAGE 7T ANISOTROPIC
Dim / OR	2D - Axial	2D - Sagittal	2D - Sagittal	3D - Sagittal	3D - Coronal	3D - Axial
TR (s)	0.518	4	3.2	4	5	5
TE (ms)	27	113	53	2,48	2,15	3.05
FOV (mm)	180	280	320	300	260	256
Resolution (mm ³)	0,2 x 0,2 x 5	1,1 x 0,9 x 2	0,9 x 0,7 x 3	0,9 x 0,9 x 1	0,7 x 0,7 x 0,7	0,3 x 0,3 x 5
TA (min)	5.26	1.54	2.18	7.18	9.20	5.20

Tableau 1 - Paramètres principaux des séquences

Dim: Dimension; OR: Orientation; TR: Repetition time; TE : Echo time ; FA : Flip angle ; FOV: Field of view ; TA : Acquisition time.

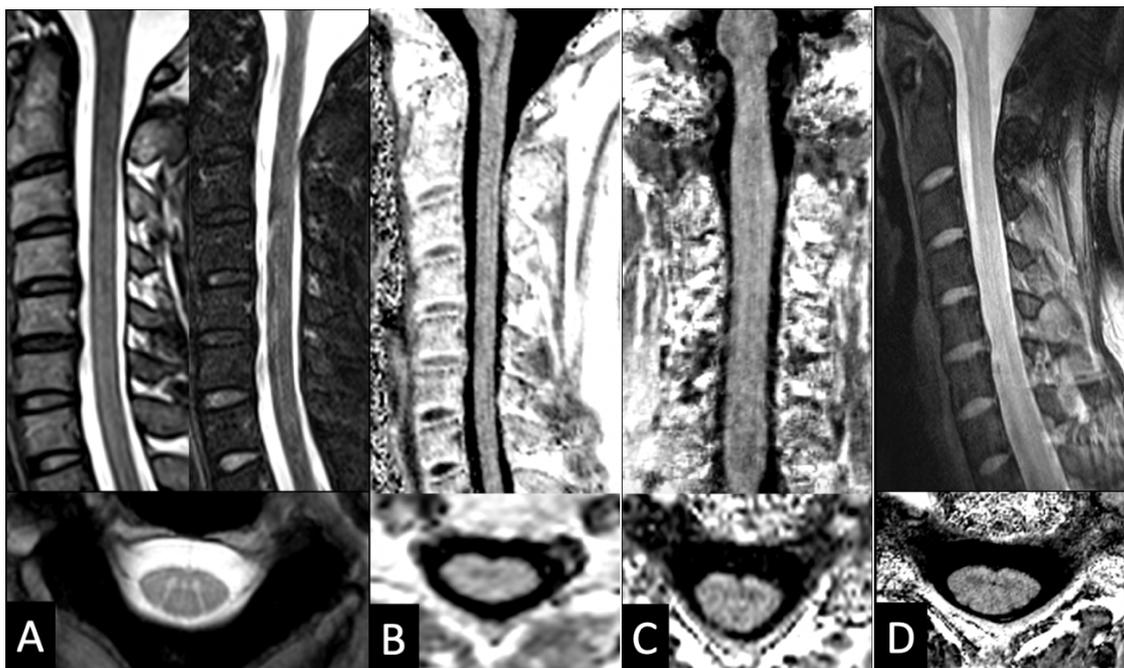


Figure 1 – Présentation des différents panels d'imagerie

Le panel A correspond aux séquences du set optimisé de MAGNIMS incluant les séquences dans le plan sagittal 2D-T2 WI and STIR WI en haut et la séquence axiale 2D-T2* WI en bas.

Le panel B correspond à la séquence 3D-MP2RAGE à résolution isotropique à 3T et le panel C à la séquence 3D-MP2RAGE à résolution isotropique à 7T, toutes deux dans le plan sagittal en haut et dans le plan axial en bas.

Le panel D correspond à la séquence STIR sagittale rapide en haut et à la séquence 3D-MP2RAGE à résolution anisotropique en bas.

Détection des lésions et cotation

La détection des lésions fut effectuée indépendamment par un neuroradiologue senior (BT) et un radiologue résident naïf (NF), tous deux en aveugle des données cliniques et à l'aide du logiciel de visionnage HOROS (<https://horosproject.org>).

Les différents sets (Set de MAGNIMS optimisé, 3D-MP2RAGE à 3T, 3D-MP2RAGE à 7T à résolution isotropique et à résolution anisotropique) furent visionnés successivement avec un délai de trois semaines entre chaque session.

L'ordre de lecture des sujets fut généré aléatoirement pour chaque série.

L'ordre de lecture des séquences fut établi en considérant que les séquences acquises à 7T pourraient être plus informatives et à l'origine d'un biais d'apprentissage si elles étaient observées avant les séquences acquises à 3T.

La séquence UNI et/ou la cartographie T1 de la séquence 3D-MP2RAGE ont été utilisées pour l'interprétation.

Une fois toutes les séquences interprétées, un consensus fut obtenu pour établir la cotation finale des lésions suspectes avec un troisième neurologue expert.

Pour chaque lésion, les évaluateurs ont précisé le niveau, la localisation et le degré de confiance (Certain ou douteux).

Nous avons retenu les lésions visibles sur au moins deux coupes consécutives et dont les caractéristiques sémiologiques étaient en faveur de lésions de sclérose en plaques.

Les niveaux utilisés pour localiser les lésions correspondent aux niveaux vertébraux. Si une lésion se trouvait en regard du disque intervertébral, elle était considérée comme appartenant au niveau sus-jacent.

En ce qui concerne la localisation des lésions dans le plan transverse, nous avons précisé si elles touchaient les cordons antérieurs, postérieurs ou latéraux.

Statistiques

Nous avons réalisé des statistiques descriptives de la cohorte.

Nous avons comparé le nombre total de lésions par niveau et par séquence.

Nous avons également comparé le pourcentage de lésions suspectes par séquence et par évaluateur ainsi que la distribution des lésions.

Toutes les analyses ont été effectuées avec Statistics in R (<http://www.r-project.org>).

Résultats

Population

19 patients furent inclus (14 / 5 femmes / hommes ; Âge moyen de 29,4 ; 20 - 46). 18 patients avaient une forme récurrente-rémittente de la maladie. Notre population d'étude présentait un handicap léger, le score EDSS médian est de 1 (Moyenne d'environ 1.3 ; 0 – 6,5) et une courte durée de la maladie, la durée médiane de la maladie était de 17 mois. Six patients de l'étude ne recevaient aucun traitement. Les caractéristiques démographiques et cliniques détaillées de chaque patient sont résumées dans le matériel supplémentaire.

La séquence 3D-MP2RAGE avec une résolution isotrope à 7T manquait pour quatre patients.

Caractéristiques des lésions (Consensus) et confiance

Le nombre total de lésions détectées pour les 15 patients ayant pu bénéficier d'une exploration complète pour chaque ensemble d'imagerie sur l'évaluation consensuelle est montré dans la figure 2.

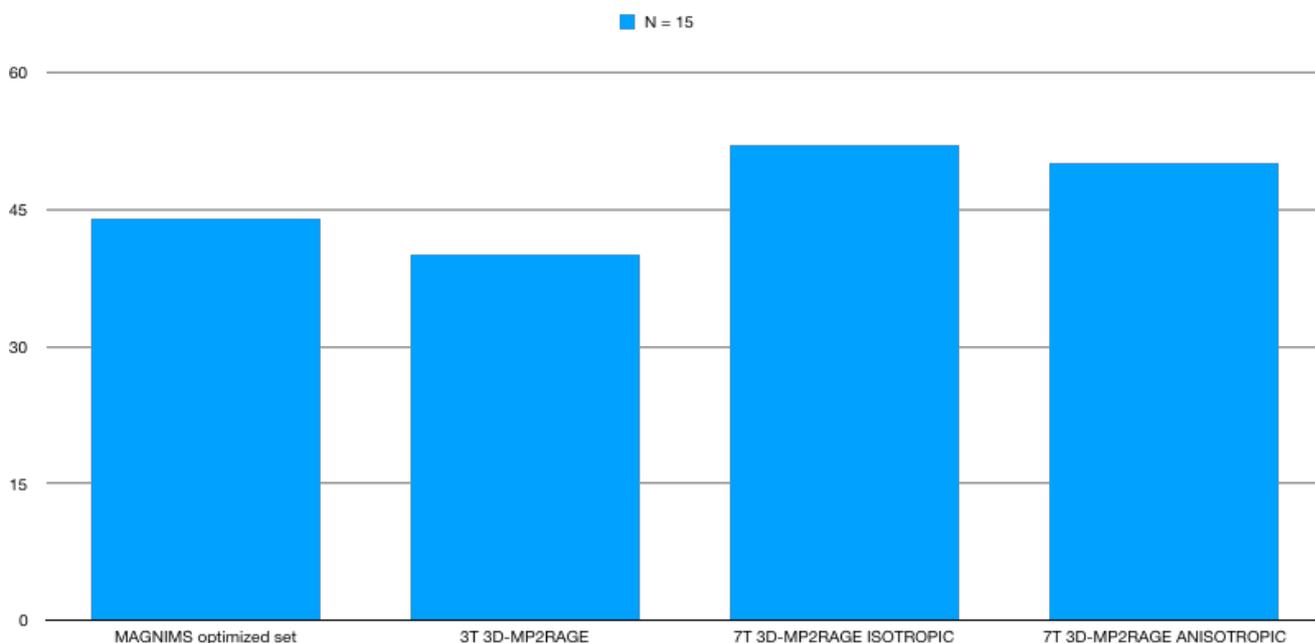


Figure 2 – Nombre total de lésions pour N = 15.

Pour l'ensemble des segments, le nombre total de lésions par patient le plus élevé a été observé sur l'imagerie à résolution isotrope MP2RAGE à 7T (n= 52), suivie par la

séquence à résolution isotrope 3D-MP2RAGE à 7T (n= 50), les séquences du groupe MAGNIMS à 3T (n= 44) et enfin la séquences 3D-MP2RAGE à 3T (n= 40). À titre indicatif, pour N = 19, 68 lésions ont été détectées avec l'ensemble MAGNIMS optimisé, 72 avec la séquence MP2RAGE 3T, 52 avec la séquence MP2RAGE à 7T à résolution isotrope et 91 avec la séquence MP2RAGE 7T à résolution anisotrope. D'après les données du consensus issues de l'analyse des imageries des quinze patients ayant pu bénéficier d'une exploration complète, la plupart des lésions ont été observées au niveau des cinq premiers niveaux cervicaux, avec un nombre total maximum de lésions sur toutes les séquences à C3 (n= 35) (Figure 2A). Le nombre total de lésions le plus faible (n= 13) fut détecté à C7.

Le taux de doute le plus faible fut observé pour la séquence à résolution anisotrope 3D-MP2RAGE à 7T (23.3%, Figure 2B), alors que les taux étaient similaires pour les autres séquences (Séquence isotrope 3D-MP2RAGE à 7T = 29,4 %, séquences du groupe MAGNIMS à 3T = 32,3 % et séquence isotrope 3D-MP2RAGE à 3T = 35%). Le lecteur 1, moins expérimenté, a montré un pourcentage plus élevé de doutes sur toutes les séquences (40,1%) que le lecteur 2 (20,2%).

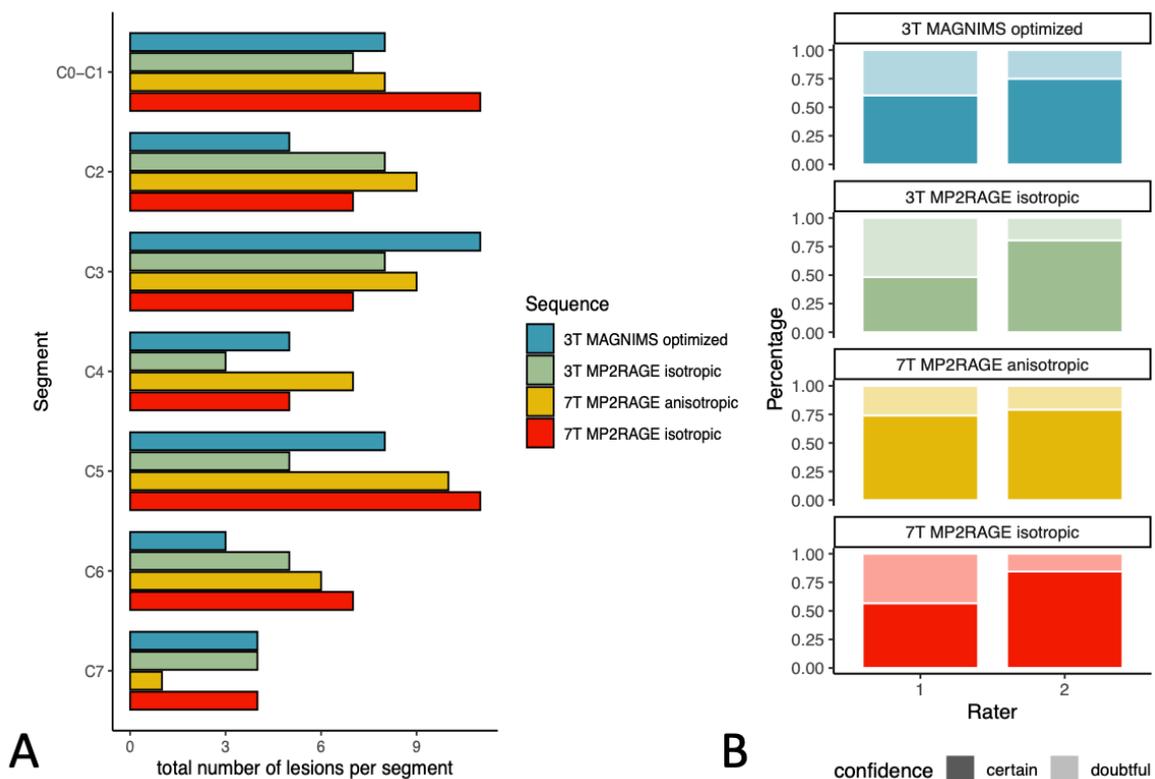


Figure 3 – Distribution des lésions et confiance (N=15)

Le panel A montre des diagrammes à barres représentant le nombre total de lésions par segment sur chaque séquence après consensus.

