جامعة سيدي محمد بن عبد الله

كلية الطب والصيدلة - فاس

Neuromatiq 1.0

نوروماتيك

أهدي هذه الأطروحة:

إلى والدي، **عبد الهادي بن إبراهيم** و**حبي عائشة**، وأختاي، **أسماء** و**زينب** بن إبراهيم: أحيي صبركم ودعمكم المعنوي والمادي، الذي بدونه لم يكن ليكتب لهذا المشروع النجاح.

إلى صديقتي العزيزة، **Maureen Conner Tenore**، التي مولت هذا العمل بسخاء وشجعتني دائماً على المثابرة وتقديم أفضل ما عندي. كنتِ دائماً بجانبي، ومهما طلبت، أعطيتِ بلا تردد. في مرحلة ما، كنتِ الوحيدة التي تدفعني للأمام؛ آمل أن أتمكن يوماً ما من إثبات امتناني العميق لك ولعائلتك.

إلى روح **الراحلة حمدون حنان**، التي تركتنا قبل ثلاث سنوات قبل أن تحصل على درجة الدكتوراه في الطب. قاتلت بصبر وشجاعة حتى في المراحل الأخيرة من مرضها. لروحك ولِشَرَفِ عائلتك - التي هي أيضاً عائلتي - أهدي هذا العمل.

إلى عائلة **قسمي**، على دعمهم طوال فترة دراستي الطبية في فاس.

إلى أستاذي والمشرف على رسالتي، **البروفيسور بلحسن محمد فوزي**، على جودة رعايته في قسم الأعصاب بمستشفى الحسن الثاني الجامعي في فاس.

إلى أستاذنا العظيم، أستاذ التشريح، **العلمي حميدان طايع**، الذي علمنا ليس فقط التشريح بل أيضاً تاريخ وأخلاقيات الممارسة الطبية.

إلى عميد الكلية، **السيد حسن فريح**، الذي دعم جميع دفعات الخريجين من كلية الطب والصيدلة في فاس بعناية واهتمام ولطف.

إلى جميع **أصدقائي:** عصام المجدي، عصام جبابري، إبراهيم المحجوبي، زكرياء، لمياء، رشيد، أرلين، بريس، ويندي، رامونا، تشي ري...

إلى جميع **أساتذتي**، سواء في كلية الطب أو عبر منصات التدريب الإلكترونية: شكراً لكم على جودة عروضكم التقديمية ودوراتكم.

إلى كل من **دعم هذا المشروع من قريب أوبعيد حول العالم**: شكراً لكم على تشجيعكم ودعمكم وتعليقاتكم الدافئة، والتي بدونها لما تمكنت من المضي قدماً.

.

شكر وتقدير

أود أن أشكر:

والدي، **بن ابراهيم عبد الهادي**:

لقد ساندتني حتى في أصعب الأوقات وأحلكها. لطالما كنت مصدر إلهام وثقة كبيرة لي. علمتني قيم الصدق والتواضع والشرف. لقد قاتلت دائماً من أجلي وبجانبي. كنت دائماً تؤمن بي، حتى عندما لم تكن تعرف ما أفعله. بدون دعمك، بالتأكيد لم أكن لأتمكن من الوصول إلى هنا. أنا ممتن لك إلى الأبد.

والدتي، **حبي عائشة**:

لقد تحملتِني طوال هذه السنوات دون شكوى أو استياء. أتذكر السنوات التي قضيتها معي، معي وحدي، خلال سنوات الدراسة بكلية الطب - الفرح على وجهك عندما كنت أنجح والدموع التي كانت تنهمر على وجنتيك في كل مرة أفشل. كثير من السعادة والحزن، ومع ذلك لم تخذليني أبداً أو تتوقفي عن الإيمان بي. لقد منحتِني الوقت لأفعل ما حلمت به دائماً: أن أكرس نفسي لهذا المشروع. اليوم، أشاركِ ثمار عملي وصبرك.

أختي الصغيرة **زينب**:

"الذين يقومون بالعمل الحقيقي غالباً ما يكونون في الظل." هذا ينطبق على أختي الصغيرة زينب، التي تعتني بي وبعائلتي. شكراً لك على لطفك، ورعايتك، ودعمك.

أختي **أسماء**:

قد يجبرك عملك وعائلتك على العيش بعيداً عنا، لكن اعلمي أنك دائماً حاضرة في قلوبنا. شكراً لدعمكم ومساعدتكم، لك ولزوجك عبد الغني قيفوف. أنا ممتن جداً لكم.

صديقتي العزيزة **Maureen Conner Tenore** :

"الصديق وقت الضيق." قبل أقل من عام ونصف، كنا غرباء تماماً. أعجبك ما كنت أفعله وقدمتِ لي دعماً لا ينتهي. لفترة طويلة جداً، كنتِ الشخص الوحيد الذي يشجعني على الاستمرار للأمام، وهذا يعني لي الكثير. لقد وفرتِ لي كل ما أحتاجه لهذا العمل، رغم أننا لم نلتقِ أو نعرف بعضنا حقاً؛ ليس الآن، فلقد أصبحنا عائلة. بالنسبة لي، كنتِ صديقة وأماً في آن واحد، وأكثر من ذلك بكثير. دائماً تستمعين، دائماً تهتمين، ودائماً معطاءة. لم يكن لدي صديق مثلك من قبل، وربما لن يكون لي مرة أخرى. أتمنى لك ولعائلتك وأصدقائك كل الفرح والسعادة. شكراً.

صديقتي الفقيدة **حمدون حنان**:

قبل ثلاث سنوات، أعطيتِني درساً لن أنساه أبداً: أن الحياة تستحق أن تعاش بشغف وحماس حتى اللحظة الأخيرة. كانت وفاتك نقطة تحول في حياتي. لقد تركتِنا، لكنني دائماً أبقيكِ في ذاكرتي. لم أر أحداً يواجه الموت بشجاعة كتلك؛ أهدي هذا العمل لتكريم ذكراك. ليحفظك الله في رحمته الواسعة.

عائلة **قسمي**:

قد لا تكونوا أغنياء من حيث المال أو الثروة، لكنني وجدت فيكم عائلة مضيفة طيبة دافئة وكريمة. لن أنسى أبداً اللحظات الجميلة التي قضيتها معكم، ولا الطريقة التي اعتنيتم بي بها. أحبكم جميعاً: سالم، فاطمة، محمد، مروان، عثمان، وعمر. سأظل ممتناً لكم دائماً.

أستاذ التشريح **العلمي حميدان طايع**:

لي شرف عظيم أن أقدم هذا العمل اليوم تكريماً لتدريسك. جميع طلاب الطب في الدفعة الأولى يحبونك ويجلونك. لم تعلمنا التشريح فقط، بل غرست فينا أيضاً فن ممارسة الطب بصدق، بأمانة، بتواضع، وقبل كل شيء، بضمير. كرمك تجاه الطلاب لا يضاهى، وحماسك للتدريس لم يسبق له مثيل. أحببت التشريح والطب بفضلك، وسأستمر في ممارسة الطب كما علمتنا.

أستاذي **مولاي حسن فريح**:

لقد كنت أباً لجميع أجيال الطلاب في كلية الطب والصيدلة في فاس. لقد قدمت لنا النصح والدعم طوال سنوات دراستنا. جميع طلاب الكلية ممتنون جداً لك.

أستاذي والمشرف على أطروحتي **بلحسن محمد فوزي**:

أود أن أهنئك، أولاً على جودة تدريسك ومحاضراتك داخل الكلية، وأيضاً على رعايتك الممتازة في قسم الأعصاب. لقد منحتنا طريقتك التعليمية في التدريب، كأطباء مستقبليين، قدراً كبيراً من الثقة بالنفس. في قسمكم، شاركنا في تطوير التشخيصات وحتى اقتراح خطط العلاج. لم أشعر يوماً أنني مُقَدّر كما شعرت عندما كنت في قسمكم؛ في أقسام أخرى، كنت غالباً أقيس ضغط الدم ودرجات الحرارة فقط.

لن أنسى أبداً الوقت الذي، حتى بعد أن غادرت قسم الأعصاب بعام، دعوتني لرؤية حالة طفلة صغيرة تعاني من اعتلال عضلي. لن أنسى أيضاً اليوم الذي دعوتني فيه إلى الجناح لتريني ما هي حلقة كايزر-فليشر (Kayser-Fleischer ring) وكيف ساعدت في تشخيص مرض ويلسون لدى مريض. شعرت أنني أستاذ طب نظراً لاهتمامك بشرح هاتين الحالتين لي، وليس كطبيب متدرب عادي لا يفعل شيئاً أفضل من المشي في الممرات، يحمل سماعة طبية وجهاز قياس ضغط الدم.

استمتعت بالتعاون معك في مواضيع مثل الشلل السفلي، والفحص العصبي، وخاصة الفسيولوجيا العصبية. أشارك وجهة نظرك بأن التدريس يجب أن يكون مصدر إلهام وتحفيز وحماس، وليس مجرد حشو أو عمل قسري.

تقديم

نوروماتيك Neuromatiq، وسيط سمعي بصري وتفاعلي في فسيولوجيا الأعصاب واضطراباتها. هو مشروع أطروحة طبية أنجزته أنا **(ابن إبراهيم محمد)** وأشرف عليه البروفيسور **بلحسن محمد فوزي**، أستاذ طب الأعصاب في كلية الطب والصيدلة بفاس ورئيس قسم الأعصاب في مستشفى الحسن الثاني الجامعي.

الغرض من هذا الوسيط هو شرح عمل الجهاز العصبي لطلاب الطب ومن يعملون في المجالات ذات الصلة من خلال فيديوهات متحركة ثلاثية الأبعاد و/أو رسوم متحركة تفاعلية.

العالم يتطور؛ ويجب أن تتطور أيضاً رؤيتنا للتدريس والبيداغوجيا. هناك اليوم طفرة تكنولوجية هائلة في مجال الوسائط الرقمية المتعددة، ويمكننا تحقيق الكثير من خلالها في مجال التعليم.

جاءتني فكرة إنشاء هذا الدعم قبل خمس سنوات. كنت أشاهد بانتظام حلقات من سلسلة **Tous sur orbite**، سلسلة تشرح النظام الشمسي لكنه موجه لجمهور العامة. أدهشتني البساطة والأناقة التي عُرض بها النظام الشمسي، مما يوفر على المشاهدين عناء التفاصيل العلمية الزائدة. وبالتالي، تزداد كفاءة اكتساب المعارف عندما تقترن بتجربة ممتعة.

بعد عدة أشهر، أتيحت لي الفرصة لمشاهدة فيديو بعنوان **"The Inner Life of The Cell"** أُنتج في جامعة هارفارد في الولايات المتحدة الأمريكية، يشرح العمل الداخلي للخلية. المشاهد خلابة؛ يستمتع المرء حقاً بمشاهدة الفيديو أثناء تعلمه علم الأحياء. شيء ملموس أكثر من النصوص أو الرسوم فقط لأنه بصري، ثلاثي الأبعاد، متحرك، وجميل للرؤية.

في ذلك الوقت، كنت أعمل مع طالبين في الطب على وسيطين سمعيين بصريين في علم الأعصاب، تحت إشراف البروفيسور بلحسن: أحدهما الشلل السفلي والآخر الفحص العصبي. كان هذا العمل الأخير ناجحاً جداً، لكنه لا يزال عملاً للهواة. الإنجاز الذي تخيلته يتطلب معرفة عميقة بالموضوع، بينما كان لدي خلفية بسيطة فقط عن برنامج فلاش Adobe Flash.

أقدمت على موضوع الفسيولوجيا العصبية مع الأستاذ بلحسن قبل خمس سنوات دون أن أعرف حقاً إلى أين سيقود. جمعت عدداً هائلاً من المراجع: العديد من الكتب عن الفسيولوجيا العصبية، ومصادر متعددة الوسائط عن الفسيولوجيا مع الرسوم المتحركة، ومصادر تحتوي على رسوم متحركة ثلاثية الأبعاد تفاعلية، ومقاطع فيديو ثلاثية الأبعاد للمرجعية البصرية، وقبل كل شيء، مجموعات من الفيديوهات حول وظائف الجهاز العصبي. السلسلة التي تركت أكبر انطباع لدي كانت بالتأكيد سلسلة (The Teaching Company) TTC بعنوان **"فهم الدماغ"**، التي تضم 36 حلقة مدة كل منها 30 دقيقة. قدمتها البروفيسورة **Jeanette Norden**. تشرح هذه السلسلة كيف يعمل الجهاز العصبي. أعدت مشاهدة جميع الحلقات عدة مرات وأوصي بها بشدة أي طالب طب.

قبل بدء إنتاج الفيديوهات، شاهدت عدداً هائلاً من سلاسل الدروس التعليمية على العديد من منصات تعليم الأنميشن Animation. أكثر من 27,000 فيديو في مجالات الرسوم الحاسوبية CG (computer graphics) والرسوم المولدة بالحاسوب CGI (computer-generated imagery)، ومبادئ الرسوم المتحركة، والمهارات العامة للحاسوب، والإضاءة، ونظرية الألوان، وخاصة سلاسل لمنتجات محددة مثل 3ds Max ، Photoshop، Flash، ActionScript، HTML/XML/CSS، After Effects، Premiere Pro، Illustrator، Dreamweaver، Soundbooth، Audition، Encore، Bridge، وغيرها.

