

Rapport de Stage – Master Intelligence des Données de Santé:
Laboratoire : ICube, équipe IMIS: Étude morphoanatomique par segmentation du Cavum Vergae dans une cohorte de footballeurs professionnels – Projet TC Foot.

Les traumatismes crâniens répétés représentent un enjeu de santé publique croissant dans le sport de haut niveau, en particulier dans les disciplines où les impacts à la tête, bien que parfois des sous-commotions cérébrales, sont fréquents. Le football professionnel n'échappe pas à cette problématique. Au cours d'une carrière, les joueurs peuvent être exposés à plusieurs centaines, voire milliers de chocs crâniens de faible intensité, notamment lors des réceptions de ballon par la tête.

Des études en biomécanique ont permis de quantifier l'intensité de ces impacts. Notamment, Naunheim et al. (2003) ont estimé qu'un ballon frappant la tête à une vitesse de 50 à 60 km/h pouvait générer une force d'impact de l'ordre de 1 000 à 1 500 newtons, selon la zone touchée. Bien que ces forces soient souvent inférieures au seuil de déclenchement d'une commotion cérébrale, leur répétition au fil des années pourrait induire des altérations tissulaires de faible intensité invisibles cliniquement, mais potentiellement détectables par l'imagerie cérébrale.

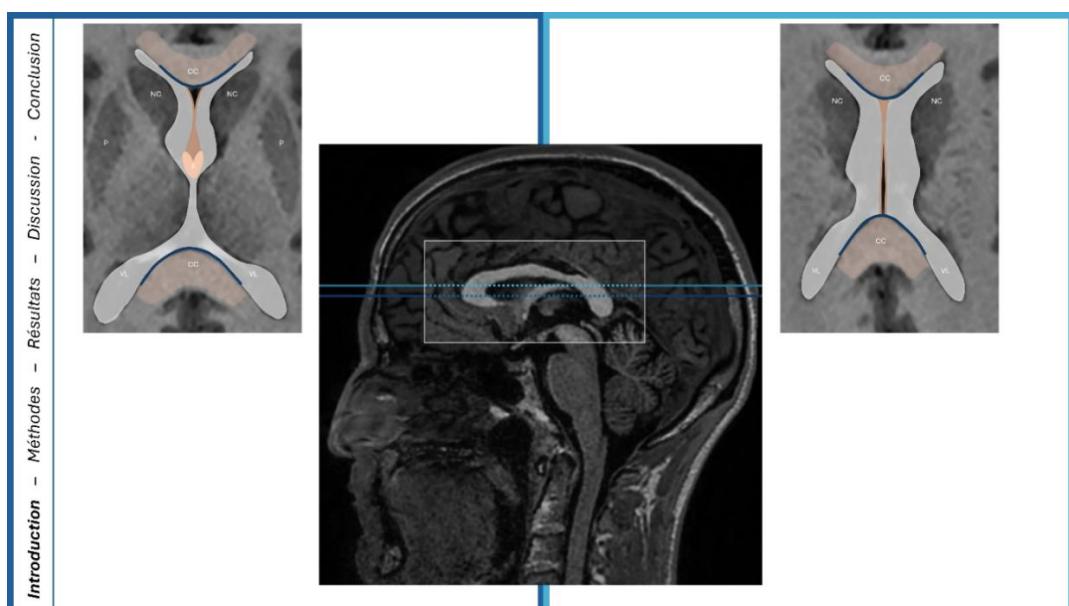
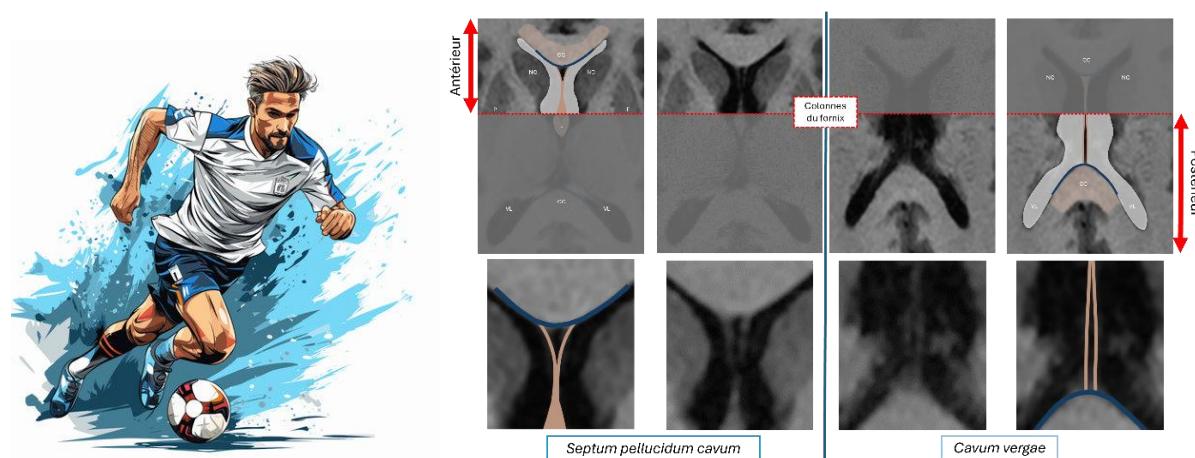
C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet TC-FOOT, porté par le groupe IMIS au sein du laboratoire ICube qui vise à explorer les conséquences cérébrales à long terme des impacts crâniens répétitifs chez les anciens joueurs professionnels de football, en utilisant une approche par IRM multimodale. Le protocole repose sur une étude transversale comparative, incluant d'une part des anciens footballeurs professionnels et d'autre part des témoins sportifs.