Le panel B illustre le pourcentage d'anomalies de signal classées comme lésion certaine ou douteuse pour chacun des deux évaluateurs et chaque séquence.

Les lésions postérieures sont les plus nombreuses (52 % du nombre total de lésions pour l'ensemble des séquences du set optimisé de MAGNIMS, 52,5 % pour la séquence 3D-MP2RAGE à 3T, 46 % pour la séquence 3D-MP2RAGE à 7T isotrope et 46 % pour la séquence 3D-MP2RAGE à 3T anisotrope).

Les lésions des cordons latéraux représentent respectivement 32% des lésions détectées avec l'ensemble des séquences du set optimisé de MAGNIMS, 32,5% des lésions détectées avec la séquence 3D-MP2RAGE à 3T, 36,5% des lésions vues avec la séquence 3D-MP2RAGE isotropique à 7T et enfin 37,5% des lésions vues avec la séquence 3D-MP2RAGE anisotropique à 7T.

Les lésions antérieures et centrales sont les moins nombreuses (16% du nombre total de lésions pour l'ensemble des séquences du set optimisé de MAGNIMS, 15% pour la séquence 3D-MP2RAGE à 3T, 17,5% pour la séquence isotrope MP2RAGE à 7T et 16% pour la séquence anisotrope MP2RAGE à 3T).

À titre d'exemple, voici deux lésions de notre cohorte.

Elles illustrent l'aspect d'une lésion sur les différents jeux d'images.

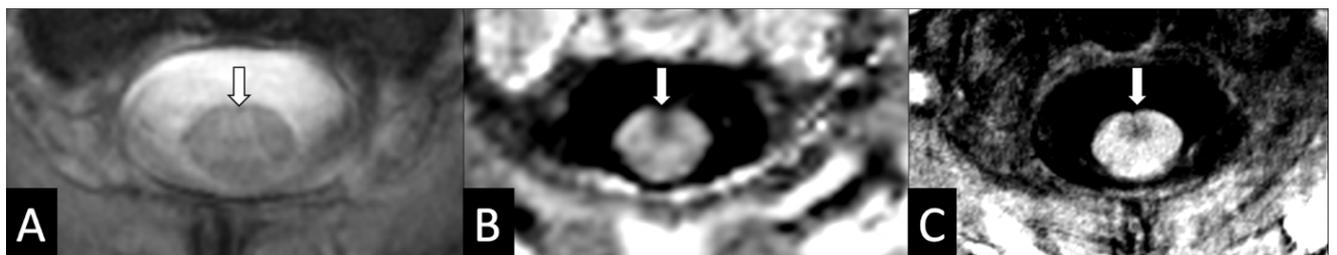


Figure 4 - Exemple d'une lésion de disposition antérieure

Panel A = Aspect de la lésion à 3T avec la séquence axiale T2* WI.

Panel B = Aspect à 3T avec la séquence 3D-MP2RAGE.

Panel C = Aspect de la lésion à 7T avec la séquence à résolution anisotropique.

Les deux séquences MP2RAGE à 3T et 7T permettent une bonne visualisation de cette lésion non retenue lors de la séance de consensus à la lecture du set de MAGNIMS.

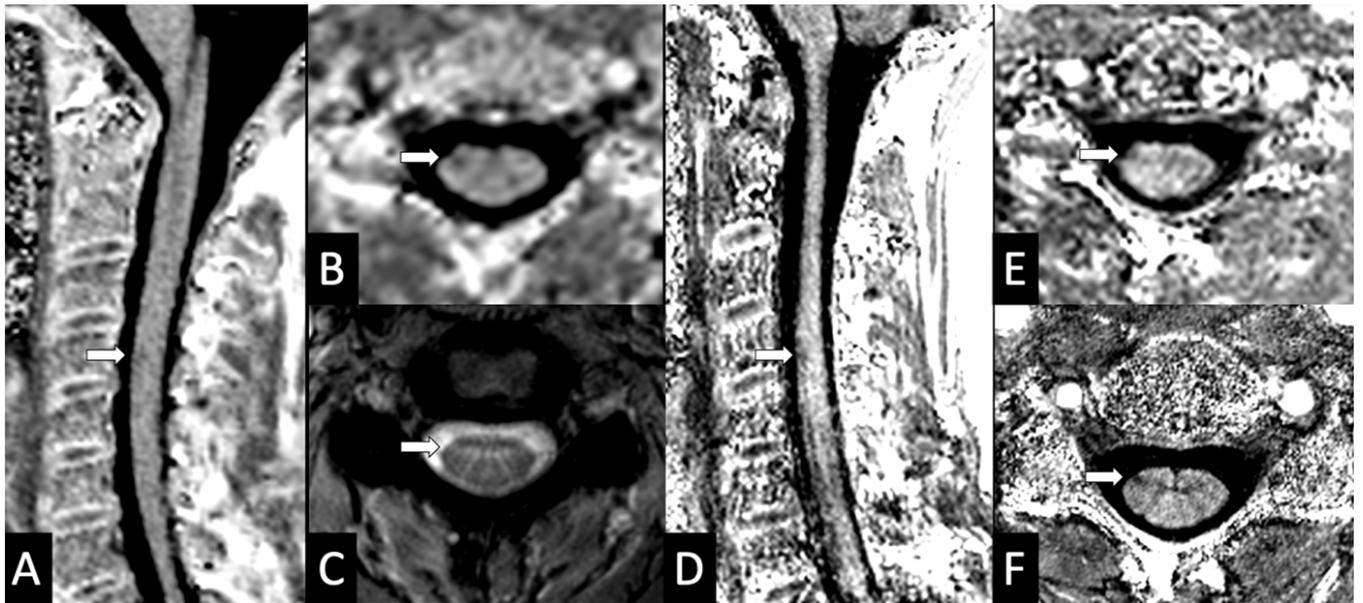


Figure 5 - Exemple d'une lésion de disposition latérale droite

Panels A et B = Aspect de la lésion à 3T avec la séquence MP2RAGE.

Panel C = Aspect de la lésion à 3T avec la séquence axiale T2* WI.

Panels D et E = Aspect de la lésion à 7T avec la séquence à résolution isotrope.

Panel F = Aspect de la lésion à 7T avec une séquence à résolution anisotropique.

Cette lésion, non retenue lors de la séance de consensus à 3T, est bien mieux visible à 7T et décrite avec confiance par les deux lecteurs avec la séquence à résolution anisotropique.

Discussion

Cette étude apporte des résultats prometteurs quant à l'apport des séquences MP2RAGE à ultra-haut champ pour explorer les lésions de la moelle épinière cervicale de sclérose en plaque. La séquence MP2RAGE de type anisotrope à 7T a facilité l'identification, la délimitation des lésions et surtout la confiance dans l'évaluation des lésions, même pour un lecteur inexpérimenté, comparativement aux séquences à 3T.

Contrairement aux résultats de Demortière et al¹³, nous n'avons pas observé de différence significative en terme de performance de détection entre l'ensemble optimisé MAGNIMS et de la séquence MP2RAGE à 3T.

Nous avons utilisé une séquence axiale 2D-T2* WI en plus des plans sagittaux recommandés par MAGNIMS car elle était disponible dans notre protocole d'imagerie et parce qu'elle est fréquemment réalisée dans la pratique clinique. De nombreuses lésions présentant un profil radiologique typique de lésions de SEP furent souvent visibles sur cette séquence et non sur les plans sagittaux. L'utilisation systématique de cette séquence considérée comme optionnelle selon les dernières guidelines¹⁹ explique le succès relative du set optimisé de MAGNIMS. La séquence axiale 2D-T2* WI présente une haute résolution dans le plan axial et un contraste élevé entre la matière blanche et la matière grise. Sa réalisation est recommandée dans les protocoles de recherche sur la moelle épinière du fait de son utilité lors de la registration et de la segmentation de la moelle épinière²⁰.

Cependant, la séquence 3D-MP2RAGE présente plusieurs avantages supplémentaires par rapport aux séquences recommandées par le consensus MAGNIMS. Du fait d'un temps d'acquisition plus court et de son caractère isotrope, la séquence 3D-MP2RAGE semble être une bonne alternative aux séquences proposées par le consensus MAGNIMS en pratique clinique.

La séquence 3D-MP2RAGE à 3T a également la particularité d'imager à la fois le cerveau et la moelle cervicale¹⁷. La sclérose en plaques affectant l'ensemble du système nerveux central, il est particulièrement pertinent de pouvoir réaliser une acquisition isotropique de bonne résolution en un temps relativement court, tant pour le cerveau que pour la moelle cervicale.

En accord avec les données de la littérature¹¹, l'augmentation attendue du CNR et du SNR à ultra-haut champ¹⁰ améliore la résolution de l'image, ce qui facilite l'interprétation pour les lecteurs, même en cas de lésions nombreuses et coalescentes ou d'inexpérience, d'où une diminution du taux de lésions douteuses. La séquence 3D-MP2RAGE 7T de type anisotrope permet une meilleure délimitation des lésions conduisant à un comptage plus précis et plus fiable. Les lecteurs ont pu à plusieurs reprises confirmer la présence de lésions peu visibles ou qualifiées d'anomalies de signal non spécifiques par les images réalisées à 3T grâce à cette séquence. Elle permet au lecteur le moins expérimenté d'évaluer les lésions avec une confiance beaucoup plus grande, comparable à celle du lecteur expérimenté.

L'utilisation de séquence MP2RAGE 7T à haute résolution anisotropique pourrait trouver sa place dans la caractérisation fine de lésions de myélite cervicale ou pour mieux apprécier d'éventuelles lésions douteuses.

Néanmoins, cette séquence présente l'inconvénient de nécessiter l'acquisition d'une séquence complémentaire dans le plan sagittal pour identifier le niveau lésionnel. Cette séquence souffre également de l'existence d'un effet de volume partiel au niveau C7 en raison de la courbure physiologique du cordon.

La séquence 3D-MP2RAGE à 7T à résolution isotrope fut celle pour laquelle les performances du lecteur moins expérimenté furent les moins bonnes. Cela pourrait être attribué à une durée d'acquisition particulièrement longue de près de dix minutes et une réalisation en fin d'examen dans le protocole de recherche à l'origine d'artefacts de mouvement et d'une dégradation de la qualité des images affectant davantage le lecteur inexpérimenté. L'acquisition de type isotrope offre cependant la possibilité d'une reconstruction de l'image dans les trois plans ce qui permet une lecture plus confortable pour les évaluateurs. En outre, les technologies prometteuses de "Compressed-sensing"²¹ pourrait réduire le temps d'acquisition à l'avenir et améliorer la qualité de cette séquence. Enfin, le pourcentage de lésions douteuses chez le lecteur inexpérimenté est moindre à 7T avec la séquence isotrope comparativement à la séquence isotrope à 3T alors qu'il est resté relativement stable chez le lecteur expérimenté ce qui peut témoigner d'un phénomène d'apprentissage nécessaire à la lecture de ce type de séquences.

D'après les données du consensus, le niveau C3 présentait le plus grand nombre de lésions et les lésions dans les cordons postérieurs et latéraux étaient les plus nombreuses. Ces résultats sont cohérents avec les données de la littérature^{22,23}. Nous n'avons pas mis en évidence de pattern radiologique mieux détecté à 7T qu'avec les autres ensembles à 3T. Le schéma de distribution des lésions était similaire entre les ensembles si l'on considère les quinze patients qui ont pu être évalués par toutes les séquences.

Ce résultat n'est pas surprenant si l'on considère les résultats des travaux de Lefevre et al. en 2020²⁴. Ils ont pu établir l'existence de deux types de lésions distinctes (Des lésions focales de la substance blanche correspondant aux lésions de la sclérose en plaques que nous avons l'habitude de décrire et les lésions de

topographie sub-piales de la substance blanche qui n'ont jusqu'à présent pas été rapportées dans la sclérose en plaque) en utilisant un modèle animal EAE (Experimental autoimmune encephalomyelitis) de la moelle épinière qui a été étudiée en utilisant une étude combinée d'IRM ex-vivo et d'histologie.

Les lésions sous-piales sont rapportées subtiles et difficiles à visualiser par IRM à 7T malgré les conditions idéales des examens réalisés (Ex-vivo et laminectomie préalable) en raison d'artefacts de susceptibilité magnétique qui empêchent de voir ces petites lésions en bordure de la moelle épinière.