الإنتاج الجيد تكلفته باهظة جدا: أربع سنوات من العمل المتواصل على هذا المشروع، ليلاً ونهاراً. أصبح هوساً حقيقياً؛ لم أفعل شيئاً سوى التدرب والإنجاز. تعلمت كيف أكتب السيناريو وكيف أنظم وأبني الجمل بطريقة تنتج سلسلة من المشاهد المتماسكة. لكل موضوع، آخذ وقتي في الكتابة، أجمع الأفكار التي أحتاج لتقديمها مع التخلص من الزائد. أنظمها في مقال متماسك وأرسم رسماً تخطيطياً لكل جملة - رسم قلم رصاص بدائي على صفحة فارغة يعمل كمعاينة لما يجب أن يكون عليه المشهد في المنتج النهائي.

بعد ذلك، أقوم بإنشاء نماذجي في برنامج ثلاثي الأبعاد، مع الاهتمام بالألوان والخامات والأضواء والكاميرات ومعايير التصيير (Rendering). أقوم بإنجاز عدة تسلسلات لنفس المشهد، كل منها يحتوي على معلومة محددة - واحدة للألوان، وواحدة للضوء المحيط، وهكذا. أحياناً أصور حتى أربعة أو خمس تسلسلات مختلفة. يمكن أن يستغرق شريط مدته 8 ثوان من 10 دقائق إلى ثلاثة أيام للتصيير الثلاثي الأبعاد، حسب تعقيد المشهد؛ غالباً ما أستخدم جهازي الكمبيوتر المحليين للتصيير في نفس الوقت.

بمجرد أن أحصل على التسلسلات التي أحتاجها، أستوردها إلى After Effects لأداء التركيب (Compositing) (ربط تسلسلات مختلفة لنفس المشهد) وإضافة المؤثرات الخاصة.

أسجل الصوت في Audition (وأحياناً على Soundbooth) لإزالة الضوضاء الخلفية وتحسين جودة الصوت.

تم استخدام عدة برامج أخرى في مراحل إنتاج مختلفة؛ على سبيل المثال، Illustrator لرسم مقاطع الرنين المغناطيسي وإرسال المنحنيات إلى برنامج 3ds Max لإنشاء مقاطع ثلاثية الأبعاد من الدماغ، وPhotoshop لعدة فلاتر وتأثيرات خاصة، و Premiere Pro لتحرير الفيديوهات. Bridge، كمدير أصول رقمية Digital Asset Manager (DAM)، كان مفيداً جداً في تنظيم العمل، وهو عنصر أساسي في مشروع احترافي. في المتوسط، هناك 28,000 صورة مولدة بالحاسوب لإنتاج كل فيديو؛ يجب أن تكون منظمة جيدا في مجلدات محددة لتجنب الفوضى.

بعد إنتاج الفيديوهات، تم استخدام برمجة Flash/AS3 (ActionScript 3) لتصميم الوسيط وواجهة الفيديوهات والصور والرسوم المتحركة. يتم تنسيق النصوص بتقنية HTML باستخدام أوراق أنماط CSS، ويتم تنظيم البيانات في ملفات XML.

تم صنع الرسوم المتحركة التفاعلية باستخدام برنامج Flare3D، وهو امتداد لـ AS3 يسمح باستيراد وتعديل

النماذج ثلاثية الأبعاد داخل برنامج فلاش.

قبل بدء تنفيذ هذا المشروع، اتفقنا **أنا** والأستاذ **بلحسن** على أنه لا ينبغي أن يكون شاملاً أو مثقلاً بتفاصيل غير ضرورية. لذا فإن النصوص موجزة ومقتضبة جداً، تحتوي فقط على الأساسيات، مع توفر روابط مرجعية عند الحاجة للتعمق في الأسئلة عبر كتب جوجل، التي تحتوي على عدد هائل من الموارد حول الموضوع.

يرافق قرص DVD الخاص بالبرنامج قرص DVD-video آخر ليتيح مشاهدة الفيديوهات على مشغل DVD بجودة عالية.

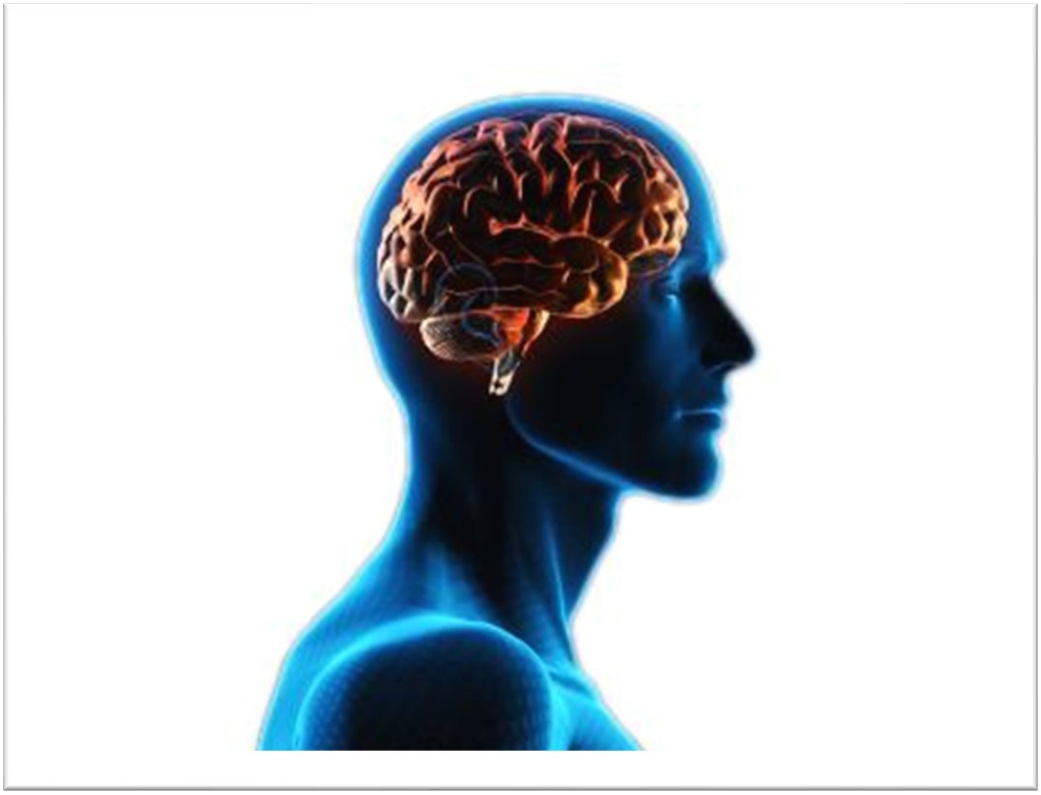
.

إختصارات

الاختصار	المصطلح الإنجليزي	المصطلح العربي
ACh	Acetylcholine	أستيل كولين
AChR	Acetylcholine Receptors	مستقبلات الأستيل كولين
AChE	Acetylcholinesterase	أستيل كولين إستراز
ACTH	Adrenocorticotropic Hormone	الهرمون الموجه لقشر الكظر
ADH	Antidiuretic Hormone	الهرمون المضاد لإدرار البول
AP	Action Potential	جهد الفعل
ARAS	Ascending Reticular Activating System	الجهاز المنشط الشبكي الصاعد
ATP	Adenosine Triphosphate	أدينوسين ثلاثي الفوسفات
BBB	Blood-Brain Barrier	الحاجز الدموي الدماغي
BG	Basal Ganglia	العقد القاعدية
CNS	Central Nervous System	الجهاز العصبي المركزي
CSF	Cerebrospinal Fluid	السائل الدماغي الشوكي
CVA	Cerebrovascular Accident (Stroke)	حادث وعائي دماغي (سكتة دماغية)
dB	Decibels	ديسيبل
EEG	Electroencephalogram	تخطيط كهربائية الدماغ
EP	Evoked Potentials	الجهود المثارة
EPSP	Excitatory Postsynaptic Potential	الجهد الاستثاري بعد المشبكي
FSH	Follicle-Stimulating Hormone	الهرمون المنبه للجريب
GABA	Gamma-Aminobutyric Acid	حمض غاما-أمينوبيوتيريك
GH	Growth Hormone	هرمون النمو
HLA	Human Leukocyte Antigen	مستضد الكريات البيضاء البشرية
Hz	Hertz	هرتز
Ig	Immunoglobulin	الغلوبولين المناعي
IHC	Inner Hair Cells	الخلايا الشعرية الداخلية
IPSP	Inhibitory Postsynaptic Potential	الجهد التثبيطي بعد المشبكي
IHT	Intracranial Hypertension	ارتفاع الضغط داخل القحف
L2	Second Lumbar Vertebra	الفقرة القطنية الثانية
L-dopa	Levodopa	ليفودوبا
LH	Luteinizing Hormone	الهرمون اللوتيني
LTP	Long-Term Potentiation	التعزيز طويل الأمد
MG	Myasthenia Gravis	الوهن العضلي الوبيل

MRI	Magnetic Resonance Imaging	التصوير بالرنين المغناطيسي
MS	Multiple Sclerosis	التصلب المتعدد
MSH	Melanocyte-Stimulating Hormone	الهرمون المنبه للخلايا الميلانينية
NMDA	N-Methyl-D-Aspartate	ن-ميثيل-د-أسبارتات
NRS	Numerical Rating Scale	مقياس التقييم العددي
NSAIDs	Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs	مضادات الالتهاب غير الستيرويدية
OHC	Outer Hair Cells	الخلايا الشعرية الخارجية
PET	Positron Emission Tomography	تصوير الانبعاث البوزيتروني
PNS	Peripheral Nervous System	الجهاز العصبي المحيطي
REM	Rapid Eye Movement	حركة العين السريعة
S1	Primary Somatosensory Cortex	القشرة الحسية الجسدية الأولية
S2	Secondary Somatosensory Cortex	القشرة الحسية الجسدية الثانوية
SVS	Simple Verbal Scale	السلم اللفظي البسيط
TIA	Transient Ischemic Attack	نوبة نقص التروية العابرة
TSH	Thyroid-Stimulating Hormone	الهرمون المنبه للدرقية
VAS	Visual Analogue Scale	المقياس التناظري البصري
VPL	Ventral Posterolateral Nucleus	النواة البطنية الخلفية الوحشية
VPM	Ventral Posteromedial Nucleus	النواة البطنية الخلفية الإنسية
WHO	World Health Organization	منظمة الصحة العالمية

مقدمة



مقدمة 14

مقدمة

"التعليم ليس ملء وعاء، بل إيقاد شعلة، "، سقراط.

الجهاز العصبي (خاصة البشري) هو بلا شك أكثر الأجسام تعقيداً وإثارة للاهتمام في الكون المعروف حتى الآن. هو أساس هويتنا، أفكارنا، ذاكرتنا، مشاعرنا، وكل الأحاسيس التي نعيشها كل لحظة.

يسمح لنا الجهاز العصبي بالرؤية والسماع والشم واكتشاف العالم والبيئة التي ننتمي إليها. كما يسمح لنا **بالتأثير** في هذه البيئة: فهو يمكننا من البناء، التحرك، الأكل، التكيف، وتوسيع قدراتنا من أجل استيعاب أدق الجسيمات الصغيرة والهياكل الهائلة الواسعة في الكون الفسيح.

جميع الأعضاء الأخرى للجسم هي **في خدمة الجهاز العصبي**: يزوده الجهاز الهضمي بالمغذيات، والرئتان تزودانه بالأكسجين، ويضمن الجهاز القلبي الوعائي توصيل هذه الموارد، والكلى تنقي الدم من السموم التي قد تضره. كل عضو في الجسم يخدم الجهاز العصبي بطريقة أو بأخرى، لأنه إذا توقف، فإن الحياة كلها تذهب معه.

منذ فجر التاريخ، كانت البشرية تبحث عن إجابات لعدة أسئلة حول الفكر واللغة والذاكرة والمشاعر. في غياب الموارد، كانت الإجابات غالباً مضللة. اليوم، مع بلوغ تطور العلوم والتكنولوجيا ذروتها، لدينا بعض الإجابات الأولية القوية حول كيفية عمل هذه الآلة البشرية المذهلة.

للأسف، الجهاز العصبي، رغم استثنائيته وروعته، ليس معصوماً من الخطأ. أحياناً نرى نقصانا في كفاءته وتراجعاً في قدراته. ورغم أن الأمر قد يبدو متناقضاً، إلا أن هذه **الاختلالات** هي التي مكنتنا إلى حد كبير من اكتشاف كيفية عمل الجهاز العصبي.

على مدار تاريخ الطب، وصف الباحثون والأطباء الأمراض والاضطرابات العصبية لدى الأفراد؛ بعد وفاتهم، فحصوا الأجساد لمعرفة ما هو متغير، لأن التشوهات التشريحية في مناطق معينة أعطت العديد من التلميحات حول أدوارها في وظائف محددة - وظائف مثل اللغة، الذاكرة، والمشاعر. مع ذلك، كانت هذه الطرق غير عملية، إذ لم يكن بالإمكان التعرف على الخلل إلا بعد وفاة الفرد.