Parmi les cibles anatomiques d'intérêt figure une structure encore peu étudiée (car rare et de caractère pathogénique incertain dans ce contexte : le Cavum Vergae. Il s'agit d'une petite cavité médiane située entre les feuillets du septum pellucidum, en arrière des colonnes du fornix, une formation embryologique normalement collabée à l'âge adulte. Cette structure communique parfois avec le Septum Pellucidum Cavum, une autre cavité normalement collabée chez l'adulte, qui est étudiée dans le cadre de l'étude TC-FOOT mais qui n'est pas l'objet d'étude du présent rapport. Pourtant, plusieurs travaux ont mis en évidence une prévalence accrue du Septum Pellucidum

Cavum et du Cavum Vergae chez des athlètes ayant subi des traumatismes crâniens répétés, notamment dans le football américain (de la ligue NFL) ou les sports de combat (la boxe anglaise). En effet, des études nord-américaines ont démontré que la présence d'un Septum Pellucidum et du Cavum Vergae, est beaucoup plus fréquente chez les anciens joueurs de football américain et de boxe, comparativement à des témoins sains, avec des proportions significatives (Gardner et al. (2016), McAllister et al. (2021) ou encore Lee et al. (2017)...).

Le projet TC-FOOT, orienté vers le football s'inscrit dans la continuité de ces travaux. Il constitue une avancée dans la recherche française sur les séquelles cérébrales du sport, en transposant une problématique longtemps dominée par les études nord-américaines à un cadre européen.

C'est dans ce cadre que s'inscrit mon stage de Master, réalisé sous la direction de Lucile Haussler au sein de l'équipe IMIS. Mon travail a porté sur l'étude morphoanatomique du cavum Vergae à partir des séquences IRM 3D MPRAGE issues de la cohorte TC-FOOT.



Mes objectifs :

- Appliquer une démarche rigoureuse de traitement d'image pour segmenter le Cavum Vergae IRM à l'aide de la séquence 3D MPRAGE,
- Mobiliser les outils d'analyse de données pour quantifier ses caractéristiques (volume, voxels),
- Comparer la morphologie du Cavum Vergae entre différents profils de sujets,
- Mettre en lien les observations anatomiques avec des hypothèses biomédicales,
- Poser les fondations d'un outil automatisé pour une future détection assistée par intelligence artificielle.