On peut supposer que les conditions d'examen de notre étude (imagerie UHF réalisée sur des humains in-vivo) ne permettent tout simplement pas de voir d'éventuelles lésions de ce type et espérer que les progrès techniques futurs permettront d'éliminer ces artefacts gênants de sorte à visualiser ce type de lésions.

Notre étude a plusieurs limites. Il s'agit d'une étude rétrospective avec un échantillon de petite taille. Cependant, les caractéristiques de nos lésions sont comparables à celles de la littérature et constituent un échantillon représentatif des lésions de la moelle épinière dans la SEP. Une autre étude avec un échantillon de plus grande taille est nécessaire pour confirmer nos résultats.

L'effet d'apprentissage sur les lecteurs est un biais potentiel dans ce travail.

Il peut avoir conduit à une amélioration de la performance des lecteurs, notamment le moins expérimenté, lors de l'interprétation des séquences MP2RAGE.

L'expérience acquise lors de l'interprétation d'imagerie à 7T pouvant améliorer les performances des radiologues à 3T, nous avons réalisé l'interprétation des images en plusieurs sessions espacées d'au moins trois semaines pour limiter les biais liés à la mémorisation des lésions et nous avons commencé par les séries d'imagerie à 3T. Il existe également une inévitable subjectivité dans l'interprétation des images par les radiologues.

Enfin, les séquences que nous comparons dans notre étude ne sont pas totalement identiques (Résolution notamment). Il faut rappeler la difficulté de transposer les séquences de 3T à 7T en raison des contraintes techniques liées à l'augmentation du champ magnétique¹⁰.

En conclusion, les séquences 3D-MP2RAGE à 7T ont détecté plus de lésions que les ensembles 3T avec une bonne confiance dans les lésions. La séquence 3T 3D-MP2RAGE semble constituer une bonne alternative à l'ensemble des séquences recommandées par le consensus MAGNIMS avec la séquence axiale optionnelle 2D-T2* WI en pratique clinique mais peut nécessiter un apprentissage préalable.

Les perspectives cliniques de l'IRM 7T nécessitent des avancées techniques pour imager la moelle épinière thoracique et lombaire et une réduction des temps d'acquisition.

Remerciements

Les auteurs remercient V. Gimenez, L. Pini, C. Costes, S. Mchinda, P. Durozard, A. Rico, A. Maarouf and M.P. Ranjeva pour la logistique de l'étude.

Financements

Ce travail a été soutenu par la Fondation ARSEP (Fondation pour l'Aide à la recherche sur la Sclérose en Plaques) et le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique). Elle a été réalisée au sein d'un laboratoire membre du réseau France Life Imaging (subvention ANR-11-INBS-0006), sur la plateforme 7T-AMI, un programme français des Investissements d'Avenir (subvention ANR-11-EQPX-0001).

References

1. Bot JCJ, Blezer ELA, Kamphorst W, et al. The Spinal Cord in Multiple Sclerosis: Relationship of High-Spatial-Resolution Quantitative MR Imaging Findings to Histopathologic Results. *Radiology* 2004;233:531–40.
2. Gass A, Rocca MA, Agosta F, et al. MRI monitoring of pathological changes in the spinal cord in patients with multiple sclerosis. *The Lancet Neurology* 2015;14:443–54.
3. Brownlee WJ, Altmann DR, Prados F, et al. Early imaging predictors of long-term outcomes in relapse-onset multiple sclerosis. *Brain* 2019;142:2276–87.
4. Thompson AJ, Banwell BL, Barkhof F, et al. Diagnosis of multiple sclerosis: 2017 revisions of the McDonald criteria. *The Lancet Neurology* 2018;17:162–73.
5. Filippi M, Rocca MA, Ciccarelli O, et al. MRI criteria for the diagnosis of multiple sclerosis: MAGNIMS consensus guidelines. *The Lancet Neurology* 2016;15:292–303.
6. Weier K, Mazraeh J, Naegelin Y, et al. Biplanar MRI for the assessment of the spinal cord in multiple sclerosis. *Mult Scler* 2012;18:1560–9.
7. Galler S, Stellmann J-P, Young KL, et al. Improved Lesion Detection by Using Axial T2-Weighted MRI with Full Spinal Cord Coverage in Multiple Sclerosis. *American Journal of Neuroradiology* 2016;37:963–9.
8. Bergers E, Bot JCJ, De Groot CJA, et al. Axonal damage in the spinal cord of MS patients occurs largely independent of T2 MRI lesions. *Neurology* 2002;59:1766–71.

9. Vargas MI, Boto J, Meling TR. Imaging of the spine and spinal cord: An overview of magnetic resonance imaging (MRI) techniques. *Revue Neurologique* 2021;177:451–8.
10. Barry RL, Vannesjo SJ, By S, et al. Spinal cord MRI at 7T. *NeuroImage* 2018;168:437–51.
11. Dula AN, Pawate S, Dortch RD, et al. Magnetic resonance imaging of the cervical spinal cord in multiple sclerosis at 7T. *Mult Scler* 2016;22:320–8.
12. Kreiter DJ, van den Hurk J, Wiggins CJ, et al. Ultra-high field spinal cord MRI in multiple sclerosis: Where are we standing? A literature review. *Multiple Sclerosis and Related Disorders* 2022;57:103436.
13. Demortière S, Lehmann P, Pelletier J, et al. Improved Cervical Cord Lesion Detection with 3D-MP2RAGE Sequence in Patients with Multiple Sclerosis. *AJNR Am J Neuroradiol* 2020;41:1131–4.
14. Marques JP, Kober T, Krueger G, et al. MP2RAGE, a self bias-field corrected sequence for improved segmentation and. *Neuroimage* 2010;49:1271–81.
15. Okubo G, Okada T, Yamamoto A, et al. MP2RAGE for deep gray matter measurement of the brain: A comparative study with MPRAGE: MP2RAGE for Deep Gray Matter Measurement. *J Magn Reson Imaging* 2016;43:55–62.
16. Marques JP, Gruetter R. New Developments and Applications of the MP2RAGE Sequence - Focusing the Contrast and High Spatial Resolution R1 Mapping. Yacoub E, ed. *PLoS ONE* 2013;8:e69294.
17. Forodighasemabadi A, Rasoanandrianina H, El Mendili MM, et al. An optimized MP2RAGE sequence for studying both brain and cervical spinal cord in a single acquisition at 3T. *Magnetic Resonance Imaging* 2021;84:18–26.
18. Massire A, Taso M, Besson P, et al. High-resolution multi-parametric quantitative magnetic resonance imaging of the human cervical spinal cord at 7T. *NeuroImage* 2016;143:58–69.
19. Wattjes MP, Ciccarelli O, Reich DS, et al. 2021 MAGNIMS–CMSC–NAIMS consensus recommendations on the use of MRI in patients with multiple sclerosis. *The Lancet Neurology* 2021;20:653–70.
20. Cohen-Adad J, Alonso-Ortiz E, Abramovic M, et al. Generic acquisition protocol for quantitative MRI of the spinal cord. *Nat Protoc* 2021;16:4611–32.
21. Mussard E, Hilbert T, Forman C, et al. Accelerated MP2RAGE imaging using Cartesian phyllotaxis readout and compressed sensing reconstruction. *Magn Reson Med* 2020;84:1881–94.
22. Eden D, Gros C, Badji A, et al. Spatial distribution of multiple sclerosis lesions in the cervical spinal cord. *Brain* 2019;142:633–46.
23. Kearney H, Miller DH, Ciccarelli O. Spinal cord MRI in multiple sclerosis—diagnostic, prognostic and clinical value. *Nat Rev Neurol* 2015;11:327–38.
24. Lefevre JA, Guy JR, Luciano NJ, et al. The spectrum of spinal cord lesions in a primate model of multiple sclerosis. *Mult Scler* 2020;26:284–93.

FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1 – Présentation des différents panels d'imagerie

Le panel A correspond aux séquences du set optimisé de MAGNIMS incluant les séquences dans le plan sagittal 2D-T2 WI and STIR WI en haut et la séquence axiale 2D-T2* WI en bas.

Le panel B correspond à la séquence 3D-MP2RAGE à résolution isotropique à 3T et le panel C à la séquence 3D-MP2RAGE à résolution isotropique à 7T, toutes deux dans le plan sagittal en haut et dans le plan axial en bas.

Le panel D correspond à la séquence STIR sagittale rapide en haut et à la séquence 3D-MP2RAGE à résolution anisotropique en bas.

Figure 2 – Nombre total de lésions pour N = 15

Figure 3 – Distribution des lésions et confiance (N=15)

Le panel A montre des diagrammes à barres représentant le nombre total de lésions par segment sur chaque séquence après consensus.

Le panel B illustre le pourcentage d'anomalies de signal classées comme lésion certaine ou douteuse pour chacun des deux évaluateurs et chaque séquence.

Figure 4 - Exemple d'une lésion de disposition antérieure

Panel A = Aspect de la lésion à 3T avec la séquence axiale T2* WI.

Panel B = Aspect à 3T avec la séquence 3D-MP2RAGE.

Panel C = Aspect de la lésion à 7T avec la séquence à résolution anisotropique.

Figure 5 - Exemple d'une lésion de disposition latérale droite

Panels A et B = Aspect de la lésion à 3T avec la séquence MP2RAGE.

Panel C = Aspect de la lésion à 3T avec la séquence axiale T2* WI.

Panels D et E = Aspect de la lésion à 7T avec la séquence à résolution isotrope.

Panel F = Aspect de la lésion à 7T avec une séquence à résolution anisotropique.

Tableau 1 – Paramètres des principales séquences

Dim: Dimension; OR: Orientation ; TR : Repetition time ; TE : Echo time ; FA : Flip angle ; FOV: Field of view ; TA : Acquisition time.