فسيولوجيا المقارنة Comparative physiology مع الحيوانات الأخرى كانت دائماً مساهماً رئيسياً.

لكن ما كان بلا شك الأكثر بروزاً في العلم الحديث بهذا المعنى هو تطوير طرق ووسائل بحث متقدمة للغاية: **المجهر الضوئي والإلكتروني، تقنيات التلوين، التصوير الطبي** (وخاصة التصوير **الوظيفي**)، وتطوير الفيزيولوجيا العصبية، وغيرها.

كل هذه الوسائل، وخاصة الأشخاص **المتفانون** الذين عملوا بجد لطرح الأسئلة وإيجاد إجابات لها، سمحت لنا بمعرفة الكثير عن الجهاز العصبي اليوم.

فهم كيفية عمل الجهاز العصبي وآليات اضطراباته يوفر نظرة ثاقبة لكيفية إجراء الأبحاث، أو على الأقل، لإيجاد علاجات فعالة للأمراض العصبية المروعة والمدمرة مثل **باركنسون** و**الزهايمر**.

نظرة تشريحية عامة

التشريح العصبي - مفاهيم عامة 17
الحبل الشوكي 18
جذع الدماغ 21
المخيخ 23
المخ 25
السائل الدماغي الشوكي 27
المهاد والوطاء 29
العقد القاعدية 31
الغدة النخامية والصنوبرية 33
التروية الشريانية 34

تشـــريحيا، نميز [160] بين الجهاز العصـــبي المركزي Central Nervous System (CNS) [95، 225] والجهاز العصـــبي المحيطي Peripheral Nervous System (PNS) [125].

صورة 1: الجهاز العصبي المركزي

1. الجهاز العصبي المركزي (أو المحور العصبي):

1 .1. الدماغ:

يقع الدماغ [157] داخل الجمجمة، ويحتوي على: نصفي الكرة المخية Cerebral Hemispheres [224] (اللذين يدعمان القشرة الدماغية Cerebral cortex)، البطينات الدماغية Cerebral ventricles [37] حيث يدور السائل الدماغي الشوكي CerebroSpinal Fluid (CSF) [95]، العقد القاعدية Basal ganglia [4]، المهاد Thalamus [75]، تحت المهاد Hypothalamus [4، 50]، المخيخ Cerebellum [4، 54]، وجذع الدماغ Brainstem [32، 38].

الحبل الشوكي [38، 160] Spinal cord :

الحبل الشوكي هو امتداد جذع الدماغ خارج الجمجمة؛ وهو محمي داخل القناة الشوكية Spinal canal [43] في مركز العمود الفقري. تخرج منه جذور أمامية وخلفية لتشكيل الأعصاب الشوكية Spinal nerves [38، 125].

2. الجهاز العصبي المحيطي:

يتكون الجهاز العصبي المحيطي من عدة أعصاب وعقد عصبية تقع خارج المحور العصبي. ويتكون أساساً من 11 زوجاً من **الأعصاب القحفية** Cranial nerves [64] التي تنبثق على مستوى الجمجمة (حيث يعتبر العصب البصري جزءاً من الجهاز العصبي المركزي [41])، و31 زوجاً من الأعصاب الشوكية Spinal nerves [6، 7، 8، 9، 10، 11، 12، 13] والتي تخرج من الثقوب بين الفقرات الموجودة في العمود الفقري.

صورة 2: الحبل الشوكي محمي داخل القناة الشوكية.

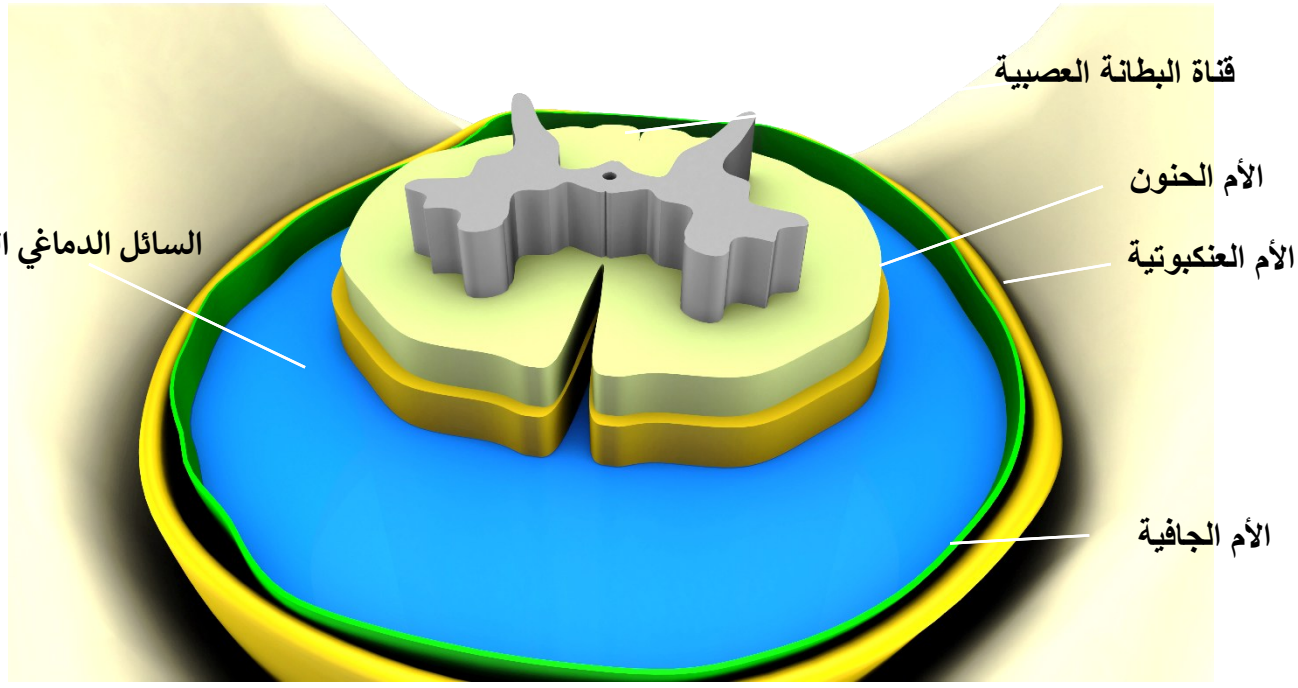
الحبل الشوكي [38، 160] محمي جيداً داخل القناة الشوكية [43] التي تمر عبر العمود الفقري. في البالغين، يبلغ طوله حوالي 42 سم عند النساء و45 سم عند الرجال [13، 14، 15، 16، 17، 19].

الحبل الشوكي هو أصل جميع **الأعصاب الشوكية** [38، 125]، والتي يبلغ عددها 31 زوجاً.[14]

الحبل الشوكي، مثل الدماغ، محاط بالسحايا Meninges [43]: **الأم الحنون** Pia mater [38، 85]، **الأم العنكبوتية** Arachnoid [64، 94]، و**الأم الجافية** Dura mater [43، 69، 94]. يغمره السائل الدماغي الشوكي [95]، وتثقبه في المركز قناة بدائية (قناة البطانة العصبية Central canal) [14، 20].

1. التكوين الخارجي:

بسبب النمو السريع للعمود الفقري داخل الرحم، تنزاح جذور الأعصاب الشوكية مقارنة بالثقب بين الفقرات التي تخرج منها. لهذا السبب ينتهي الحبل الشوكي عند مستوى الفقرة القطنية الثانية (L2) [21، 22، 23، 24، 25]، بينما يطلق جذوراً تمتد حتى الجذر العجزي الخامس (S5) أو حتى الجذور الأولى من **العصعص** First coccygeal nerve roots (Co1) [26، 27، 28، 29، 30].

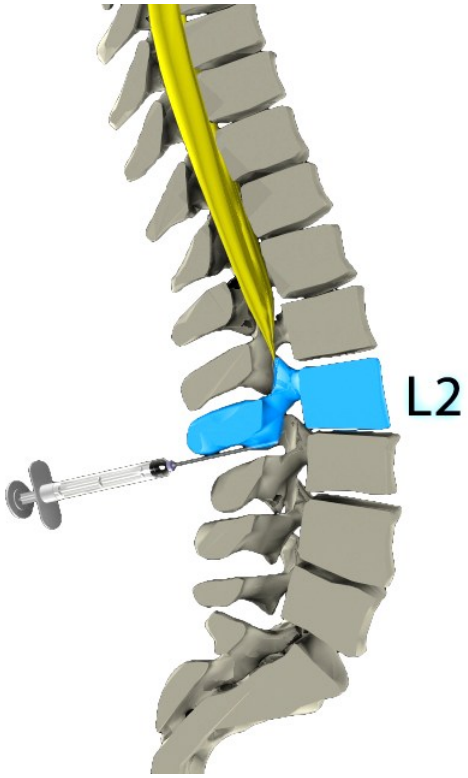


صورة 3: الحبل الشوكي محاط بثلاث طبقات سحائية.

عندما يتم إجراء **بزل قطني** (Lumbar Puncture) ، فإنه يُجرى عادةً تحت مســـتوى الفقرة القطنية الثانية لتجنب إصـــابة الحبل الشوكي [2، 31، 32، 33].

يتبع الحبل الشـــوكي مســـار العمود الفقري، راســـماً انحناءين: أحدهما عنقي بتقعر خلفي (قعس Lordosis)، والآخر صدري قطني بتقعر أمامي (حدب Kyphosis) [34].

كما يظهر انتفاخين [32، 35، 36، 37، 38]: الانتفاخ العنقي والانتفاخ القطني، وهما مرتبطان بتعصيب الأطراف العلوية والسفلية. وينتهي في الأســـفل بالمخروط النخاعي Conus medullaris [50]، الذي يعطي ذيل الفرس Cauda equina [91] (مجموعة من الجذور القطنية العجزية النازلة).



صورة 4: بزل قطني.

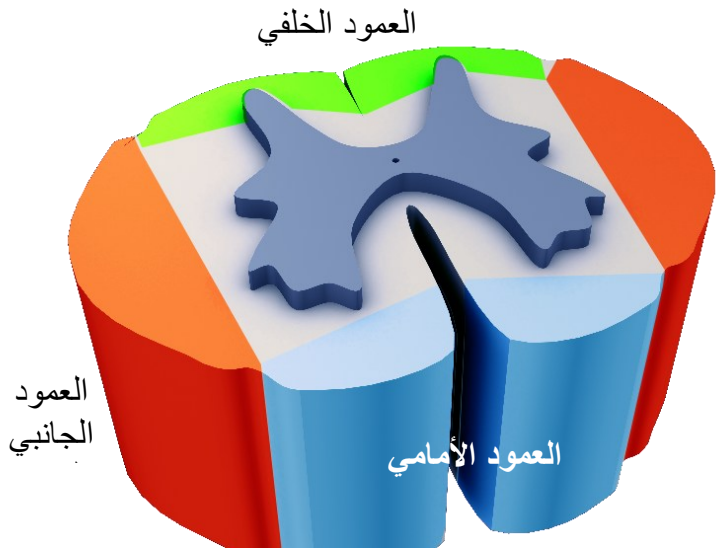
2. التكوين الداخلي:

في المقطع العرضي [43]، يحتوي الحبل الشوكي على منطقة مركزية هي **المادة الرمادية** Gray matter ، التي تضم أجسام الخلايا العصبية، ومنطقة محيطية هي **المادة البيضاء** White matter ، التي تتكون من الامتدادات المحورية وأغلفة الميالين الخاصة بها [104، 113، 124، 125].