Méthodologie :

Nous avons utilisé la séquence 3D MPRAGE, réputée pour sa qualité en morphométrie cérébrale. Elle permet une résolution isotrope et un contraste T1 favorable à l'identification des cavités médianes.

J'ai utilisé le logiciel ITK-SNAP pour effectuer la segmentation manuelle du Cavum Vergae, en naviguant entre les plans sagittal, coronal et axial. La coupe de référence pour la segmentation du Cavum Vergae est la coupe coronale. Cette étape nécessitait à la fois rigueur anatomique et méthode reproductible.

Les mesures issues de la segmentation ont été compilées dans un tableau de données sous format « csv » sur Excel, enrichi manuellement avec des rectifications, puis traité dans un environnement Python. En tant qu'étudiant en intelligence des données de santé, j'ai structuré l'analyse autour d'indicateurs statistiques robustes : moyenne, écart-type, quartiles, visualisation graphique (boxplots, scatterplots).

On distingue 3 catégories de Cavum Vergae:

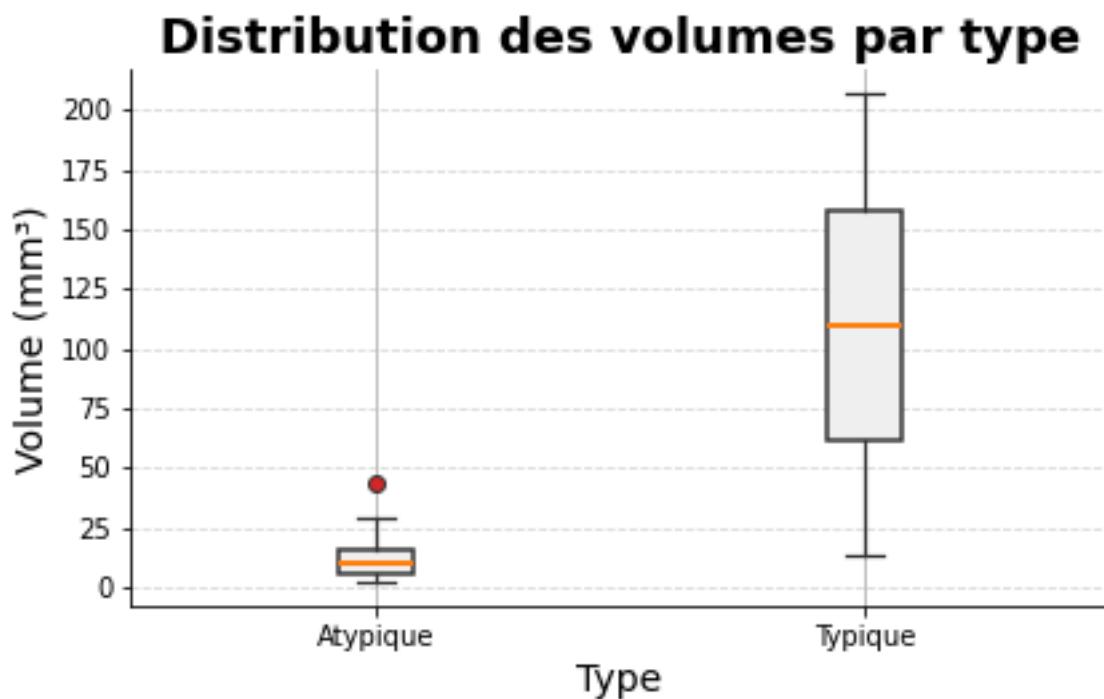
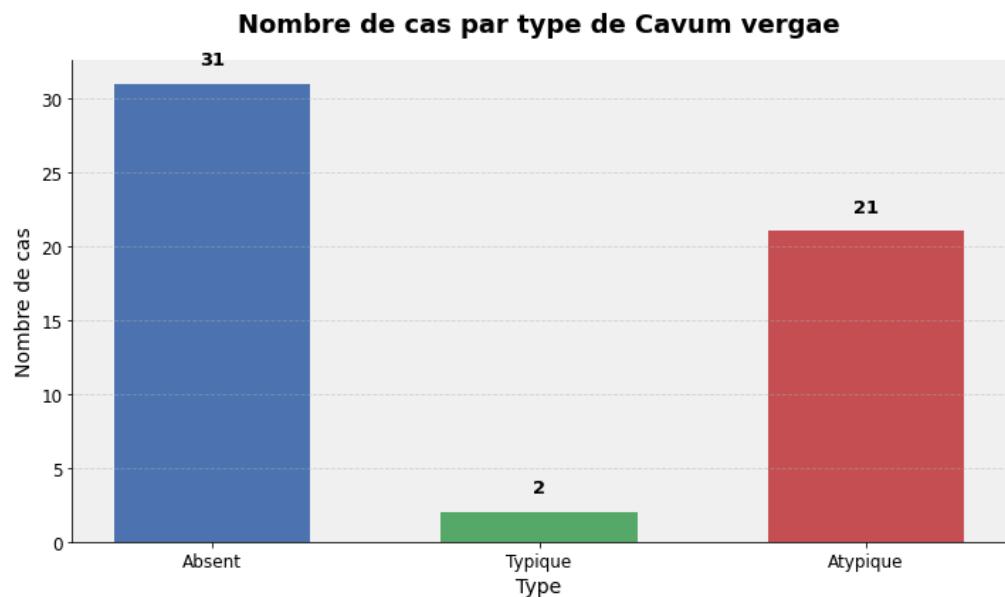
- Absent : aucune cavité visible,
- Typique : cavité bien formée, linéaire et médiane, telle que décrite dans la littérature.
- Atypique : forme irrégulière ou latéralisée.