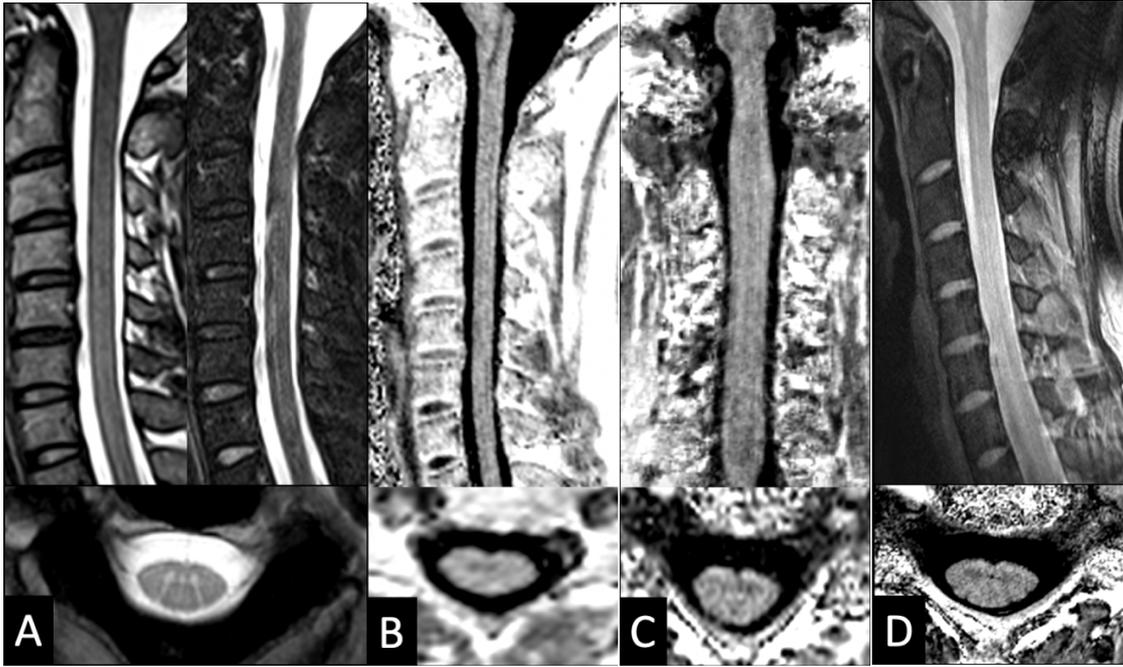


Figure 1

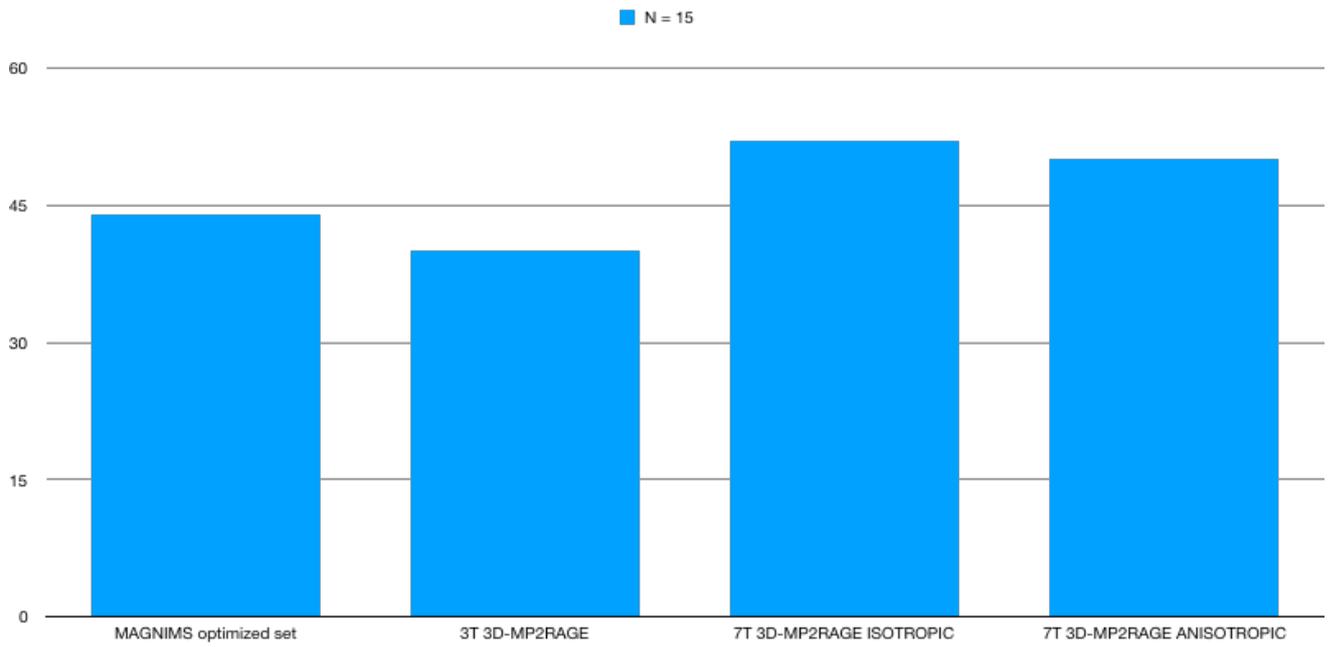


Figure 2

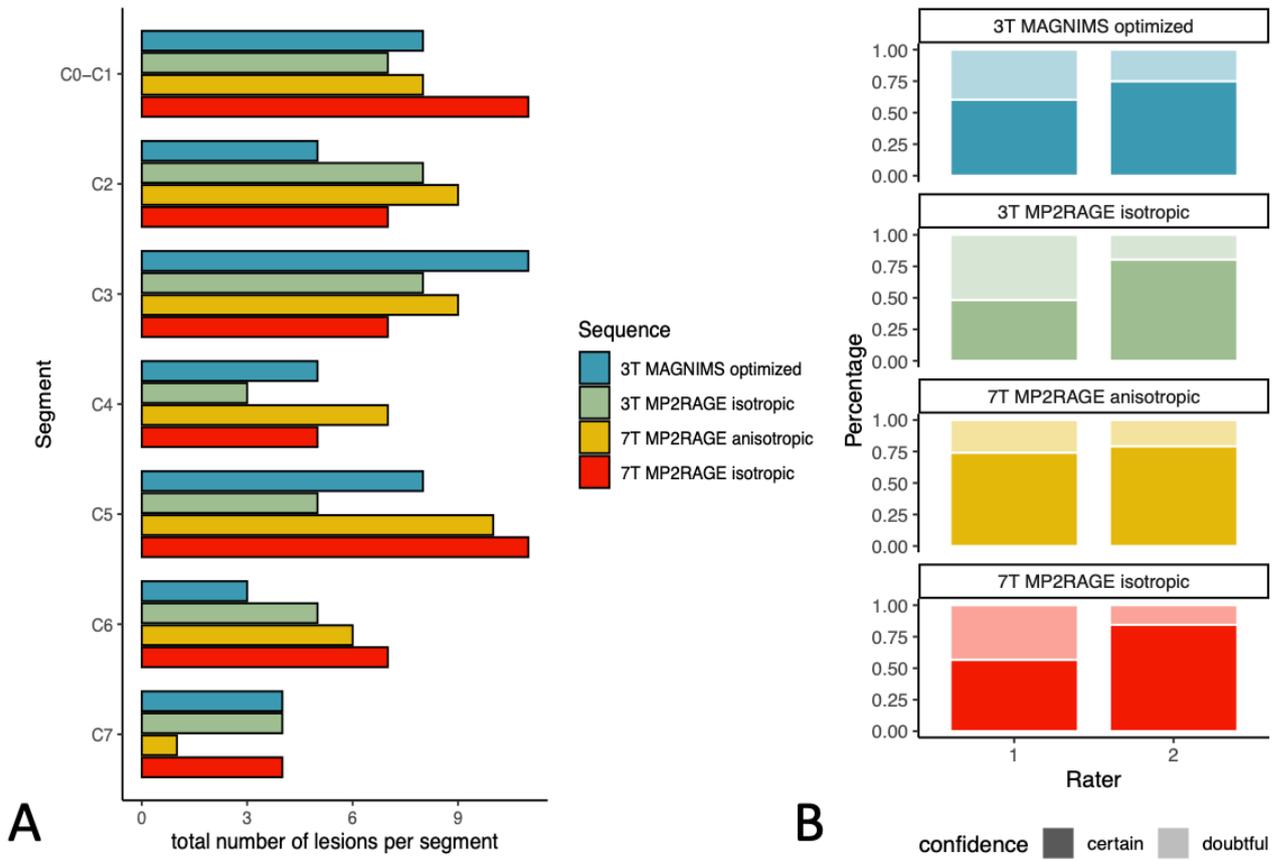


Figure 3

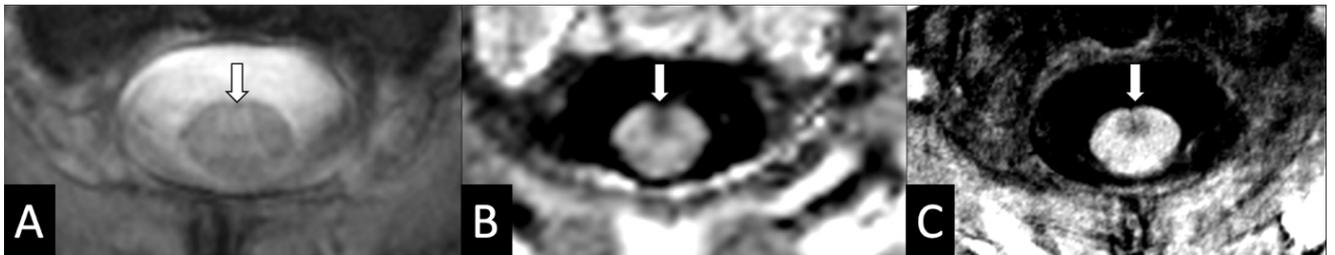


Figure 4

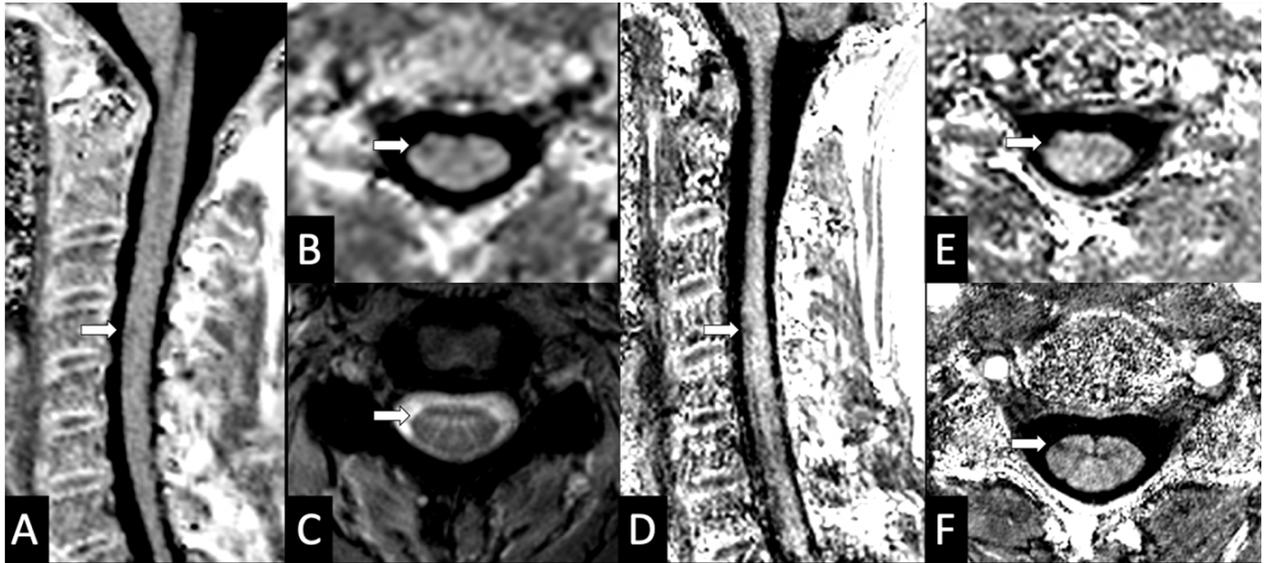


Figure 5

Sequence	T2EG-WI (2 slabs)	T2-WI	STIR-WI	MP2RAGE at 3T	MP2RAGE 7T ISOTROPIC	MP2RAGE 7T ANISOTROPIC
Dim / OR	2D - Axial	2D - Sagittal	2D - Sagittal	3D - Sagittal	3D - Coronal	3D - Axial
TR (s)	0.518	4	3.2	4	5	5
TE (ms)	27	113	53	2,48	2,15	3.05
FA (°)	28	-	-	4 / 5	4 / 5	4 / 5
FOV (mm)	180	280	320	300	260	256
Resolution (mm ³)	0.2 x 0.2 x 5	1,1 x 0,9 x 2	0,9 x 0,7 x 3	0,9 x 0,9 x 1	0,7 x 0,7 x 0,7	0,3 x 0,3 x 5
TA (min)	5.26	1.54	2.18	7.18	9.20	5.20

Table 1

Additional material

	Age (years)	Sexe	Disease course	Disease duration (month)	Treatment	EDSS
Subject 1	40	M	PP	95	RITUXIMAB	2
Subject 2 *	20	F	RR	58	RITUXIMAB	2,5
Subject 3	30	F	RR	87	TYSABRI	1,5
Subject 4	27	F	RR	17	CYMBALTA	3
Subject 5	23	F	RR	47	None	0
Subject 6	31	F	RR	6	None	0
Subject 7	46	F	RR	42	FAMPYRA	6,5
Subject 8	35	F	RR	33	GILENYA	1
Subject 9	28	F	RR	6	TYSABRI	0
Subject 10	38	F	RR	7	TERIFLUNOMIDE	1
Subject 11	33	M	RR	17	None	0
Subject 12	31	F	RR	189	GILENYA	0
Subject 13	41	F	RR	45	TYSABRI	1
Subject 14	26	M	RR	12	None	0
Subject 15	20	M	RR	44	TECFIDERA	0
Subject 16	30	F	RR	10	None	1
Subject 17 *	35	M	RR	11	GILENYA	2
Subject 18 *	26	F	RR	10	RITUXIMAB	1
Subject 19 *	37	F	RR	16	None	0

Demographic and clinical characteristics

PP= primary progressive, RR: relapsing remitting, EDSS= Expanded Disability Status Scale.

PARTIE 2- Original research

Abstract

Background and purpose

The detection of spinal cord lesions in multiple sclerosis patients is challenging using the sequences recommended by the MAGNIMS consensus. The 3D-MP2RAGE sequence demonstrated its usefulness at 3T for the detection of this type of lesion. The objective of this work is to evaluate the contribution of the 3D-MP2RAGE sequence acquired at 7 Tesla (7T) for the detection of multiple sclerosis lesions in the cervical spine.

Materials and methods

Nineteen MS patients underwent an MR imaging examination of cervical spinal cord including MAGNIMS protocol with axial T2*-weighted images, 3T isotropic MP2RAGE sequence and 7T 3D-MP2RAGE isotropic and anisotropic sequences. Each data set was read independently by two radiologists. Consensus was done with a third rater. The number of lesions, topography, lesion confidence were analyzed.

Results

3D-MP2RAGE sequence with isotropic resolution at 7T was missing for 4 patients. For N = 15, 44 lesions were detected with the optimized MAGNIMS set, 40 with the 3T 3D-MP2RAGE sequence, 52 with the isotropic-resolved 7T 3D-MP2RAGE sequence and 50 with the anisotropic-resolved 7T 3D-MP2RAGE sequence. The lowest rate of doubtful lesions was observed for 7T 3D-MP2RAGE (15.5 % for rater 2 on isotropic sequence and 25.9% for rater 1 on anisotropic sequence).

Conclusion

7T 3D-MP2RAGE sequences detected more lesion than every other set with high lesion confidence for both raters. 3T 3D-MP2RAGE has appeared to be a good alternative to the conventional MAGNIMS with the optional axial 2D-T2* WI sequence set in clinical practice.

Key words : Ultra-high field imaging; Multiple sclerosis; spinal cord; MP2RAGE

Introduction

Multiple sclerosis (MS) is an auto-immune disease that is responsible for the formation of demyelinating lesions of the central nervous system. Spinal cord involvement is very common (80% to 90%¹ of diagnosed patients) and responsible for a large portion of the disability^{2,3}.

Lesion assessment of the spinal cord is crucial for the diagnosis of MS by being one of the four locations to confirm temporal and spatial dissemination⁴.