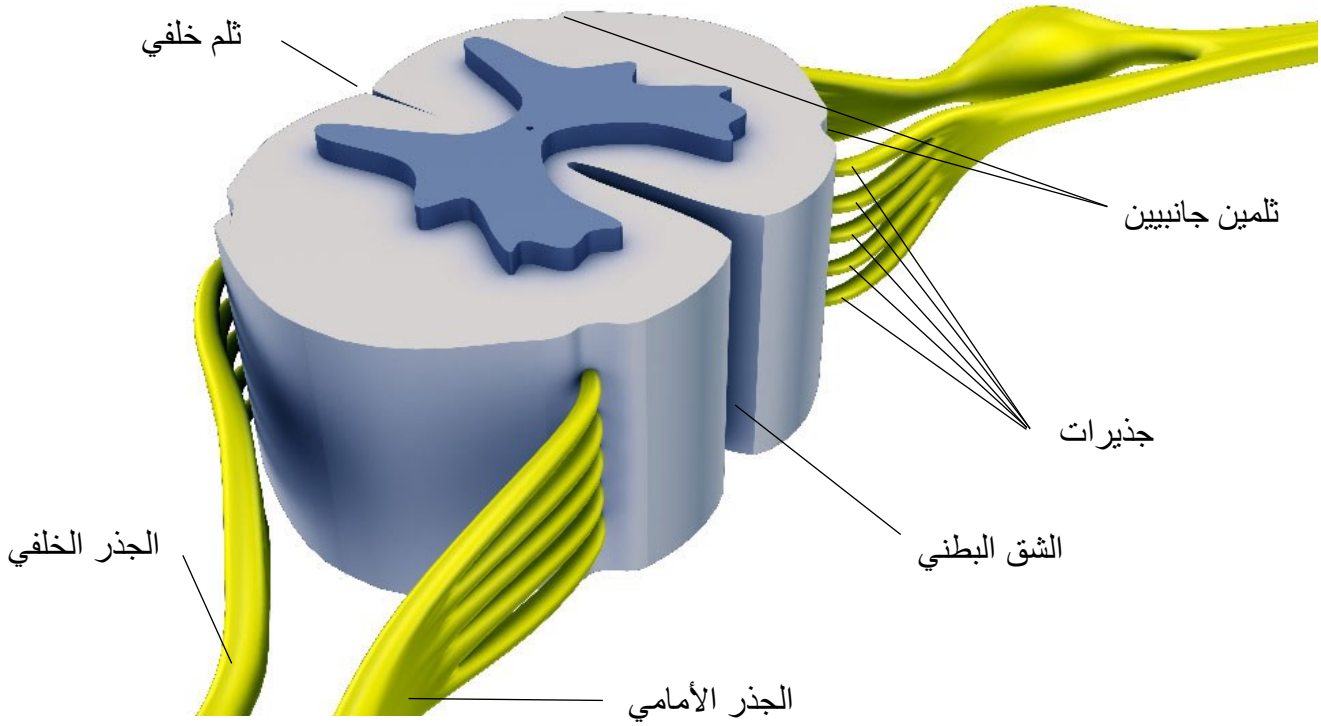
تأخذ المادة الرمادية شكل فراشة، وتتكون من **قرنين أماميين** يحتويان على أجسام الخلايا العصبية الحركية، و**قرنين خلفيين** يستقبلان الألياف الحسية. أما في الحبل الشوكي الصدري القطني، فتوجد أيضاً **قرون جانبية** تحتوي على أجسام الخلايا الخاصة بـ**الألياف الودية** Sympathetic fibers [40، 41، 42].

المادة البيضاء منظمة في ثلاثة أزواج من **الحبال** أو أعمدة (Funiculi) [36، 43، 44، 45] (أمامي، وخلفي، وجانبي).

يحتوي الحبل الشوكي أيضاً على **شق بطني** (وهو الأكثر وضوحاً)، و**ثلم خلفي**، و**ثلمين جانبيين** ينبثق منهما زوجان من الجذور العصبية: أحدهما أمامي (حركي) والآخر خلفي (حسي). ويندمج هذان الجذوران معاً ليشكلا عصباً شوكياً.



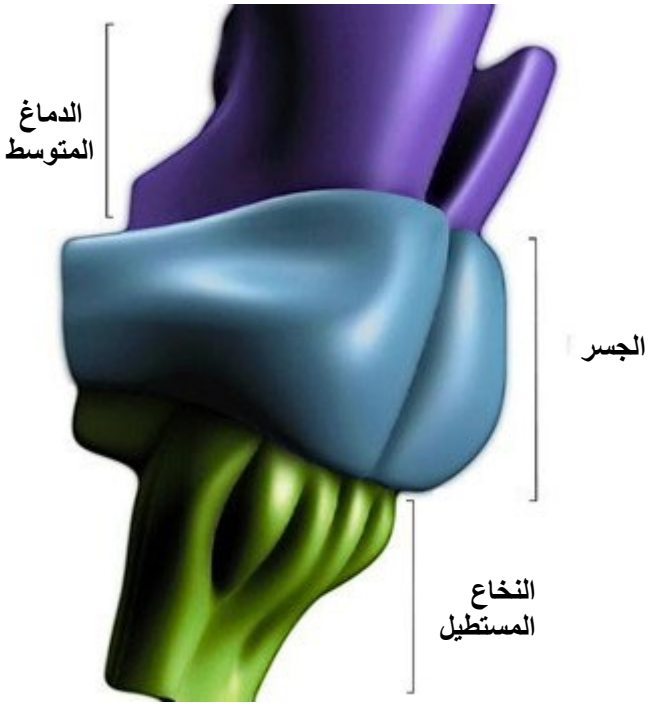
صورة 5: أعمدة الحبل الشوكي



صورة 6: ظهور جذور الأعصاب الشوكية.

جذع الدماغ [32، 38] هو بنية تشريحية عصبية تربط بين أجزاء مختلفة من الجهاز العصبي: المخ، والمخيخ، والحبل الشوكي.

يلعب جذع الدماغ دوراً حيوياً [32، 41، 46] نظراً للوظائف الأساسية التي تنظمها أنويته [1]، بما في ذلك التنفس ومعدل ضربات القلب. كما يعد منطقة انتقال للمسارات الحسية والحركية، بالإضافة إلى كونه مركزاً للسيطرة على الألم [47، 48]. علاوة على ذلك، يمثل موقع خروج معظم الأعصاب القحفية [41].

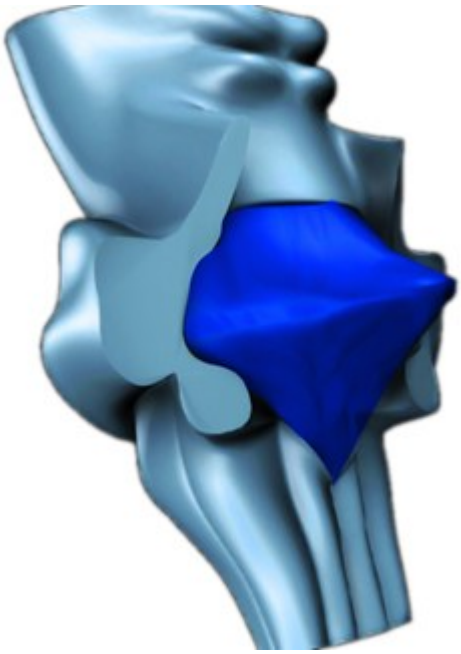


صورة 7: الأجزاء الثلاثة من جذع الدماغ.

ينقسم جذع الدماغ إلى ثلاثة أقسام [36] مرتبة من الأعلى إلى الأسفل وهي: **الدماغ المتوسط** (Mesencephalon) [49]، **والجسر** (Pons) [181]، والنخاع المستطيل (أو **البصلة السيسائية**) (Medulla Oblongata) [72].

1. الدماغ المتوسط:

الدماغ الأوسط (أو الدماغ المتوسط [38]) هو الجزء من جذع الدماغ المتصل مباشرة بالدماغ عبر **السويقات المخية** Cerebral Peduncles [38]. خلف هذه السويقات يقع الغطاء (Tegmentum) [49، 50، 51]، الذي يحتوي على مسال سيلفيوس (أو المسال الدماغي Cerebral Aqueduct) [41، 43، 72]؛ التي تربط البطين الثالث بالبطين الرابع. وفي الخلف، يحتوي الدماغ الأوسط على **الأجسام التوأمية الأربعة** Corpora quadrigemina [226] (السقف/ Tectum[39])، وهي أساسية لوظائف مثل الرؤية والسمع.



صورة 8: البطين الرابع.

2. الجسر:

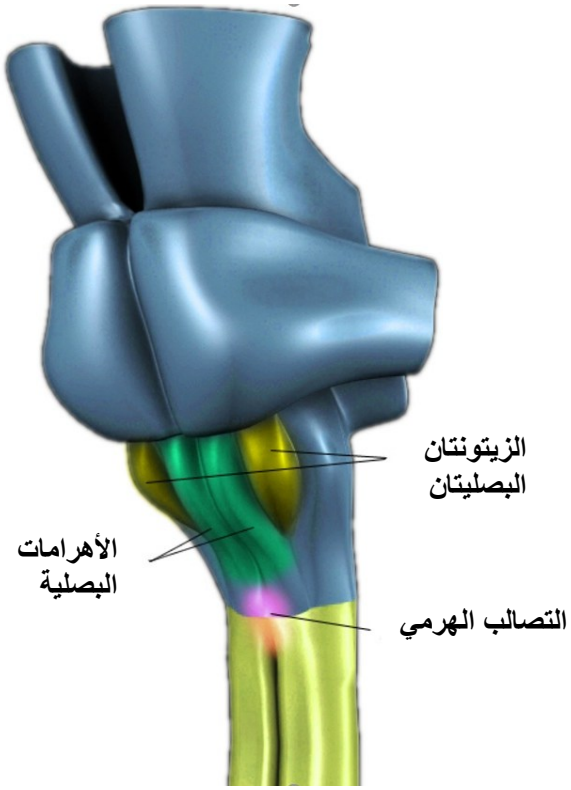
الجسر (Pons) (أو **جسر فارول** [38]) هو الجزء الوسيط من جذع الدماغ. يلعب دوراً مهماً في التحكم الحركي، خاصة كمحطة ترحيل

بين المخ والمخيخ [52]؛ كما يساهم في الوظائف الذاتية والإحساس الوجهي (في هذا المستوى تقع النواة ومخرج العصب ثلاثي التوائم (Trigeminal nerve (The 5th cranial nerve or CN\ V [116]). والجسر متصل بالمخيخ بواسطة زوج من السويقات المخيخية الوسطى [64] ويشكل السطح الأمامي (أو الأرضية) لـ البطين الرابع [64].

3. النخاع المستطيل:

النخاع المستطيل (أو الدماغ النخاعي [38]) هو الجزء من جذع الدماغ الذي يمتد مع الحبل الشوكي في الأسفل. يحتوي على الزيتونتين Medullary olives [32] وكذلك الأهرامات البصلية Medullary pyramids [119] (وهي الهياكل التي تمر عبرها الألياف القشرية الشوكية Corticospinal fibers [39] ضمن المسار الهرمي [179، 227]).

تحتوي البصلة السيسائية، أو النخاع المستطيل [73]، على مراكز تحكم ذاتي حيوية مثل مراكز الجهاز التنفسي [119]. وينتهي في الأسفل عند **التصالب الهرمي** [5، 40]، وهي المنطقة التي تتقاطع فيها ألياف المسار القشري الشوكي.



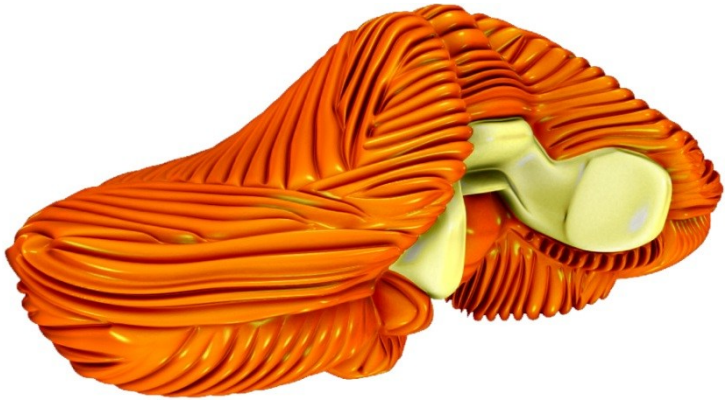
صورة 9: النخاع المستطيل.

صورة 10: موقع المخيخ داخل الجمجمة.

المخيخ [4، 54] في الجهاز العصبي المركزي هو العضو الذي يقع مباشرة خلف جذع الدماغ. ومع هذا الأخير، يحتل **الحفرة القحفية الخلفية** Posterior cranial fossa [32، 43، 45] أسفل الخيمة المخيخية Tentorium Cerebelli [38].

يرتبط المخيخ بجذع الدماغ بواسطة ثلاثة أزواج من **السويقات المخيخية** Cerebellar Peduncles [43]: العلوية، والسفلية، والوسطى. يساهم المخيخ بشكل أساسي في التوازن والتنسيق الحركي [53]. الأخاديد متحدة المركز التي تميز سطحه تعطيه مظهراً مورقاً.

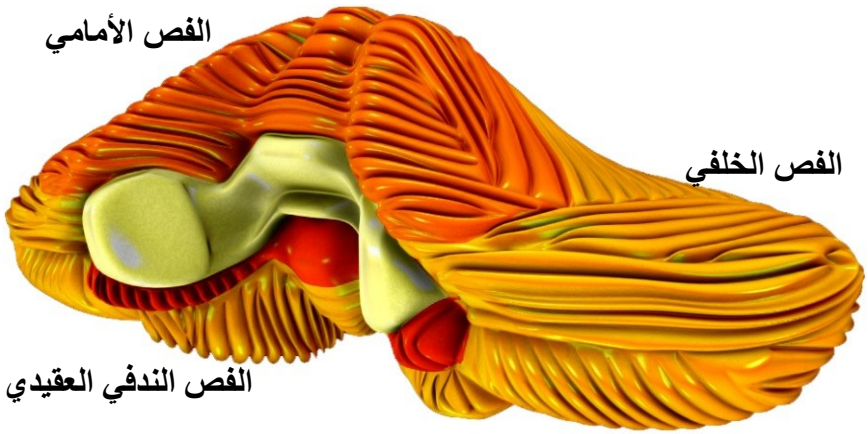
ينقسم المخيخ إلى **ثلاثة فصوص رئيسية**: الأمامي، والخلفي، والندفي العقيدي Flocculonodular lobe [35، 54]. وتنقسم هذه الفصوص أيضاً إلى **عشرة فصيصات** بواسطة شقوق ثانوية [4، 43].