William PALOMBIER

Ces 2 images sont la représentation du format « csv ». Au total, pour mes 70h de stage, je devais mesurer puis segmenter les 63 patients mais étant donné que certains numéros n'étaient pas accessibles, je n'ai pu que mesurer 54 patients. J'ai par ailleurs effectué un travail bibliographique tout au long du stage :

Identifiant	Cavum vergae (0 = non, 1 = typique, 2 = atypique)	Volume (en mm3)	Nombre de voxels			
KC 01	0					
SJ 02	0					
AR 03	0					
LG 04	2 17.75	142				
SS 06	2 7.75	62				
DF 07	2 2.75	22				
KG 08	2 28.75	230				
NV 09	0					
SY 10	0					
KF 11	0					
VP 12	2 7.125	57				
VG 13	0					
AY 14	2 5.25	42				
FJ 15	0					
OQ 16	0					
JN 18	0					
RS 19	0					
SC 20	1 206.9	1655				
CJ 21	0					
MS 22	0					
FJ 23	2 15.125	121				
SF 24	0	US 45	2 21.88	175		
BE 26	2 14.374	86	JP 46	0		
CS 27	2 3.923	27	GN 47	0		
MB 28	0	HR 48	2 12.375	99		
SD 29	1 13.38	107	PF 49	0		
FC 30	2 29.75	238	JF 50	0		
GF 31	0	HT 51	0			
CP 32	verrouillée	BR 52	0			
CE 33	verrouillée	GR 53	2 3.25	26		
GB 34	verrouillée	MP 54	2	9	72	
CF 35	0	ND 55	2 15.32		104	
GL 36	0	DL 56	0			
CT 37	2 10.63	85	DM 57	0		
CM 38	0	LT 58	verrouillé			
GP 39	2 10.63	85	CD 59	sous format zip		
HD 40	2 5.25	42	TD 60	0		
CJ 41	0	BG 61	0			
AB 42	0	SF 62	2 5.958	41		
MB 43	2 44.26	354	SG 63	format zip		
BL 44	2 5.086	35	BP 64	?		
			GK 65	?		