It also plays a major role in eliminating various differential diagnoses.

The Magnetic Resonance Imaging in Multiple Sclerosis (MAGNIMS)⁵ guidelines recommend a study of the entire spinal cord, using at least two MR sequences (e.g., sagittal T2 weighted sequences, proton density-weighted sequences or STIR or T1 WI post-gadolinium) to increase confidence in lesion detection. The 2D-T2 GRE WI axial sequence is proposed to corroborate, characterize, or confirm the presence of visible lesions. Indeed, some teams have previously shown the significant value of using a complementary acquisition in the axial plane to increase the number of lesions detected and the confidence in the interpretation⁶⁻⁸.

In practice, the evaluation of the spinal cord in patients with MS is difficult and challenging even using 3T MRI scans. These difficulties are related to physiological noises such as respiration or cerebro-spinal fluid (CSF) flow^{9,10} and to the relatively low spatial resolution of sequences acquired at 1.5 and 3T resulting in partial volumes.

Thanks to the increase in the signal-to-noise ratio (SNR) and the contrast-to-noise ratio (CNR), ultra-high magnetic field imaging (7T) of the cervical spinal cord allows to reach a high spatial resolution and a refined visualization of anatomical details.

7T imaging allows also a better gray/white matter contrast^{10,11}.

Together, these advantages permitted an increase in the number of lesions detected and a better characterization and delineation of cervical spinal MS lesions compared to a 3T evaluation¹².

Recently Demortière et al ¹³ illustrated the value of the 3D-Magnetization Prepared 2 Rapid Acquisition Gradient Echo (MP2RAGE)¹⁴ sequence at 3T. Initially developed to get rid of inhomogeneities in the B1 transmit field, the MP2RAGE sequence is a broad T1 mapping technique that has been used broadly on brain^{15,16} and recently on cervical cord^{17,18}.

It allows the detection of a greater number of cervical multiple sclerosis lesions than all the sequences recommended by the MAGNIMS consensus.

Our goal was to compare the 7T 3D-MP2RAGE sequence with the 3T 3D-MP2RAGE sequence for detecting cervical spinal cord lesions in patients with MS.

Materials and methods

Population

This retrospective study, approved by the local Aix-Marseille University ethics committee with written informed consent, included 19 patients with MS from December 2017 to September 2019.

Inclusion criteria were a diagnosis of MS according to the revised McDonald 2017 criteria⁴, older than 18 years of age, clinical symptoms suggesting spinal cord involvement, and MR imaging examination performed at least 3 months after steroid infusion.

Patients with uncertain diagnosis, in relapse or with a contraindication to the examination were excluded.

Image acquisition

MRI were performed at CEMEREM (Center for Magnetic Resonance in Biology and Medicine) on a 3T system (Verio, Siemens, Erlangen, Germany) and on a 7T system (Magnetom, Siemens, Erlangen, Germany).

Each patient was examined on each machine on the same day.

The 7T examination was performed in the morning and the 3T examination in the afternoon.

The 3T imaging protocol included the sequences recommended by MAGNIMS consensus⁵ i.e. sagittal 2D-T2 WI, STIR WI, and an axial 2D-T2* WI sequence forming the optimized MAGNIMS set, and one sagittal 3D-MP2RAGE¹⁴ sequence, providing two contrasted images, from which a uniform image free of B1 inhomogeneities and a T1 map were derived.

At 7T, nineteen patients were examined using an axial 3D-MP2RAGE sequence with a resolution of 0,3 x 0,3 x 4 mm, and fifteen also had a coronal 3D-MP2RAGE sequence with an isotropic spatial resolution of 0,7 mm³. To locate the vertebral level on the 3D-MP2RAGE anisotropic sequence, a fast STIR sequence was also performed (It was not used for lesion visualization).

The main sequence parameters are summarized in the table 1 and the figure 1 show the four different imaging sets.

Sequence	T2EG-WI (2 slabs)	T2-WI	STIR-WI	MP2RAGE at 3T	MP2RAGE 7T ISOTROPIC	MP2RAGE 7T ANISOTROPIC
Dim / OR	2D - Axial	2D - Sagittal	2D - Sagittal	3D - Sagittal	3D - Coronal	3D - Axial
TR (s)	0.518	4	3.2	4	5	5
TE (ms)	27	113	53	2,48	2,15	3.05
FOV (mm)	180	280	320	300	260	256
Resolution (mm ³)	0.2 x 0.2 x 5	1,1 x 0,9 x 2	0,9 x 0,7 x 3	0,9 x 0,9 x 1	0,7 x 0,7 x 0,7	0,3 x 0,3 x 5
TA (min)	5.26	1.54	2.18	7.18	9.20	5.20

Table 1 - Main sequence parameters.

Dim: Dimension; OR: Orientation; TR: Repetition time; TE : Echo time ; FA : Flip angle ; FOV: Field of view ; TA : Acquisition time.

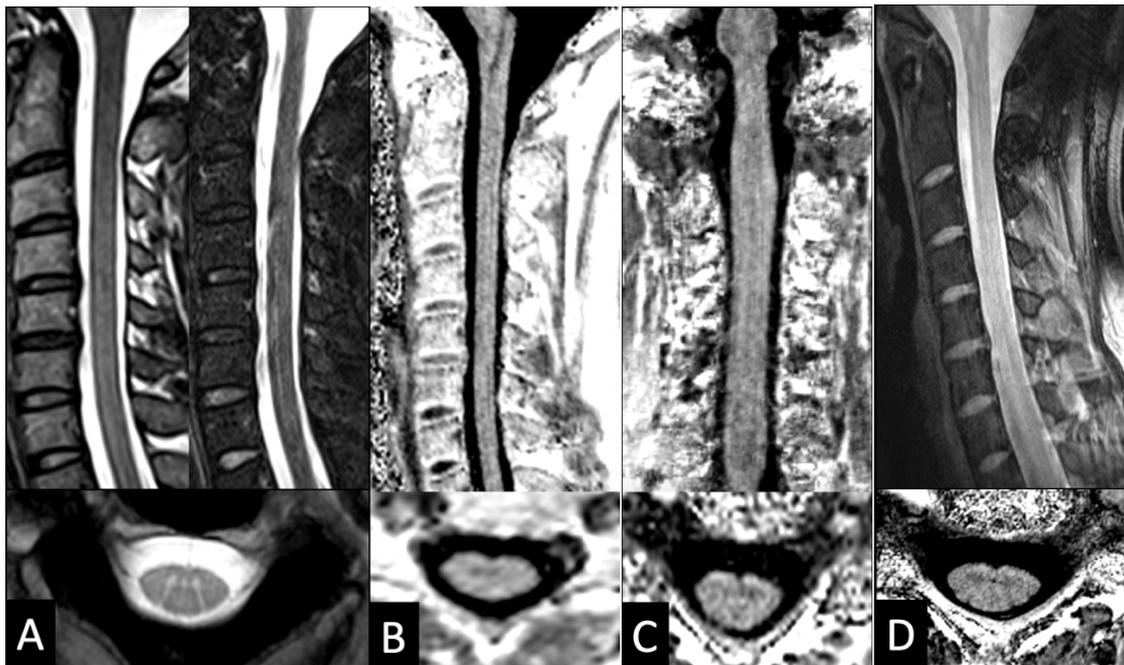


Figure 1– Illustration of MR imaging with the different investigated sequences

Panel A shows the optimized MAGNIMS set including sagittal 2D-T2 WI and STIR WI sequences on top and axial 2D-T2* WI sequence on the bottom.

Panel B shows 3D-MP2RAGE sequence with isotropic resolution at 3T and panel C shows 3D-MP2RAGE sequence with isotropic resolution at 7T, both in sagittal plane above and in axial plane below.

Panel D shows a fast sagittal STIR sequence at the top and the 3D-MP2RAGE sequence with anisotropic resolution at 7T.

Lesion Detection and Scoring

Lesion detection was performed independently by a senior neuroradiologist (BT) and a naive neuroradiologist resident (NF) both blinded to clinical data using the HOROS Viewer (<https://horosproject.org>).

Each set (Optimized MAGNIMS, 3T 3D-MP2RAGE, 7T 3D-MP2RAGE with isotropic resolution and anisotropic resolution) was viewed successively with a three-week delay between each session and the reading order of the subjects was randomly generated for each set to avoid memory bias.

The order of playback of the sequences was established by considering that the sequences acquired at 7T could be more informative and introduce a learning bias if they were observed before the 3T sequences.

The UNI sequence and/or the T1 map of the 3D-MP2RAGE sequence were used for interpretation.

Once all the sequences had been interpreted, a final consensus was reached to establish the final rating of the suspicious lesions with a third expert neurologist. For each lesion, raters specified the level, the location and the confidence (Certain or doubtful).

We retained lesions visible on at least two consecutive sections and whose semiological characteristics were in favour of multiple sclerosis lesions.

The different levels used to locate the lesions correspond to the vertebral levels. If the lesions were opposite the intervertebral disc, they were considered to belong to the overlying level. With regard to the location of the lesions in the transverse section plane, we specified whether they affected the anterior, posterior or lateral cords.

Statistics

We performed descriptive statistics of the cohort. We compared the total number of lesions per level and per sequence. We compared also We also compared the percentage of suspicious lesions per sequence and per rater as well as the distribution of lesions.

All analyses were performed with Statistics in R (<http://www.r-project.org>).

Results

Population

19 patients were included (14 / 5 women / men ; Mean age of 29,4 ; 20 - 46).

18 patients had a recurrent-remittent form of the disease. Our study population had a mild disability, the median EDSS score is 1 (Mean of about 1.3 ; 0 – 6,5) and a short disease duration, the median duration of the disease was 17 months. Six patients in the study were not receiving any therapy. Detailed demographic and clinical characteristics of every patient are summarized in supplemental material.

3D-MP2RAGE sequence with isotropic resolution at 7T was missing for 4 patients.

Features of lesions (Consensus reading) and confidence

The total number of lesions detected for the 15 patients who were able to receive a full scan for each imaging set on the consensus assessment is shown in Figure 2.

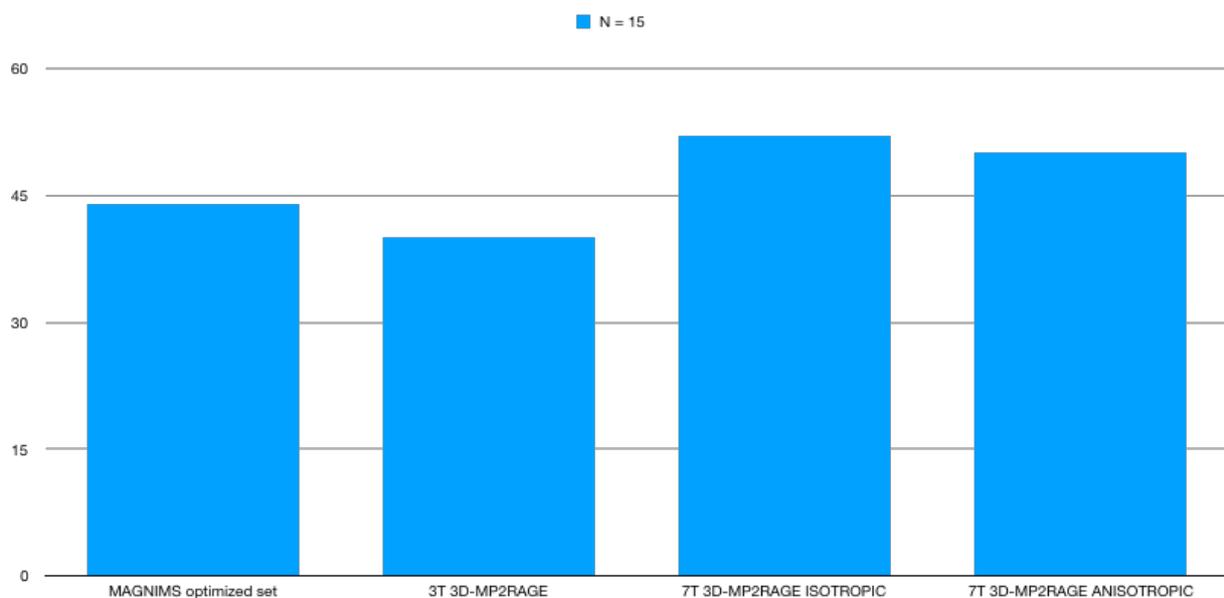


Figure 2- Total number of lesions for N = 15

Across all the segments, the highest total number of lesions per patient was observed on the 7T MP2RAGE isotropic resolution imaging (n= 52), followed by the 7T 3D-MP2RAGE isotropic resolution sequence (n= 50), the 3T MAGNIMS group sequences (n= 44), and the 3T 3D-MP2RAGE sequences (n= 40).

For information, for N = 19, 68 lesions were detected with the optimized MAGNIMS set, 72 with the 3D-MP2RAGE 3T sequence, 52 with the 3D-MP2RAGE 7T sequence at isotropic resolution and 91 with the 3D-MP2RAGE 7T sequence at anisotropic resolution.

According to the consensus data on the 15 patients who had all imaging sets, most lesions were observed at on the first five cervical levels, with a maximum total number of lesions across all sequences at C3 (n= 35) (Figure 2A).

The lowest total number of lesions (n= 13) was detected at C7.