صورة 11: المخيخ.

يحتوي المخيخ على منطقة مركزية (وسطية) وهي **الدودة المخيخية** Cerebellar Vermis [55، 56]، وثلاثة أزواج من النوى العميقة: المسننة Dentate nucleus ، والمتداخلة Emboliform nucleus ، و القمية Fastigial (الأوجية) [38، 54، 57].

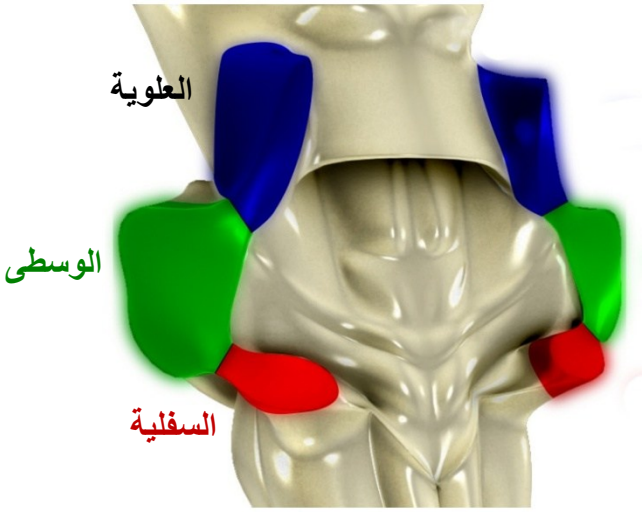
يشترك المخيخ في العديد من أوجه التشابه مع المخ؛ حيث يحتوي على **قشرة محيطية** [3، 32، 75] ونوى رمادية عميقة تضم أجسام الخلايا العصبية. كما يمتلك نصفي كرة مخيخية [157]: أيمن وأيسر، بالإضافة إلى عدة شقوق تحدد الفصوص.



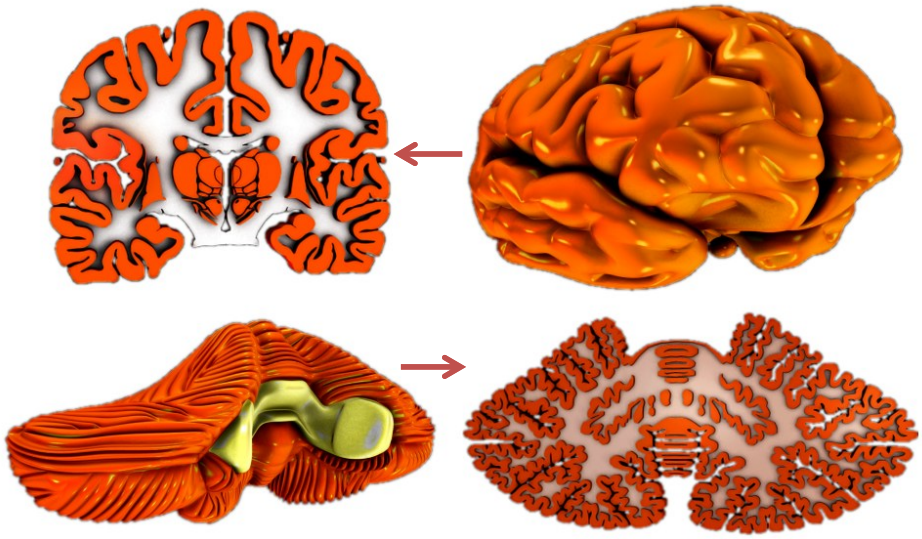
صورة 12: فصوص المخيخ.

تعد الشقوق في المخيخ **أعمق** [130] مقارنة بتلك الموجودة في المخ، مما يزيد بشكل كبير من مساحة سطح القشرة المخيخية، والتي تُقدر بنحو 75% من

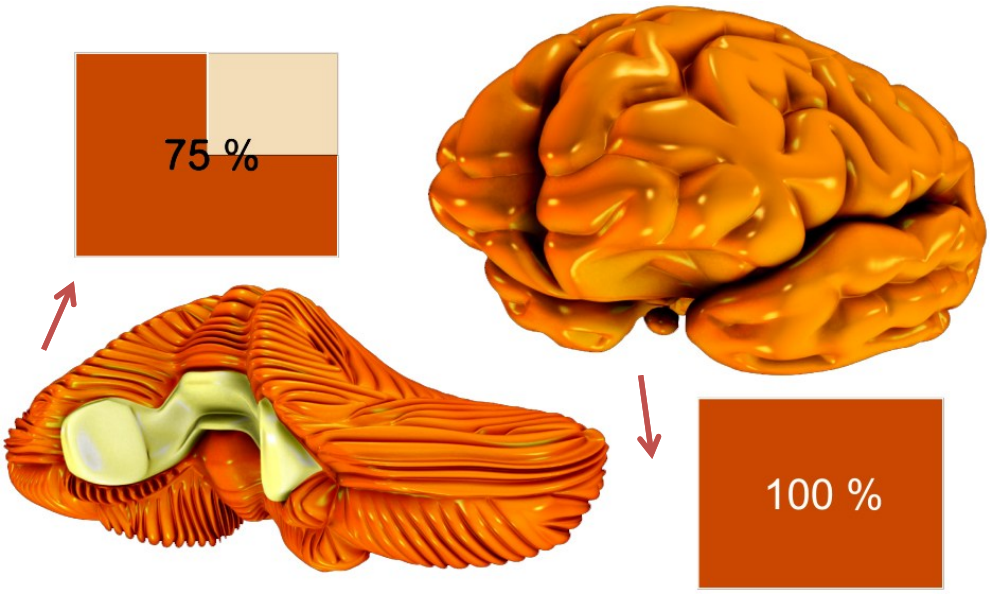
مساحة قشرة المخ [4].



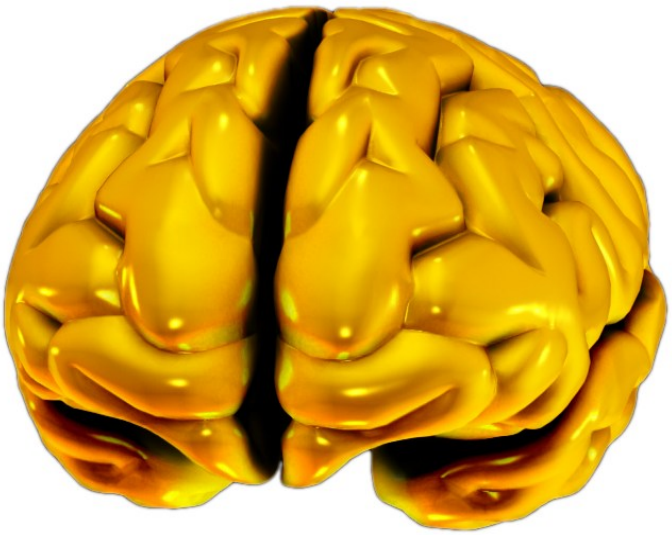
صورة 13: السويقات المخيخية.



صورة 14: مقارنة بين الدماغ والمخيخ.



صورة 15: مقارنة بين سطح قشرة المخيخ والقشرة الدماغية.



صورة 16: المخ.

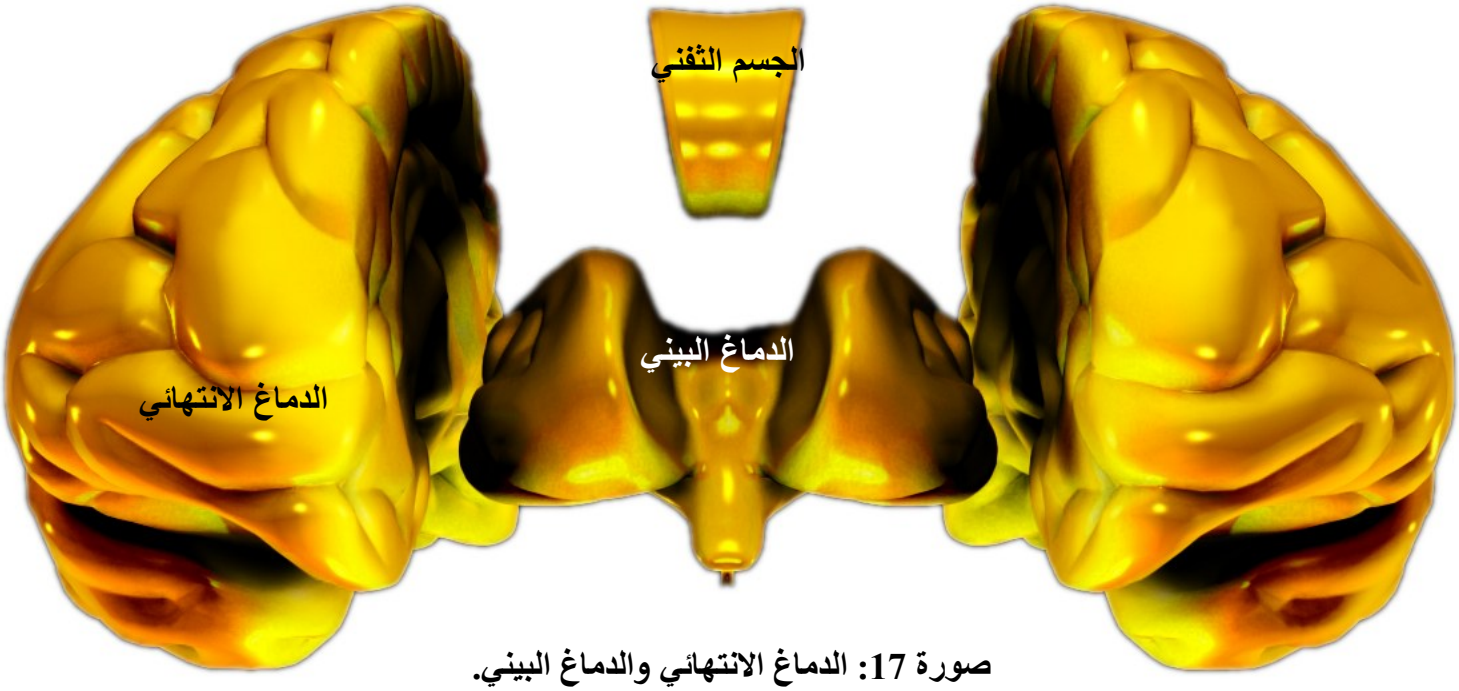
يتكون المخ [53] (الدماغ الأمامي (Prosencephalon) [8، 64]، وهو الجزء الأبرز في الدماغ) من نصفي كرة مخية، أيمن وأيسر، متماثلين تقريباً [224] يشكلان **الدماغ الانتهائي** (Telencephalon) [58]، بالإضافة إلى **الدماغ البيني** (Diencephalon) [41، 51]؛ وهو جزء متوسط غير مزدوج يغطيه الدماغ الانتهائي ويشمل **المهاد** و**تحت المهاد** [8، 59].

1. التكوين الداخلي:

يشكل نصفا الكرة المخية الجزء العلوي والأكبر من الجهاز العصبي المركزي [60]؛ ويرتبطان ببعضهما عبر صوارات عصبية، وخاصة الجسم الثفني [37، 61، 62].

يتكون كل نصف كرة مخية من منطقتين مميزتين: منطقة محيطية وهي القشرة **(المادة الرمادية)** [36، 49] التي تحتوي على أجسام الخلايا العصبية، ومنطقة مركزية مكونة من **المادة البيضاء** التي تحتوي أساساً على الامتدادات المحورية للخلايا العصبية بالإضافة إلى أغماد الميالين الخاصة بها [39].

داخل كل نصف كرة، توجد جزر من المادة الرمادية تسمى **العقد القاعدية** Basal Ganglia (BG) [4]. تشمل هذه النوى أساساً: **النواة الذيلية** Caudate nucleus [32، 66]، والبطامة (Putamen) [32، 51]، والكرة الشاحبة Globus Pallidus [32]، والعائق (Claustrum) [50].



صورة 17: الدماغ الانتهائي والدماغ البيني.