Résultats :



Type	Effectif	Volume moyen (mm ³)	Médiane Volume	Écart-type Volume	Min	Max	Moyenne Voxels	Écart-type Voxels
Absent	31	-	-	-	-	-	-	-
Typique	2	110.14	110.14	136.84	13.38	206.90	881.00	1094.60
Atypique	21	13.15	10.63	10.54	2.75	44.26	102.14	84.93

Ces résultats mettent en évidence plusieurs éléments d'interprétation :

- Le type « Absent » domine numériquement ($n = 31$), ce qui reste cohérent avec la littérature indiquant une disparition naturelle du Cavum Vergae à l'âge adulte dans la majorité des cas.
- Les Cavums typiques, bien que très rares ($n = 2$), présentent des volumes élevés et une grande variabilité (écart-type $> 100 \text{ mm}^3$). Ces formes pourraient correspondre à une persistance embryologique complète de la cavité, observable de manière exceptionnelle chez l'adulte, ou à une lésion acquise dans le contexte des traumatismes crâniens répétés.
- Les Cavums atypiques sont les plus représentés parmi les formes visibles. Leur volume moyen modeste, mais surtout leur dispersion importante, suggèrent une grande hétérogénéité morphologique. Cette variabilité pourrait refléter des lésions acquises ou des formes physiologiques intermédiaires, pour l'instant non caractérisées dans la littérature.

L'observation attentive de cette distribution confirme l'hypothèse selon laquelle le Cavum Vergae, lorsqu'il est présent, n'est pas toujours conforme à une présentation « typique » linéaire et centrée. Les formes atypiques, plus discrètes, pourraient avoir échappé à la détection dans d'autres études moins focalisées sur cette structure. Par ailleurs, une acquisition IRM présentant un contraste et une résolution optimisés est une condition essentielle à la mise en évidence de cette structure.

Ces résultats pourraient motiver l'analyse du Cavum Vergae dans les cohortes exposées à des traumatismes répétés.

Cette étude m'a permis de croiser deux dimensions complémentaires de ma formation : la lecture médicale des structures anatomiques (consigne principale) et la formalisation mathématique des données (ajout personnel). En observant les volumes segmentés et leur typologie, j'ai constaté que les formes atypiques, bien que moins classiques, étaient paradoxalement les plus fréquentes chez les footballeurs comparativement aux témoins sportifs. Cette forme pourrait représenter des

remodelages tissulaires liés à des microlésions successives, conséquences des impacts répétés.

J'ai pu prendre en compte quelques travaux qui m'ont permis de bien m'éclaircir en corrélation avec le sujet.

Tout d'abord, les travaux de Gardner et al. (2016) et McAllister et al. (2021) : qui ont mis en évidence une prévalence accrue du Septum Pellucidum chez les athlètes ayant subi des traumatismes crâniens répétés. Même si ces études ne mentionnent pas directement le Cavum Vergae, sa contiguïté anatomique avec le Septum Pellucidum et leur origine embryologique commune renforcent l'idée de mécanismes pathogènes partagés en cas de stress cérébral chronique.

Ensuite, plus récemment, Alosco et al. (2021) qui ont montré que les individus atteints d'encéphalopathie traumatique chronique, confirmée à l'autopsie, présentent une atrophie frontale et temporale marquée, ainsi qu'une prévalence significativement accrue du Septum Pellucidum. Cette étude associe également la sévérité des dépôts de protéine tau hyperphosphorylée (p-tau) à des anomalies détectables à l'IRM, confirmant l'intérêt de biomarqueurs morphologiques visibles *in vivo*.