The lowest doubtful rate was observed for the 7T anisotropic 3D-MP2RAGE sequence (23.3%, Figure 2B), while the rate was similar for the other sequences (7T isotropic 3D-MP2RAGE = 29.4%, 3T MAGNIMS group sequences = 32.3% and 3T isotropic 3D-MP2RAGE = 35.6%).

The less experienced reader 1 showed a higher percentage of doubts on all sequences (40.1%) than reader 2 (20.2%).

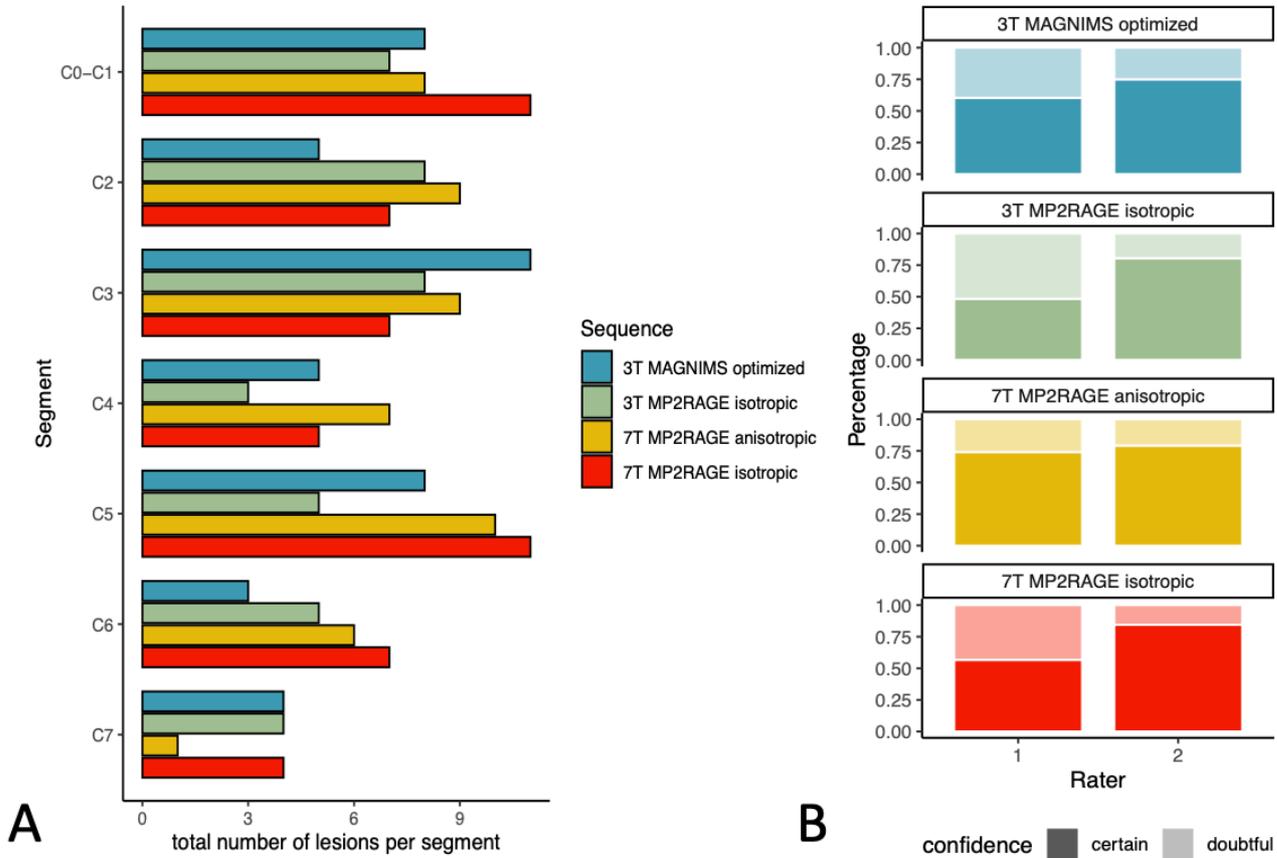


Figure 3 – Distribution of lesions and confidence (N=15)

Panel A shows barplots representing the mean and maximum number of lesions for each segment on each sequence after consensus.

Panel B shows the percentage of signal anomalies classified as definite or doubtful for each of the two raters and each sequence.

Posterior lesions are the most numerous (52% of the total number of lesions for the optimized MAGNIMS set, 52.5% for the 3T 3D-MP2RAGE sequence, 46% for the isotropic 7T 3D-MP2RAGE sequence and 46% for the anisotropic 3T 3D-MP2RAGE sequence).

Lateral cord lesions represent respectively 32% of the lesions detected with the optimized MAGNIMS set, 32.5% of the lesions detected with the 3D-MP2RAGE sequence at 3T, 36.5% of the lesions seen with the isotropic 3D-MP2RAGE sequence at 7T and finally 37.5% of the lesions seen with the anisotropic 3D-MP2RAGE sequence at 7T

Anterior and central lesions are the least numerous (16% of the total number of lesions for the optimized MAGNIMS set, 15% for the 3T 3D-MP2RAGE sequence, 17.5% for the 7T MP2RAGE isotropic sequence and 16% for the 3T MP2RAGE anisotropic sequence).

As an example, here are two lesions from our cohort.

They illustrate the appearance of a lesion on the different sets of images.

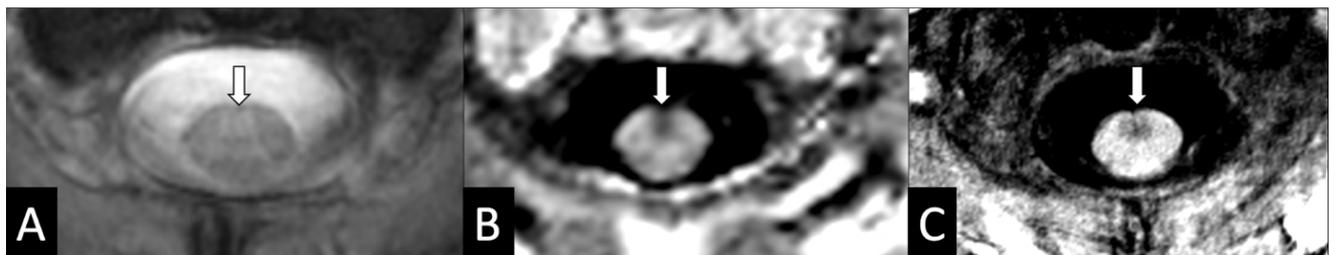


Figure 4 - Example of an anterior disposition lesion

Panel A = Aspect of the lesion at 3T with the axial T2* WI sequence.

Panel B = Appearance at 3T with the MP2RAGE sequence.

Panel C = Lesion appearance at 7T with anisotropic resolution sequence

The two MP2RAGE sequences at 3T and 7T allow a good visualization of this lesion which was not retained during the consensus session when reading the MAGNIMS set.

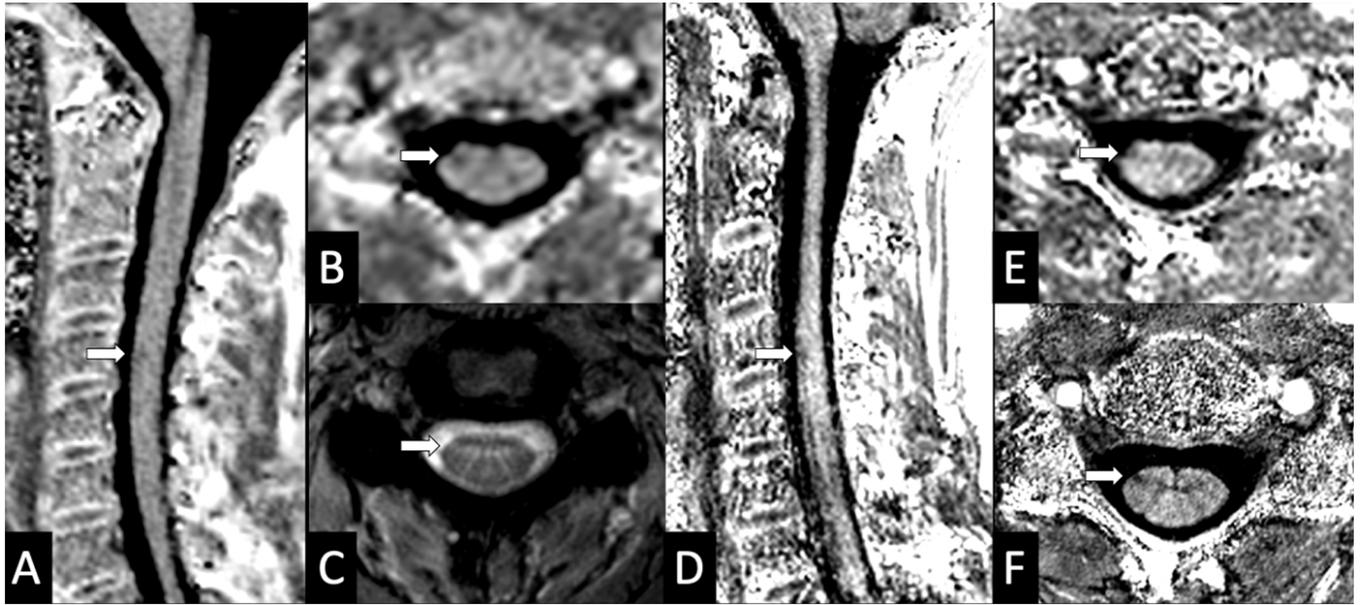


Figure 5 - Example of a right lateral disposition lesion

Panels A and B = Lesion appearance at 3T with MP2RAGE sequence.

Panel C = Aspect of the lesion at 3T with the axial T2* WI sequence.

Panel D and E = Lesion appearance at 7T with the isotropic resolution sequence.

Panel F = Lesion appearance at 7T with anisotropic resolution sequence.

This lesion, not retained during the consensus session at 3T, is much better visible at 7T and described with confidence by both readers with the anisotropic resolution sequence.

Discussion

This study showed promising results on the contribution of ultra-high field 3D-MP2RAGE sequences in cervical spinal cord involvement in MS. The 7T anisotropic MP2RAGE sequences facilitated identification, lesion delineation and especially lesion confidence even for an inexperienced reader compared to the 3T sequences.

In contrast to the results of Demortiere et al¹³, we didn't observe a significant difference in the detection performance of MAGNIMS optimized set and the MP2RAGE 3T set. We used an axial 2D-T2* WI sequence in addition with the MAGNIMS recommended sagittal plans because it was available in our imaging protocol and because it is frequently performed in clinical practice. Many lesions with a typical radiological pattern of MS lesion are often visible on this sequence and not on the sagittal planes. The systematic use of this sequence considered optional according to the latest guidelines¹⁹ explains the relative success of our optimized MAGNIMS. The 2D-T2* WI provides a high in-plane axial resolution and a high white matter / gray matter contrast and is recommended in spinal cord research protocols for its usefulness in registration and for spinal cord segmentation²⁰.

However, the 3D-MP2RAGE sequence has several additional advantages compared to the sequences recommended by the MAGNIMS consensus. With a better inter-rater agreement, a shorter acquisition time and an isotropic acquisition, 3D-MP2RAGE appeared to be a good alternative to MAGNIMS set in clinical practice. The 3D-MP2RAGE sequence at 3T also has the particularity of imaging both the brain and the cervical cord¹⁷. As multiple sclerosis affects the entire central nervous system, it is particularly relevant to be able to carry out a good resolution isotopic acquisition in a relatively short time for both the brain and the cervical cord.

In line with the literature¹¹, the expected increase in CNR and SNR at ultra-high field¹⁰ enhances the image resolution which facilitates interpretation for the readers even in the case of numerous and coalescing lesions or inexperience, resulting in an improvement in the rate of doubtful lesions. 7T 3D-MP2RAGE with anisotropic resolution allows better lesion delineation leading to a more accurate and reliable counting. The readers were able on several occasions to confirm the presence of

lesions hardly visible or referred to as nonspecific signal anomalies by the images performed at 3T thanks to this sequence. This sequence allows the less experienced reader to assess the lesions with much greater confidence, comparable to that of the experienced reader. The use of a the 7T MP2RAGE sequence with high anisotropic resolution could find its place in the fine characterization of cervical myelitis or to better appreciate possible doubtful lesions. Nevertheless, this sequence has the disadvantage of having a complementary sagittal plane to identify the lesion level. This sequence also suffers from partial volume effect at the C7 level due to the curvature of the cervical spine.

The 7T 3D-MP2RAGE with isotropic resolution sequence was less successful for the less experienced rater. This could be attributed to a particularly long duration of almost ten minutes and completion at the end of the examination in the research protocol, causing motion artefacts and degradation of image quality, more affecting the inexperienced reader. The 3D isotropic acquisition offers however the possibility of reconstructing images in all three planes, which allows for a more comfortable reading for the raters. Furthermore, promising "Compressed-sensing" technologies²¹ could reduce acquisition time in the future and improve the quality of this sequence. Finally, the number of suspicious lesions in the inexperienced reader improved between the interpretation of the 3T 3D-MP2RAGE set and the 7T 3D-MP2RAGE isotropic set while it remained relatively stable in the experienced reader which may reflect a learning effect of the isotropic MP2RAGE sequence.