2. التكوين الخارجي:

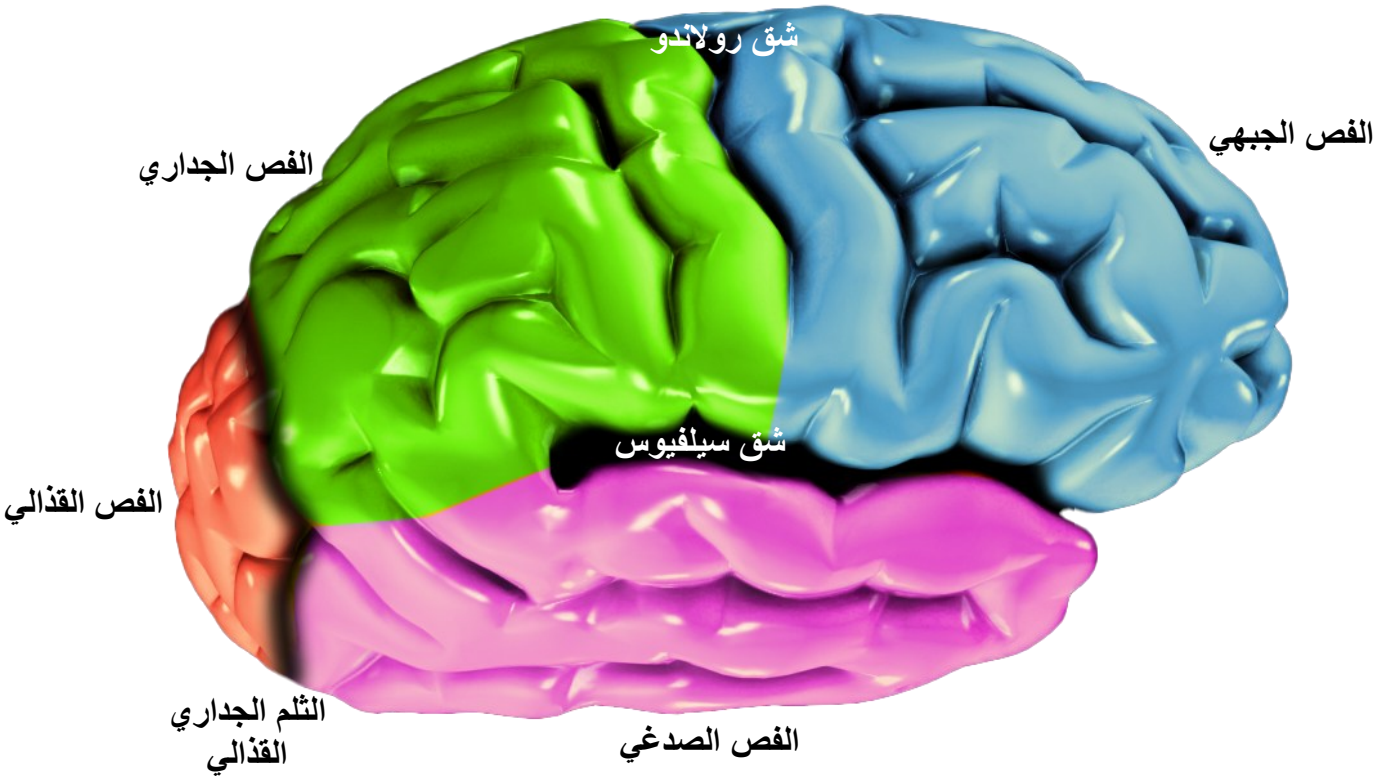
صورة 18: مقطع جبهي من الدماغ.

يتميز كل نصف كرة بأثلام عميقة Deep Sulci [91] تحدد **الفصوص** [224]. أولها هو **الثلم الجانبي** Lateral Sulcus (أو شق **سيلفيوس** [91]) الذي يمر عبره الشريان السيلفي [38]؛ ويفصل هذا الثلم **الفص الجبهي** Frontal Lobe عن **الفص الصدغي** Temporal Lobe.

الشق الثاني هو **الثلم المركزي** (أو شق **رولاندو** [63، 72]) الذي يفصل الفص الجبهي عن **الفص الجداري.**

الثالث هو **الثلم الجداري القذالي** [64] الذي يفصل **الفص القذالي** عن الفصين الصدغي والجداري.

هناك أيضاً فص خامس غير مرئي على السطح وهو الجزيرة (Insula) [65]، والذي يُكتشف عن طريق إزاحة شق سيلفيوس. وتوجد داخل كل فص أثلام ضحلة تحدد التلافيف [66].



صورة 19: منظر جانبي للدماغ.

السائل الدماغي الشوكي

صورة 20: السائل الدماغي الشوكي.

السائل الدماغي الشوكي Cerebrospinal Fluid (CSF) [3، 5] هو السائل الذي يغمر الجهاز العصبي المركزي [45، 67] (الدماغ والحبل الشوكي).

يضمن السائل الدماغي الشوكي:

- الحماية ضد الصدمات والاهتزازات الميكانيكية [5، 31، 42، 68]؛
- يلعب دوراً مهماً جداً في تنظيم الضغط داخل الجمجمة [42، 69]،
- يشارك في العمليات الأيضية الدماغية من خلال تنظيم تبادل المواد [42]،
- كما يؤدي العديد من الوظائف الأخرى [160].

صورة 21: الحجرة خارج الدماغ.

يدور السائل الدماغي الشوكي في حيزين مختلفين: حيز داخل الدماغ يتكون من تجاويف البطانة العصبية أو **البطينات** Ventricles ، وحيز خارج الدماغ يتمثل في الحيز **تحت العنكبوتي** Subarachnoid space.

يُفرز السائل الشوكي على مستوى **الضفائر المشيمية** Choroid Plexus [38]، وهي تجمعات من الشعيرات الدموية الموجودة داخل الجهاز البطيني [41].

هذا النظام، الذي يجوف الدماغ، يتكون من أربعة تجاويف كبيرة [70] (**البطينات الدماغية** [37]) متصلة ببعضها البعض عبر قنوات، ويستمر في الحبل الشوكي بالقناة المركزية [42].

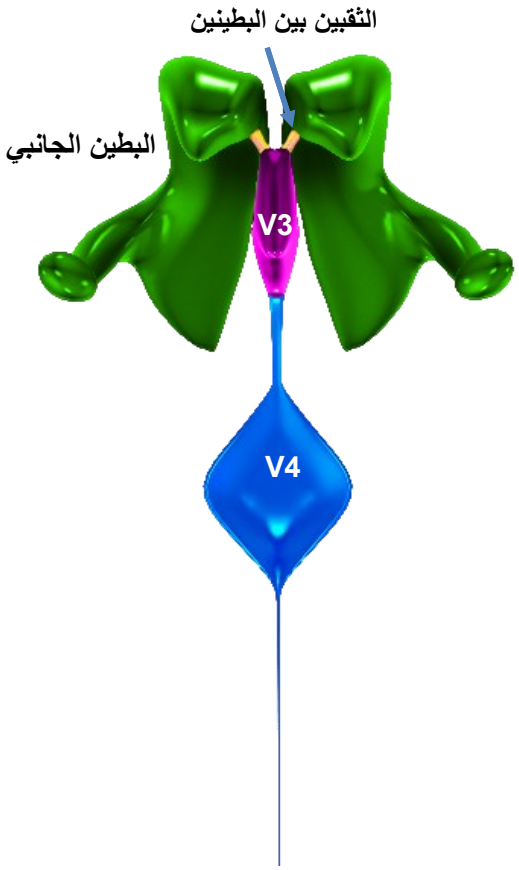
صورة 22: الحجرة داخل الدماغ.

هناك **بطينان جانبيان** [43، 66]، يشغل كل منهما مركز نصف كرة مخية. وهذان البطينان متصلان بالبطين الثالث [38، 224] في قلب الدماغ البيني عبر **الثقبين بين البطينين** (ثقبة **مونرو**) [2، 41، 71، 160].

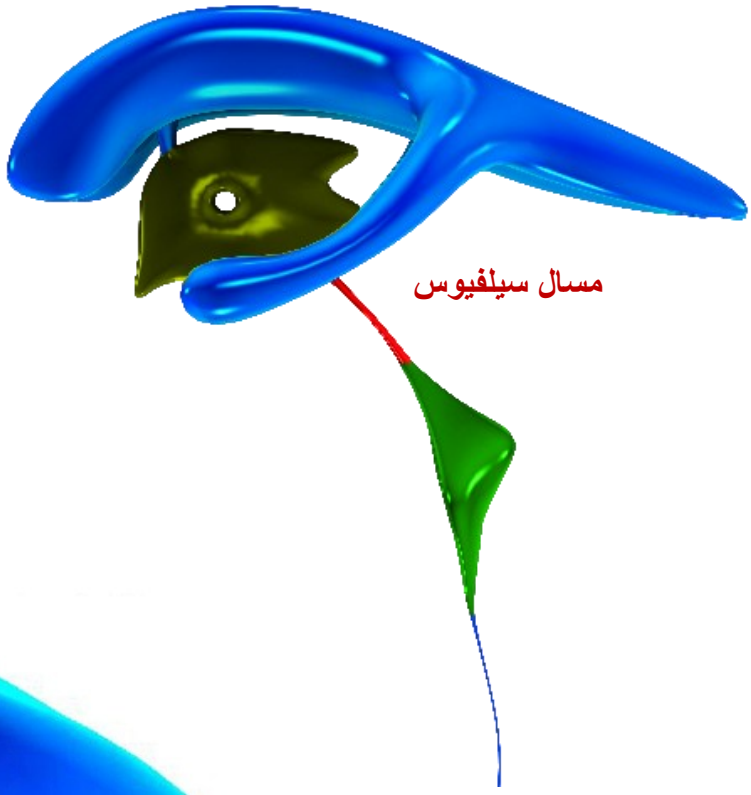
البطين الثالث متصل بالبطين الرابع [43، 51] على مستوى جذع الدماغ بواسطة **مسال سيلفيوس** [41، 43، 72]. من هناك، يخرج السائل الدماغي الشوكي عبر الفتحة الوسطى Foramen of

Magendie **(ثقبة ماجيندي)** [32، 38] ليشغل الحيز تحت العنكبوتي [43، 64، 230] الواقع بين الأم الحنون [38، 85] والأم العنكبوتية [64، 94].

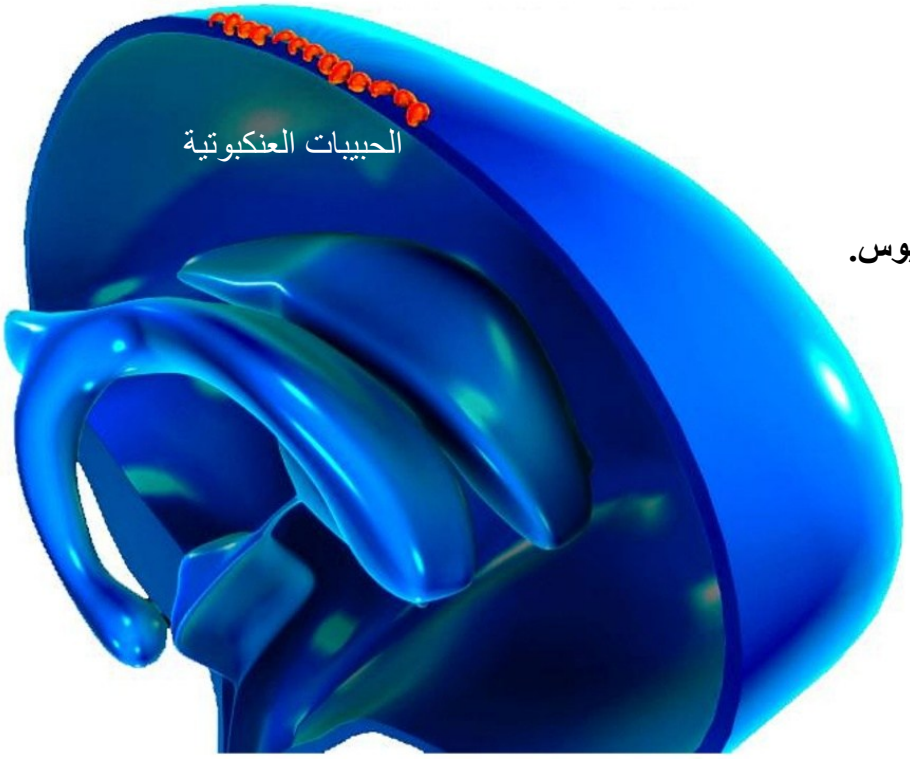
وفي النهاية، يتم امتصاص السائل الدماغي الشوكي من أعلى الجمجمة من خلال **الحبيبات العنكبوتية** Arachnoid Granulations (الحبيبات الباتشيونية) [160، 183، 226].



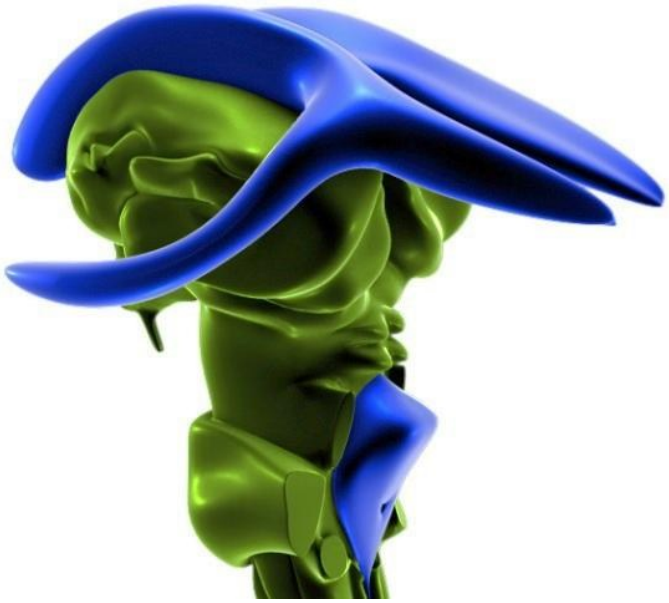
صورة 23: الجهاز البطيني.