Les travaux de Lee et al. (2017), dans une large cohorte de combattants professionnels, ont quant à eux démontré une prévalence significativement augmentée du Cavum Vergae (14.4 % chez les combattants versus 0 % chez les témoins), et une corrélation directe entre la longueur du Septum Pellucidum + le Cavum Vergae et le nombre de combats pratiqués. Ces résultats apportent une preuve directe que le Cavum Vergae, bien que souvent négligé, est bien un marqueur potentiellement sensible à l'exposition aux traumatismes crâniens répétés.

Et enfin, Born et al. (2004) ont décrit la prévalence naturelle des variantes du septum pellucidum, dont le Cavum Vergae, dans une population saine. Ils ont observé une fréquence de 39 % chez les jeunes adultes et de 36 % chez les personnes âgées, ce qui souligne l'intérêt de distinguer les formes physiologiques des manifestations secondaires à des impacts répétés.

En croisant ces données avec les observations de notre cohorte, il devient plausible de considérer le Cavum Vergae non seulement comme une structure vestigiale, mais aussi comme un marqueur de remodelage cérébral potentiellement associé à une exposition chronique aux chocs crâniens.

Toutefois, il est essentiel de souligner que la présence d'un Cavum Vergae n'implique pas nécessairement une pathologie neurodégénérative. En effet, comme le rappellent Born et al. (2004), cette structure peut être présente chez des individus en parfaite santé, sans antécédents de commotion ou de trouble neurologique.

Moi-même, je pourrais très bien présenter un Cavum Vergae sans que cela ne traduise un processus pathologique. Cette constatation renforce la nécessité de considérer le

Cavum Vergae comme un élément d'un faisceau d'indices, et non comme un marqueur unique ou suffisant à lui seul. Il s'agit d'un élément morphologique subtil, dont la signification ne peut émerger que dans une approche intégrative, combinant analyse morphologique, données cliniques et évolution temporelle.

L'approche analytique adoptée ici, mobilisant des outils de datavisualisation et une lecture clinique des données, illustre le potentiel des méthodes quantitatives dans l'émergence de nouveaux biomarqueurs IRM.

Les différentes perspectives :

L'une des grandes forces de cette expérience réside dans la richesse des divers perspectives à ajouter:

- Automatisation et IA : former un réseau de neurones convolutifs à partir de cette base segmentée (UNet 3D, nnU-Net) et puis ensuite, combiner par des segmentation mis en vigueur par d'autres confrères. L'objectif serait de proposer une détection automatique rapide et fiable du Cavum Vergae à partir d'un grand nombre d'IRM anonymisées.
- Fusion de données hétérogènes : intégrer les mesures anatomiques du cavum avec des variables issues d'examens cognitifs, de tests neuropsychologiques ou de questionnaires cliniques. Cela permettrait de construire des modèles prédictifs robustes du risque d'atteinte d'encéphalopathie post-traumatique ou de troubles neurocognitifs post-traumatiques. Etant donné que le projet a pu mettre déjà cela en pratique, pourquoi pas renforcer nos hypothèses.
- Suivi longitudinal : créer un protocole de suivi dans le temps des joueurs inclus dans le projet TC Foot, afin d'observer l'évolution des morphologies cavitaires et leur éventuel lien avec les années d'exposition ou l'âge.

Ces perspectives s'inscrivent dans une démarche de santé préventive, où la donnée devient un outil d'anticipation et de personnalisation de la prise en charge.

Je peux en conclure que ce stage, bien que limité à 70 heures, a constitué pour moi une expérience fondatrice, tant sur le plan technique que méthodologique et intellectuel. Il m'a offert une opportunité concrète d'appliquer mes compétences en traitement d'image médicale, issues de mes formations précédentes, mais également d'y adosser une analyse quantitative rigoureuse, fondée sur des méthodes statistiques, tout en mobilisant une réflexion biomédicale contextualisée.