According to the consensus assessment, C3 level had the highest number of lesions and lesions in the posterior and lateral cords were the most numerous. These results are consistent with the literature^{22,23}. We did not find a radiological pattern better detected at 7T than on the other sets. The pattern of lesion distribution was similar between sets when considering the fifteen patients who could be evaluated by all sequences. This result is not surprising if we consider the results of the work of Lefeuvre et al. in 2020²⁴. They were able to establish the existence of two distinct types of lesions in multiple sclerosis (Focal white matter lesions corresponding to the multiple sclerosis lesions we are used to describing and sub-pial white matter lesions which so far have not been reported in MS) using an animal EAE (Experimental

autoimmune encephalomyelitis) model of the spinal cord that was studied using a combined ex-vivo MRI and histological study.

The sub-pial lesions are reported to be subtle and difficult to visualize by 7T MRI despite the ideal conditions of the examinations carried out (Ex-vivo and prior laminectomy) due to magnetic susceptibility artefacts which prevented these small lesions at the edge of the spinal cord from being seen.

It can be assumed that the examination conditions of our study (UHF imaging done on humans in-vivo) simply do not allow to see possible injuries of this type.

We can hope that future technical progress will make it possible to eliminate these annoying artefacts and allow the visualization of this type of lesion.

Our study has several limitations. It's a retrospective study with a small sample size. A further study with a larger sample size is needed to confirm our results. However, our lesion features are comparable to those in the literature and provide a representative sample of spinal cord injury in MS.

The learning effect on readers is a potential bias in this work. The learning effect may have led to an improvement in the performance of the readers, especially the less experienced one for MP2RAGE sequences. However, the experience of imaging at 7T seems to improve the performance of radiologists at 3T. For this reason, we performed the interpretation of the images in several sessions spaced at least three weeks to limit the biases related to the memorization of the lesions and we started by the 3T imaging sets. There is also an inevitable subjectivity in the interpretation of images by radiologists. Finally, the sequences that we compare in our study are not completely identical (Resolution in particular). It is necessary to recall the difficulty of transposing the sequences from 3T to 7T because of the technical constraints linked to the increase in the magnetic field¹⁰.

In conclusion, 7T 3D-MP2RAGE sequence detected more lesion than 3T sets with a good lesion confidence. 3T 3D-MP2RAGE seems to constitute a good alternative to the conventional MAGNIMS with the optional axial 2D-T2* WI sequence set in clinical practice but may require reading practice. The clinical perspectives of 7T MRI require technical advances to image the thoracic and lumbar spinal cord and a reduction in acquisition times.

Acknowledgments

The authors thank V.Gimenez, L.Pini, C.Costes, S. Mchinda, P. Durozard, A. Rico, A. Maarouf and M.P. Ranjeva for study logistics.

Fundings

This work was supported by the ARSEP Foundation (Fondation pour l'Aide à la recherche sur la Sclérose en Plaques) and CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique). It was performed within a laboratory member of France Life Imaging network (grant ANR-11-INBS-0006), on the platform 7T-AMI, a French "Investissements d'Avenir" programme (grant ANR-11-EQPX-0001).

References

1. Bot JCJ, Blezer ELA, Kamphorst W, et al. The Spinal Cord in Multiple Sclerosis: Relationship of High-Spatial-Resolution Quantitative MR Imaging Findings to Histopathologic Results. *Radiology* 2004;233:531–40.
2. Gass A, Rocca MA, Agosta F, et al. MRI monitoring of pathological changes in the spinal cord in patients with multiple sclerosis. *The Lancet Neurology* 2015;14:443–54.
3. Brownlee WJ, Altmann DR, Prados F, et al. Early imaging predictors of long-term outcomes in relapse-onset multiple sclerosis. *Brain* 2019;142:2276–87.
4. Thompson AJ, Banwell BL, Barkhof F, et al. Diagnosis of multiple sclerosis: 2017 revisions of the McDonald criteria. *The Lancet Neurology* 2018;17:162–73.
5. Filippi M, Rocca MA, Ciccarelli O, et al. MRI criteria for the diagnosis of multiple sclerosis: MAGNIMS consensus guidelines. *The Lancet Neurology* 2016;15:292–303.
6. Weier K, Mazraeh J, Naegelin Y, et al. Biplanar MRI for the assessment of the spinal cord in multiple sclerosis. *Mult Scler* 2012;18:1560–9.
7. Galler S, Stellmann J-P, Young KL, et al. Improved Lesion Detection by Using Axial T2-Weighted MRI with Full Spinal Cord Coverage in Multiple Sclerosis. *American Journal of Neuroradiology* 2016;37:963–9.
8. Bergers E, Bot JCJ, De Groot CJA, et al. Axonal damage in the spinal cord of MS patients occurs largely independent of T2 MRI lesions. *Neurology* 2002;59:1766–71.
9. Vargas MI, Boto J, Meling TR. Imaging of the spine and spinal cord: An overview of magnetic resonance imaging (MRI) techniques. *Revue Neurologique* 2021;177:451–8.
10. Barry RL, Vannesjo SJ, By S, et al. Spinal cord MRI at 7T. *NeuroImage* 2018;168:437–51.
11. Dula AN, Pawate S, Dortch RD, et al. Magnetic resonance imaging of the cervical spinal cord in multiple sclerosis at 7T. *Mult Scler* 2016;22:320–8.
12. Kreiter DJ, van den Hurk J, Wiggins CJ, et al. Ultra-high field spinal cord MRI in multiple sclerosis: Where are we standing? A literature review. *Multiple Sclerosis and Related Disorders* 2022;57:103436.
13. Demortière S, Lehmann P, Pelletier J, et al. Improved Cervical Cord Lesion Detection with 3D-MP2RAGE Sequence in Patients with Multiple Sclerosis. *AJNR Am J Neuroradiol* 2020;41:1131–4.
14. Marques JP, Kober T, Krueger G, et al. MP2RAGE, a self bias-field corrected sequence for improved segmentation and. *Neuroimage* 2010;49:1271–81.
15. Okubo G, Okada T, Yamamoto A, et al. MP2RAGE for deep gray matter

measurement of the brain: A comparative study with MPRAGE: MP2RAGE for Deep Gray Matter Measurement. *J Magn Reson Imaging* 2016;43:55–62.

16. Marques JP, Gruetter R. New Developments and Applications of the MP2RAGE Sequence - Focusing the Contrast and High Spatial Resolution R1 Mapping. Yacoub E, ed. *PLoS ONE* 2013;8:e69294.

17. Forodighasemabadi A, Rasoanandrianina H, El Mendili MM, et al. An optimized MP2RAGE sequence for studying both brain and cervical spinal cord in a single acquisition at 3T. *Magnetic Resonance Imaging* 2021;84:18–26.

18. Massire A, Taso M, Besson P, et al. High-resolution multi-parametric quantitative magnetic resonance imaging of the human cervical spinal cord at 7T. *NeuroImage* 2016;143:58–69.

19. Wattjes MP, Ciccarelli O, Reich DS, et al. 2021 MAGNIMS–CMSC–NAIMS consensus recommendations on the use of MRI in patients with multiple sclerosis. *The Lancet Neurology* 2021;20:653–70.

20. Cohen-Adad J, Alonso-Ortiz E, Abramovic M, et al. Generic acquisition protocol for quantitative MRI of the spinal cord. *Nat Protoc* 2021;16:4611–32.

21. Mussard E, Hilbert T, Forman C, et al. Accelerated MP2RAGE imaging using Cartesian phyllotaxis readout and compressed sensing reconstruction. *Magn Reson Med* 2020;84:1881–94.

22. Eden D, Gros C, Badji A, et al. Spatial distribution of multiple sclerosis lesions in the cervical spinal cord. *Brain* 2019;142:633–46.

23. Kearney H, Miller DH, Ciccarelli O. Spinal cord MRI in multiple sclerosis—diagnostic, prognostic and clinical value. *Nat Rev Neurol* 2015;11:327–38.

24. Lefeuvre JA, Guy JR, Luciano NJ, et al. The spectrum of spinal cord lesions in a primate model of multiple sclerosis. *Mult Scler* 2020;26:284–93.

FIGURES AND TABLES

Figure 1– Illustration of MR imaging with the different investigated sequences

Panel A shows the optimized MAGNIMS set including sagittal 2D-T2 WI and STIR WI sequences on top and axial 2D-T2* WI sequence on the bottom.

Panel B shows 3D-MP2RAGE sequence with isotropic resolution at 3T and panel C shows 3D-MP2RAGE sequence with isotropic resolution at 7T, both in sagittal plane above and in axial plane below.

Panel D shows a fast sagittal STIR sequence at the top and the 3D-MP2RAGE sequence with anisotropic resolution at 7T.

Figure 2 – Distribution of lesions and confidence.

Panel A shows barplots representing the mean and maximum number of lesions for each segment on each sequence after consensus.

Panel B shows barplots representing the total number of lesions for each segment on each sequence after consensus.

Figure 3 - Total number of lesions for N = 19 and N = 15

Figure 4 - Example of an anterior disposition lesion

Panel A = Aspect of the lesion at 3T with the axial T2* WI sequence.

Panel B = Appearance at 3T with the MP2RAGE sequence.

Panel C = Lesion appearance at 7T with anisotropic resolution sequence

Figure 5 - Example of a right lateral disposition lesion

Panels A and B = Lesion appearance at 3T with MP2RAGE sequence.

Panel C = Aspect of the lesion at 3T with the axial T2* WI sequence.

Panel D and E = Lesion appearance at 7T with the isotropic resolution sequence.

Panel F = Lesion appearance at 7T with anisotropic resolution sequence.

Table 1 - Main sequence parameters.

Dim: Dimension; OR: Orientation ; TR : Repetition time ; TE : Echo time ; FA : Flip angle ; FOV: Field of view ; TA : Acquisition time.