صورة 24: مسال سيلفيوس.



صورة 25: امتصاص السائل الدماغي الشوكي.



صورة 26: الدماغ الداخلي.

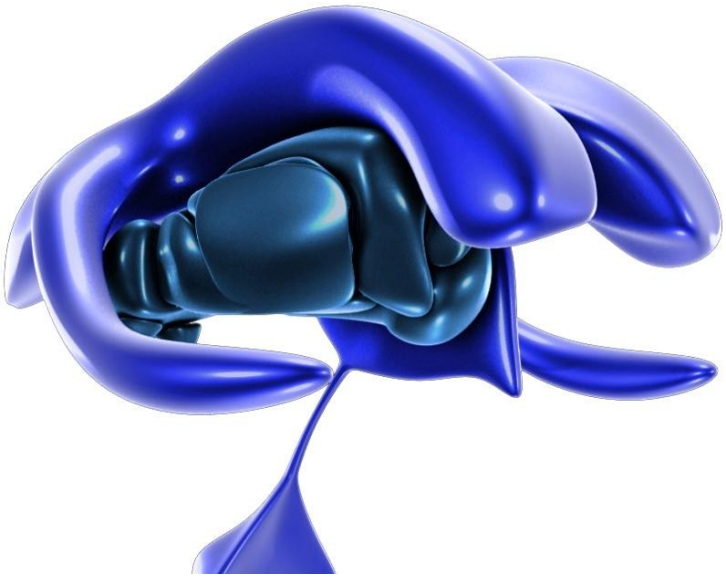
يعد الدماغ البيني [41، 51] البنية المركزية للجهاز العصبي الواقعة في مركز الدماغ، وهو مغطىً بنصفي الكرة المخية.

يحتوي الدماغ البيني على تجمعات من المادة الرمادية التي تؤدي دوراً حيوياً للغاية في الجسم، بما في ذلك المهاد Thalamus وتحت المهاد (الوِطاء) Hypothalamus .

1. المهاد:

المهاد [42، 75] مركب نووي يشغل جزءاً كبيراً من الدماغ البيني [40، 54]. يعمل المهاد كمحطة أساسية للغالبية العظمى من الواردات الحسية المتجهة إلى القشرة الدماغية [1، 38، 40]، ومن هنا جاء اسمه الذي يعني باليونانية "السرير" [40، 119، 140] أو "الغرفة الداخلية" [73]؛ تلك التي تسبق الغرفة الرئيسية. كما يلعب دوراً مهماً جداً في الوظائف الحركية [40، 75] ومعالجة المشاعر.

يتكون المهاد من كتلتين من المادة الرمادية [42]؛ يمنى ويسرى، تأخذ كل منهما شكلاً بيضاوياً [2، 36، 66]. وغالباً ما يرتبط هذان الجزءان في المركز بواسطة الالتصاق بين المهادين [38، 43]. يتكون المهاد من عدة نوى [2، 76] تؤدي كل منها دوراً محدداً؛ وهو يشكل الجدار الجانبي للبطين الثالث [38، 224]، ويحده من الأعلى والأمام الجسم والقرن الأمامي للبطين الجانبي [43، 66].

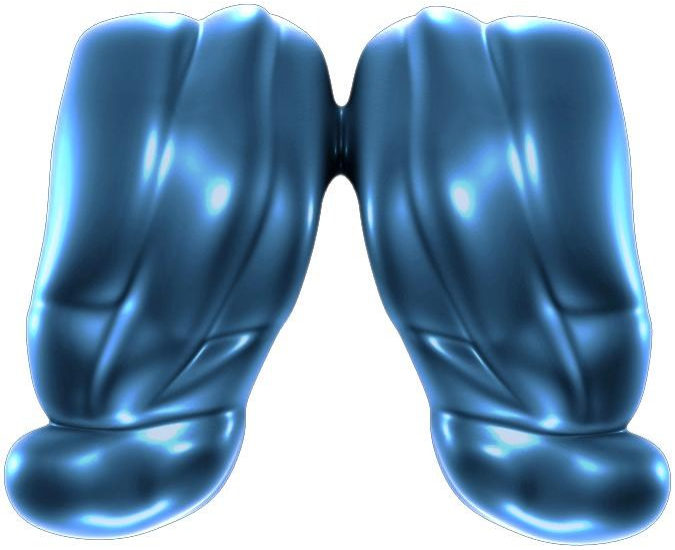


صورة 27: المهاد.

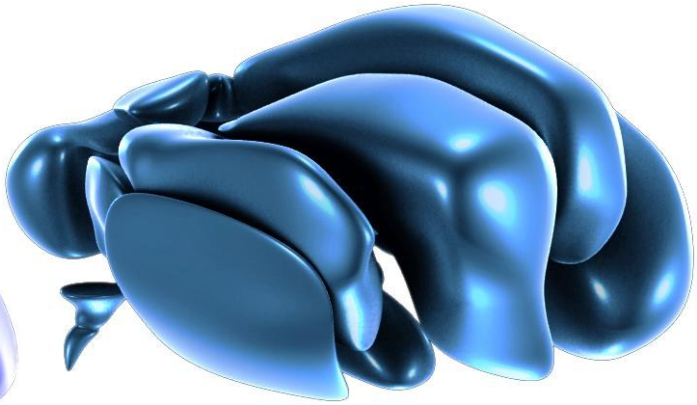
2. تحت المهاد (الوِطاء):

يقع **تحت المهاد** [4، 41، 50] مباشرة أسفل المهاد [42] وأمامه [54]؛ وهو أصغر بكثير في الحجم والكتلة مقارنة بالمهاد، ومع ذلك، فإن دوره في الجسم ليس بسيطاً بأي حال من الأحوال [54، 76].

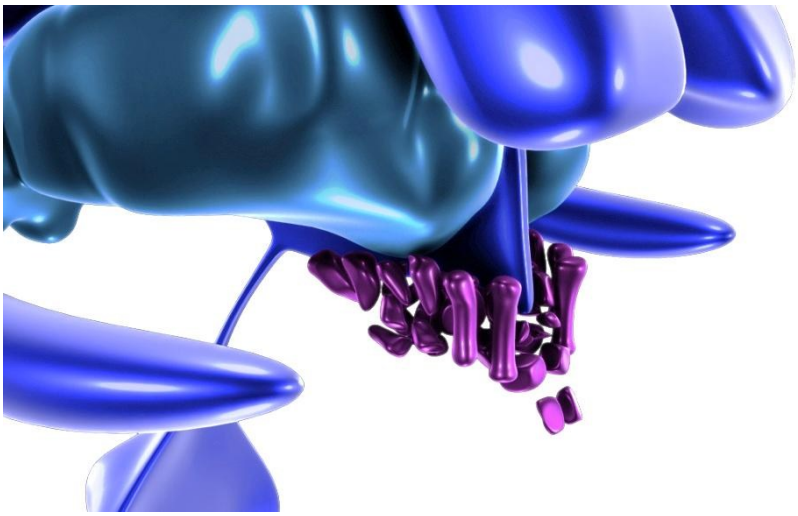
يتكون تحت المهاد من عدة نوى مميزة [39] تؤدي وظائف متنوعة [4، 38]؛ بما في ذلك التنظيم الحراري [5، 77]، والتحكم في الشهية، وتنظيم دورة النوم واليقظة. كما يلعب دوراً حيوياً في تعديل الجهاز العصبي الذاتي [4]. ويُعد تحت المهاد (الوطاء) المحرك الأساسي للغدد الصماء في الجسم بأكمله؛ حيث يتحكم في إفرازات **الغدة النخامية** التي تنتج الهرمونات الرئيسية في الجسم [69].



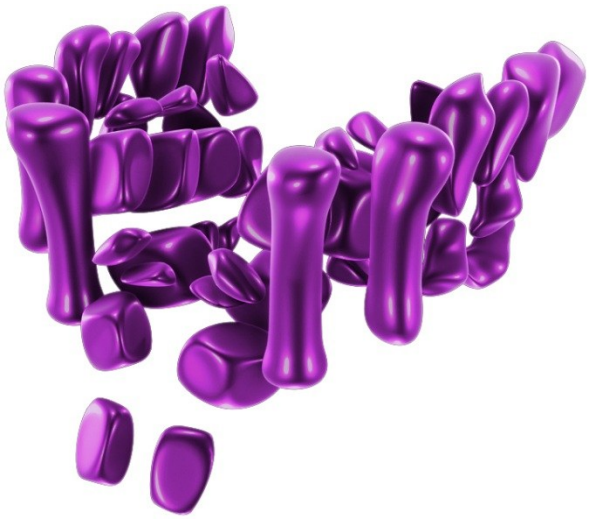
صورة 28: الثالامي، الرؤية العليا.



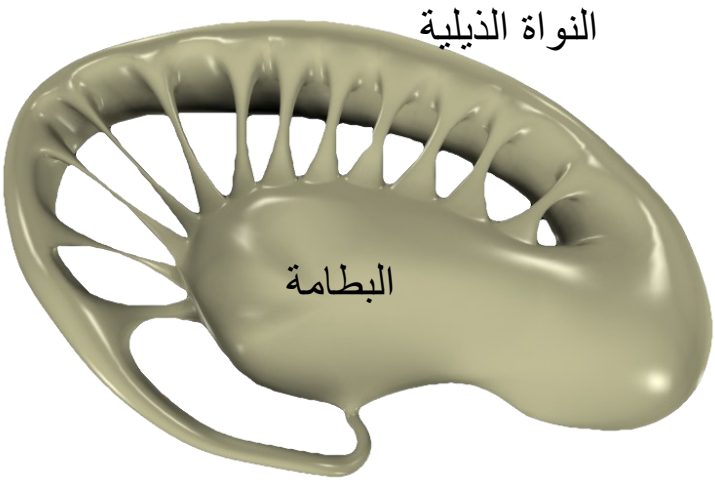
صورة 29: نوى المهاد.



صورة 30: موقع الوِطاء



صورة 31: نوى منطقة تحت المهاد.



صورة 32: المخطط المخطط (المخطط الهوائي).

"...تلك الأسس المظلمة للدماغ..." - كينير ويلسون Kinnier Wilson (1925).

العقد القاعدية (Basal Ganglia BG) [4، 54، 91] هي مجموعة من النوى تحت القشرية المترابطة بشكل وثيق. وتبدو رمادية اللون لأنها تحتوي بشكل أساسي على أجسام الخلايا العصبية. تلعب العقد القاعدية دوراً حيوياً في التحكم الحركي [53].

توجد أربع نوى رئيسية هي: **المخطط** [80] (Striatum)، **والكرة الشاحبة** Globus Pallidus [32، 64] ، **والنواة تحت المهاد** Subthalamic Nucleus (STN)، **والمادة السوداء** (Substantia Nigra / Locus Niger) [4]، بالإضافة إلى بعض الهياكل الدماغية الأخرى التي تُلحق بالعقد القاعدية. (يدرج بعض المؤلفين المهاد ضمن العقد القاعدية [39، 66]، لكن المعظم يعاملونها بشكل منفصل).

1. المخطط:

يتكون من نواتين كبيرتين:

1 .1. النواة الذيلية:

تأخذ النواة الذيلية Caudate Nucleus [32، 66] شكلاً منحنياً، وتتميز من الأمام إلى الخلف بوجود رأس، وجسم، وذيل.

1 .2. البطامة:

البطامة [32، 51] هي بنية ضخمة ومستديرة، تقع في وضع جانبي بالنسبة للكرة الشاحبة.