Au-delà de la simple segmentation du Cavum Vergae, ce travail m'a permis de me confronter à l'un des enjeux majeurs de l'intelligence des données de santé : transformer une entité anatomique discrète en un signal exploitable, mesurable, objectivable et potentiellement prédictif. J'ai pu expérimenter, de manière intégrée, ce

que signifie traduire une observation neuroanatomique en hypothèse clinique, puis en variable analysable au sein d'un flux de données scientifiques interprétables. Ce processus, qui articule morphologie, hypothèse physiopathologique, et traitement algorithmique, incarne pleinement la transversalité de mon domaine.

Ce stage m'a également sensibilisé à la valeur du détail anatomique : le Cavum Vergae, souvent négligé car considéré comme une variante bénigne, s'est révélé être une structure d'intérêt potentiel, susceptible de refléter l'impact discret mais cumulatif des traumatismes crâniens répétés chez les sportifs professionnels. À travers lui, j'ai appris que les « données silencieuses », ces petits signaux anatomiques qui échappent à l'œil non averti peuvent, lorsqu'elles sont détectées, quantifiées, croisées et analysées, devenir porteuses de sens clinique, épidémiologique et préventif.

L'immersion dans l'univers de l'IRM et du raisonnement scientifique m'a permis de mieux comprendre la complémentarité entre médecine, ingénierie et recherche fondamentale. Ce positionnement interdisciplinaire, au carrefour du visible et du mesurable, du biologique et du numérique, est selon moi l'une des clés de la médecine de demain.

Ce travail ne représente donc pas une finalité, mais bien un point d'amorce méthodologique et conceptuel. Il ouvre la voie à des perspectives ambitieuses, notamment autour de la détection automatisée de marqueurs IRM discrets, de la fusion entre données d'imagerie et variables cliniques, et de la modélisation du risque cérébral individuel dans les sports à impacts. À travers cette démarche, se dessine la possibilité d'outils d'aide à la décision plus intelligents, intégrés dans une médecine du sport préventive, personnalisée, fondée sur les données et enrichie par l'IA.

Ce stage a renforcé ma conviction que l'intelligence des données appliquée à la santé n'est pas seulement un levier technique. Elle est aussi une méthode d'exploration du réel, capable de révéler, au cœur des volumes d'IRM et des segments voxélisés, les traces discrètes des parcours de vie et des expositions invisibles. Le Cavum Vergae, minuscule mais révélateur, en est peut-être l'illustration la plus juste.

Références bibliographiques :

- Naunheim, R. S., Standeven, J., Richter, C., & Lewis, L. M. (2003). Comparison of impact data in hockey, football, and soccer. *Academic Emergency Medicine*.
- Illustrations : les figures anatomiques en page de résultats et de discussion sont adaptées des travaux de Lucile Hausser (IMIS, ICube-2024), réalisés dans le cadre d'une étude comparative sur les variantes du septum pellucidum.
- Alosco ML, Mez J, Tripodis Y, et al. Structural MRI profiles and tau correlates of atrophy in chronic traumatic encephalopathy. *Brain*. 2021.
- Born CM, Meisenzahl EM, Frodl T, et al. The septum pellucidum and its variants. *J Neuropsychiatry Clin Neurosci*. 2004.
- Gardner RC, Hess CP, Freeman WS, et al. Cavum septum pellucidum in retired American pro-football players. *J Neurotrauma*. 2016.
- Lee YH, Lee YJ, Kim YB, et al. Prevalence of traumatic findings on routine MRI in professional fighters. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2017.
- McAllister TW, Ford JC, Ji S, et al. Neuroradiologic Evaluation of MRI in High-Contact Collegiate Sports. *Neurology*. 2021.
- Omalu BI, DeKosky ST, Minster RL, et al. Chronic traumatic encephalopathy in a National Football League player. *Neurosurgery*. 2005.
- McKee AC, Stern RA, Nowinski CJ, et al. Neuropathologic and Clinical Findings in Young Contact Sport Athletes Exposed to Repetitive Head Impacts. *JAMA Neurol*. 2023.