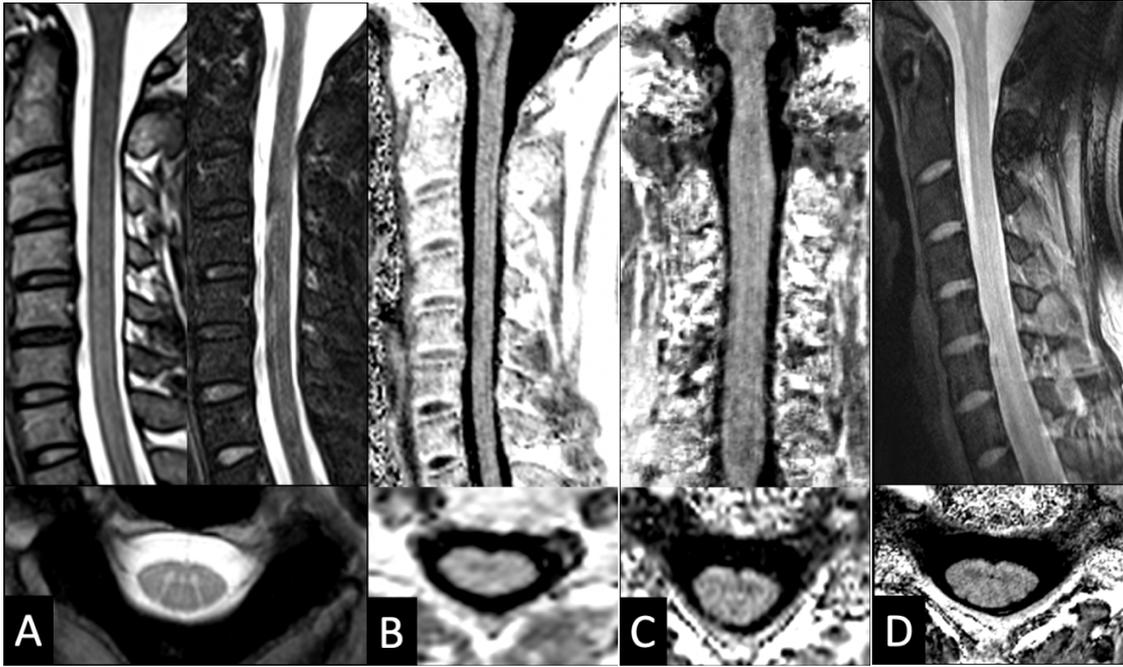


Figure 1

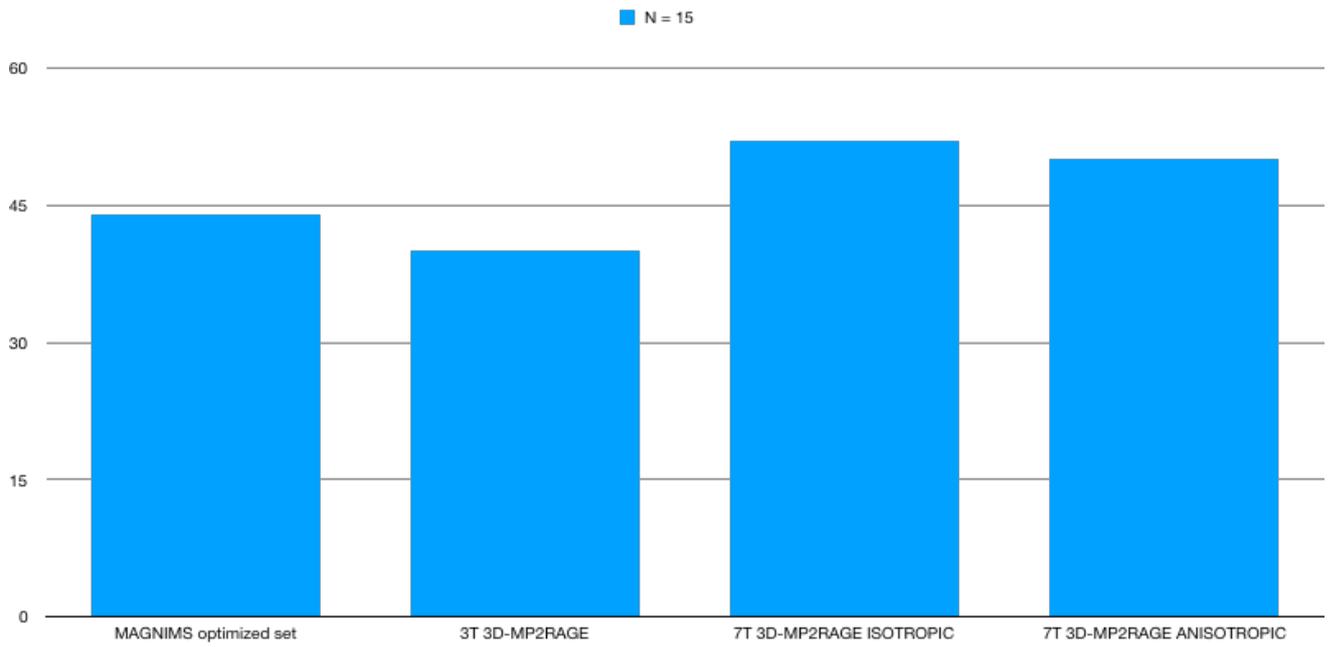


Figure 2

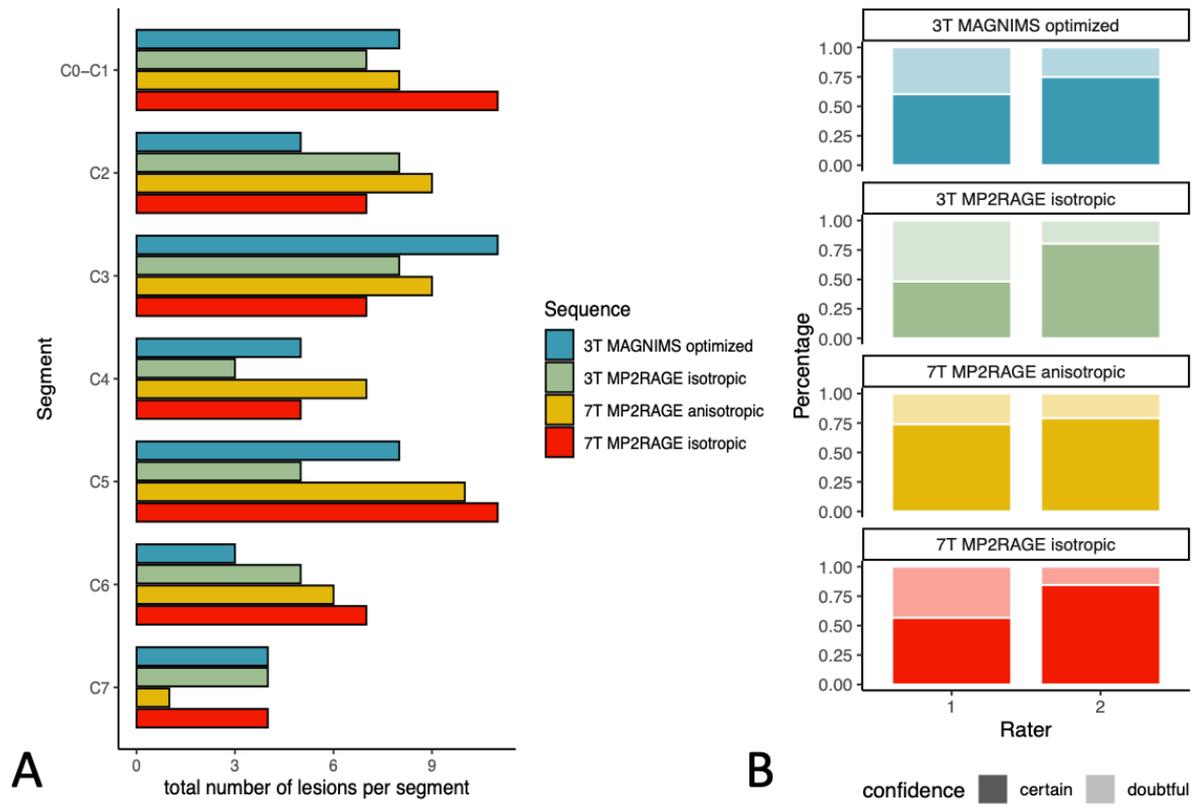


Figure 3

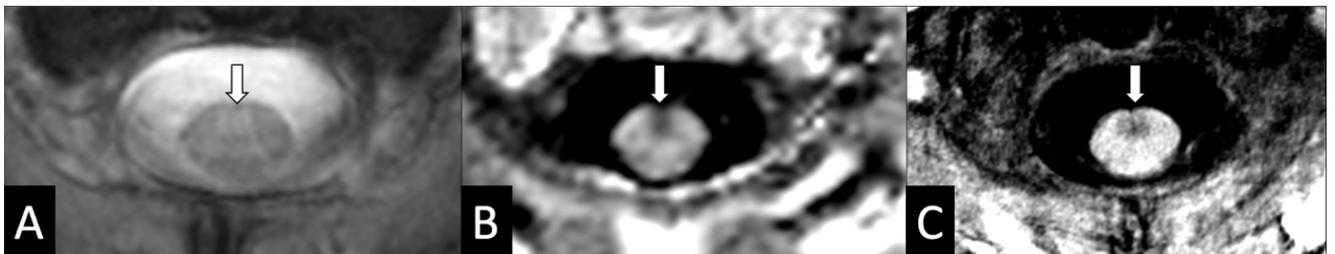


Figure 4

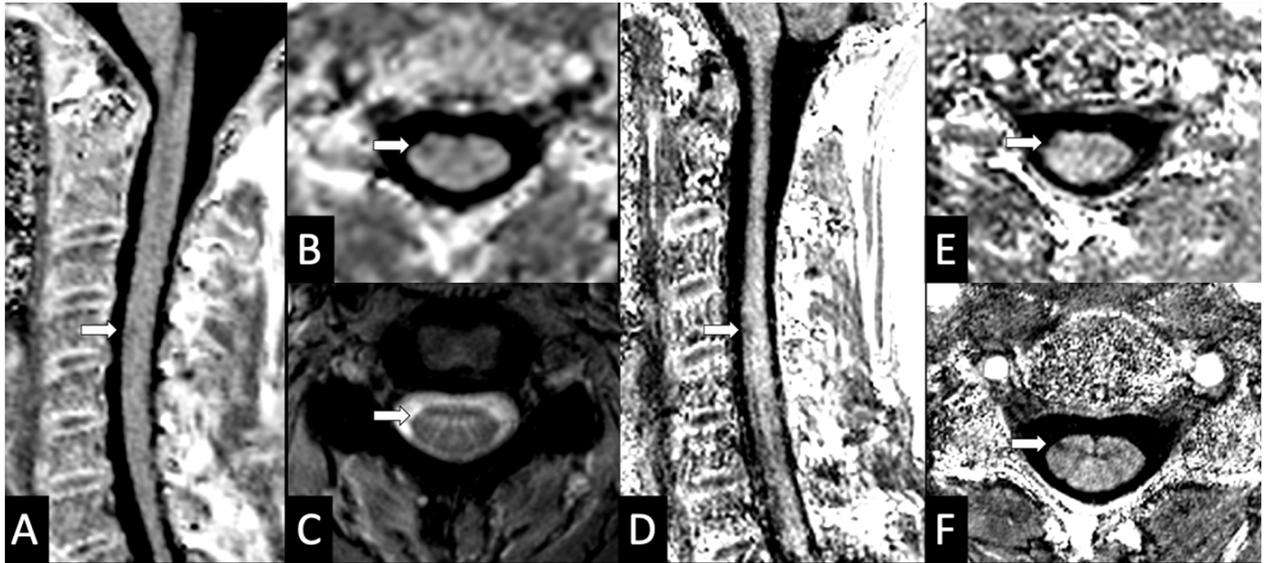


Figure 5

Sequence	T2EG-WI (2 slabs)	T2-WI	STIR-WI	MP2RAGE at 3T	MP2RAGE 7T ISOTROPIC	MP2RAGE 7T ANISOTROPIC
Dim / OR	2D - Axial	2D - Sagittal	2D - Sagittal	3D - Sagittal	3D - Coronal	3D - Axial
TR (s)	0.518	4	3.2	4	5	5
TE (ms)	27	113	53	2,48	2,15	3.05
FA (°)	28	-	-	4 / 5	4 / 5	4 / 5
FOV (mm)	180	280	320	300	260	256
Resolution (mm ³)	0.2 x 0.2 x 5	1,1 x 0,9 x 2	0,9 x 0,7 x 3	0,9 x 0,9 x 1	0,7 x 0,7 x 0,7	0,3 x 0,3 x 5
TA (min)	5.26	1.54	2.18	7.18	9.20	5.20

Table 1

Additional material

	Age (years)	Sexe	Disease course	Disease duration (month)	Treatment	EDSS
Subject 1	40	M	PP	95	RITUXIMAB	2
Subject 2 *	20	F	RR	58	RITUXIMAB	2,5
Subject 3	30	F	RR	87	TYSABRI	1,5
Subject 4	27	F	RR	17	CYMBALTA	3
Subject 5	23	F	RR	47	None	0
Subject 6	31	F	RR	6	None	0
Subject 7	46	F	RR	42	FAMPYRA	6,5
Subject 8	35	F	RR	33	GILENYA	1
Subject 9	28	F	RR	6	TYSABRI	0
Subject 10	38	F	RR	7	TERIFLUNOMIDE	1
Subject 11	33	M	RR	17	None	0
Subject 12	31	F	RR	189	GILENYA	0
Subject 13	41	F	RR	45	TYSABRI	1
Subject 14	26	M	RR	12	None	0
Subject 15	20	M	RR	44	TECFIDERA	0
Subject 16	30	F	RR	10	None	1
Subject 17 *	35	M	RR	11	GILENYA	2
Subject 18 *	26	F	RR	10	RITUXIMAB	1
Subject 19 *	37	F	RR	16	None	0

Demographic and clinical characteristics

PP= primary progressive, RR: relapsing remitting, EDSS= Expanded Disability Status Scale.

“ Au moment d’être admis(e) à exercer la médecine, je promets et je jure d’être fidèle aux lois de l’honneur et de la probité.

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

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

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

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

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

Admis(e) dans l’intimité des personnes, je tairai les secrets qui me seront confiés. Reçu(e) à l’intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs.

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

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

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

Que les hommes et mes confrères m’accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses; que je sois déshonoré(e) et méprisé(e) si j’y manque. ”



Résumé

Contexte et objectif

La détection des lésions de la moelle épinière chez les patients atteints de sclérose en plaques est difficile en utilisant les séquences recommandées par le consensus MAGNIMS. La séquence 3D-MP2RAGE a démontré son utilité à 3T pour la détection de ce type de lésion.

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'apport de la séquence 3D-MP2RAGE acquise à 7T pour la détection des lésions de sclérose en plaques dans la moelle cervicale.

Matériaux et méthodes

Dix-neuf patients atteints de SEP ont subi un examen d'imagerie par IRM de la moelle épinière cervicale comprenant le protocole de MAGNIMS avec des images axiales pondérées T2*, la séquence 3D-MP2RAGE isotrope 3T et les séquences isotrope et anisotrope 3D-MP2RAGE à 7T.

Chaque ensemble de données a été lu indépendamment par deux radiologues.

Le consensus a été fait avec un troisième évaluateur. Le nombre de lésions, leur topographie et le degré de confiance ont été analysés.

Résultats

La séquence 3D-MP2RAGE à résolution isotrope à 7 Tesla manquait pour quatre patients.

Pour N = 15, 44 lésions ont été détectées avec l'ensemble des séquences de MAGNIMS optimisé, 40 avec la séquence 3D-MP2RAGE 3T, 52 avec la séquence 3D-MP2RAGE 7T à résolution isotrope et 50 avec la séquence 3D-MP2RAGE 7T à résolution anisotrope.

Le taux le plus faible de lésions notées douteuses a été observé avec la séquence 3D-MP2RAGE 7T (15,5 % pour le deuxième évaluateur sur la séquence isotrope et 25,9 % pour le premier évaluateur sur la séquence anisotrope).

Conclusion

Les séquences 3D-MP2RAGE à 7T ont détecté plus de lésions que tous les autres ensembles avec une confiance élevée pour les deux évaluateurs.

La séquence 3D-MP2RAGE 3T s'est avérée être une bonne alternative au set formé par les séquences de MAGNIMS avec la séquence axiale optionnelle 2D-T2* WI dans la pratique clinique.

Key words : Ultra-high field imaging ; Multiple sclerosis ; Spinal cord ; 3D-MP2RAGE