2. الكرة الشاحبة:

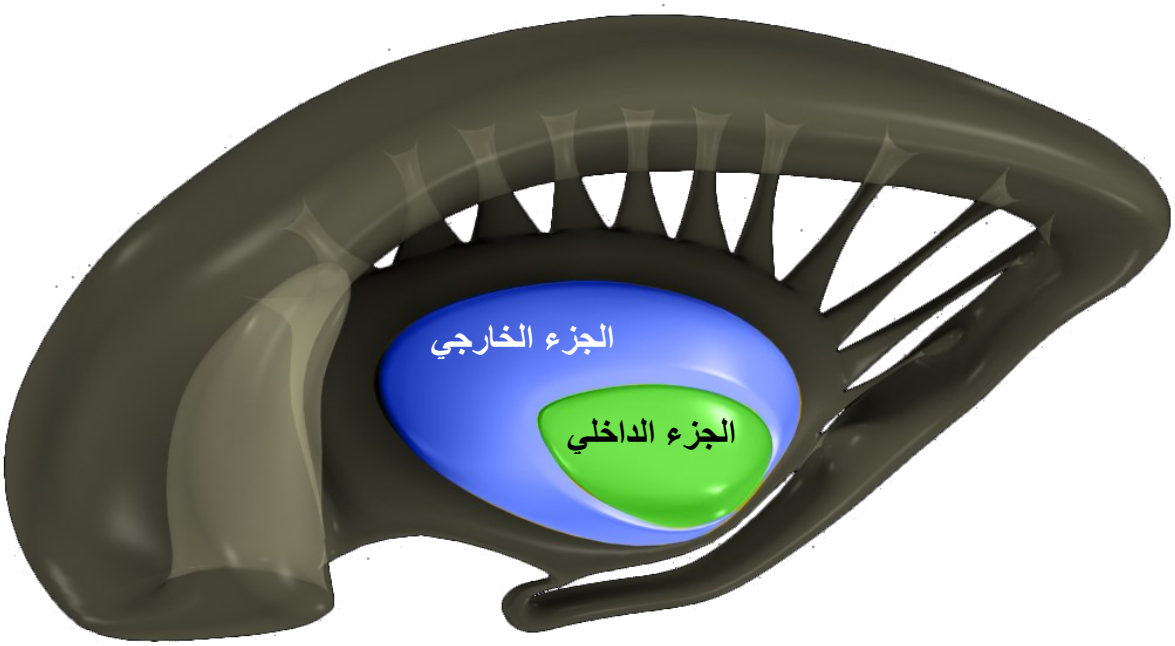
تسمى الكرة الشاحبة أيضاً (Globus Pallidus)، وتتكون من جزء داخلي وآخر خارجي. وتشكل مع البطامة Putamen ما يُعرف **بالنواة العدسية** (Lentiform Nucleus) [2، 37، 66] (سميت بهذا الاسم نظراً لشكلها المثلثي في المقطع الإكليلي).

3. النواة تحت المهادية:

تُعرف أيضاً بـ (جسم لويس[64] Body of Luys)، وتقع أسفل المهاد وفوق الدماغ المتوسط. وهي بنية صغيرة على شكل عدسة ثنائية التحدب.

4. المادة السوداء:

اشتق اسم المادة السوداء [38] (Locus Niger) من لون خلاياها المكونةِ الغنيةِ بمادة الـ"نيوروميلانين Neuromelanin " سوداء اللون. تلعب دوراً بالغ الأهمية في الوظائف الحركية، حيث تنتج الدوبامين (ناقل عصبي أساسي) بالتعاون مع هياكل دماغية أخرى. ويعد تضرر هذه المنطقة السبب الرئيسي لمرض باركنسون [79].



صورة 33: الكرة الشاحبة.

1. الغدة النخامية:

الغدة النخامية (Hypophysis) [81,82,83]هي غدة صماء تقع في تجويف عظمي (**السرج التركي** Sella Turcica [84]) وترتبط بمنطقة تحت المهاد أعلاه بواسطة **السويقة النخامية** Pituitary Stalk [64]. وهي صغيرة الحجم لكنها تلعب دوراً مهماً للغاية في الجسم، نظراً لتنوع الهرمونات التي تنتجها.

نميز جزأين من الغدة النخامية، ولهما أصول جنينية مختلفة: الجزء الأمامي وهو **الغدة النخامية الأمامية** (النخامية الغدية Adenohypophysis)، والجزء الخلفي وهو **الغدة النخامية الخلفية** (النخامية العصبية Neurohypophysis).

1. 1. الغدة النخامية الأمامية:

تفرز النخامية الغدية [42]: **هرمون النمو** (Growth Hormone GH)، و**البرولاكتين**، و**الهرمون المنبه للجريب** Follicle-Stimulating Hormone (FSH)، و**الهرمون اللوتيني** Luteinizing Hormone (LH)، **وهرمون قشر الكظر** Adrenocorticotropic Hormone (ACTH)، و**الهرمون المنبه للدرقية** Thyroid-Stimulating Hormone (TSH)، و**الهرمون المنبه للخلايا الميلانينية** melanocyte-stimulating hormone (MSH).

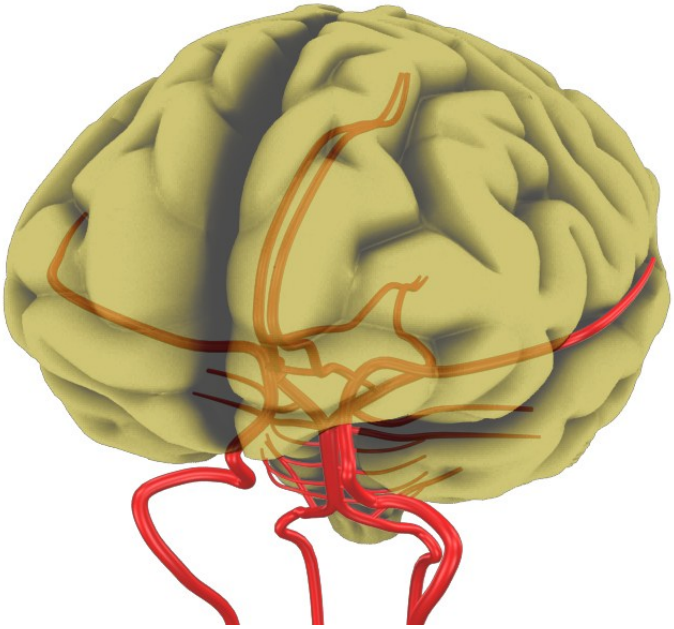
1. 2. الغدة النخامية الخلفية:

لا تتكون النخامية العصبية [42] من خلايا غدية حقيقية، بل تحتوي على نهايات عصبية للخلايا العصبية التي تنشأ في تحت المهاد، والتي تفرز **الأوكسيتوسين** oxytocin و**الفازوبريسين** vasopressin (هرمون ADH Antidiuretic Hormone أو مضاد إدرار البول) مباشرة إلى مجرى الدم عبر الإفراز العصبي.

2. الغدة الصنوبرية (Epiphysis):

وتسمى أيضاً (**المشاش المخي** Pineal Gland) [4، 40، 42]، وهي غدة صماء تقع خلف البطين الثالث. تفرز **الميلاتونين**، الذي يلعب دوراً أساسياً في تنظيم الإيقاع اليومي (الساعة البيولوجية الداخلية للجسم).

كان **ديكارت** يعتبر هذه الغدة "مقعد الروح" (دعامة العقل) [39].



صورة 34: التروية الشريانية للدماغ.

يتم تأمين كامل التروية الشريانية [41] للدماغ بواسطة نظامين شريانيين: **الشريانان السباتيان الداخليان** Internal Carotid Arteries [85، 86] في المقدمة، **والشريانان الفقريان** Vertebral Arteries [86، 87] (أو **الجهاز الفقري القاعدي** Vertebrobasilar System [88، 89، 90]) من الخلف.

تترابط هذه المحاور الأربعة الرئيسية ببعضها على عدة مستويات، لا سيما في قاعدة الدماغ بواسطة **حلقة ويليس** (Circle of Willis) [86، 91]. وتعمل هذه الحلقة التفاغرية كنظام أمان؛ فإذا حدث قصور في أحد المحاور، فإن إمداد الدم من المحاور الأخرى يعوض هذا العجز.

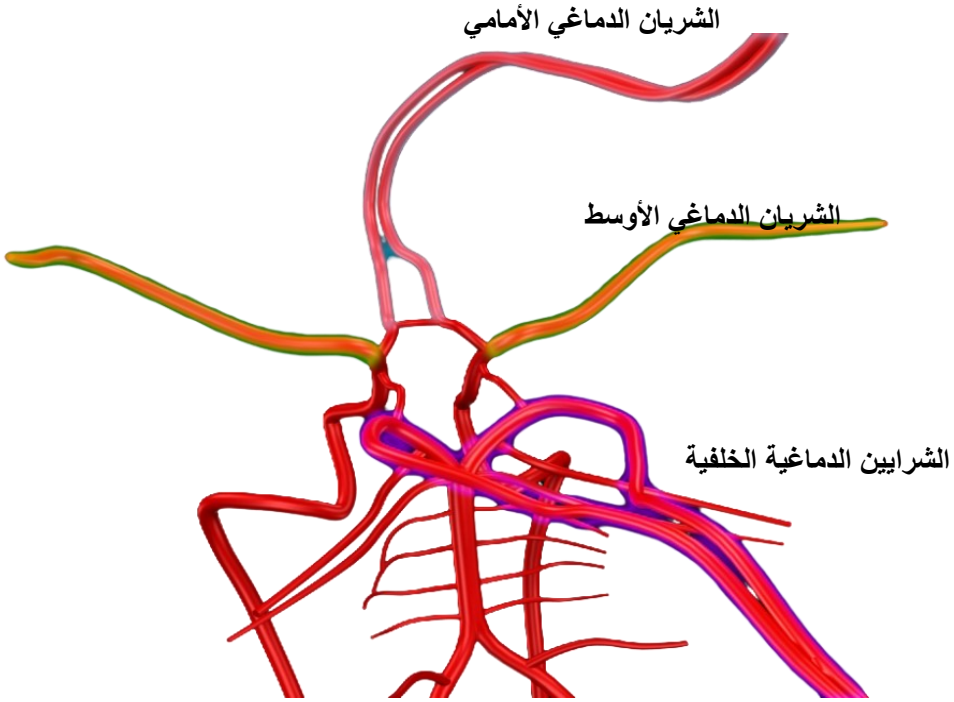
ومن هذه الحلقة التفاغرية Anastomotic Circle تنشأ الشرايين الدماغية الرئيسية.

يعطي الشريانان السباتيان الداخليان فرعين أساسيين: **الشريان الدماغي الأمامي** Anterior Cerebral Artery [2] الذي يغذي **الجزء الإنسي** Medial Part من نصف الكرة المخية، **والشريان الدماغي الأوسط** Middle Cerebral Artery [2] الذي يغذي **الجانب الوحشي** Lateral Side من نصف الكرة المخية.

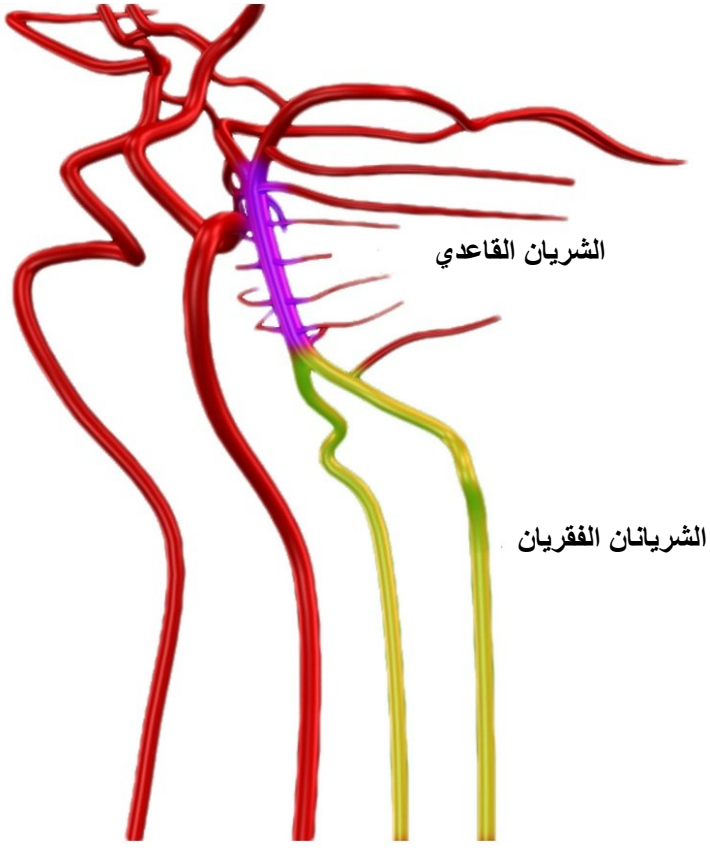
يندمج **الشريانان الفقريان** لتشكيل جذع مشترك وهو **الشريان القاعدي** Basilar Artery [2]، الذي يمد جذع الدماغ والمخيخ بالفروع الشريانية. ثم ينقسم ليشكل **الشريانين الدماغيين الخلفيين** Posterior Cerebral Arteries

صورة 35: دائرة ويليس.

[51] اللذين يتجهان إلى **الفص القذالي** والجزء البطني من **الفص الصدغي**.



صورة 36: الشرايين الدماغية.



صورة 37: الجهاز الفقري القاعدي.

المبادئ الأساسية

المبادئ الأساسية - مفاهيم عامة 37
الخلايا العصبية 38
الخلايا الدبقية..... 43
السيالة العصبية 48
المشابك..... 51
الوصلة العصبية العضلية 55
الناقلات العصبية 58
الحاجز الدموي الدماغي..... 61
اللدونة العصبية 63

يتكون الجهاز العصبي، وهو أكثر الأنسجة تعقيداً في الوجود [92]، بشكل أساسي من فئتين رئيسيتين من الخلايا [52، 93]: **الخلايا العصبية** Neurons [41، 52، 64، 94، 100] (الوحدات الوظيفية [39، 64])، و**الخلايا الدبقية** Glial Cells [50، 57] وهي خلايا داعمة [36، 39]. بدون هذه الأخيرة، لن تكون الخلايا العصبية قادرة على العمل، أو على الأقل ستواجه صعوبة كبيرة في ذلك.

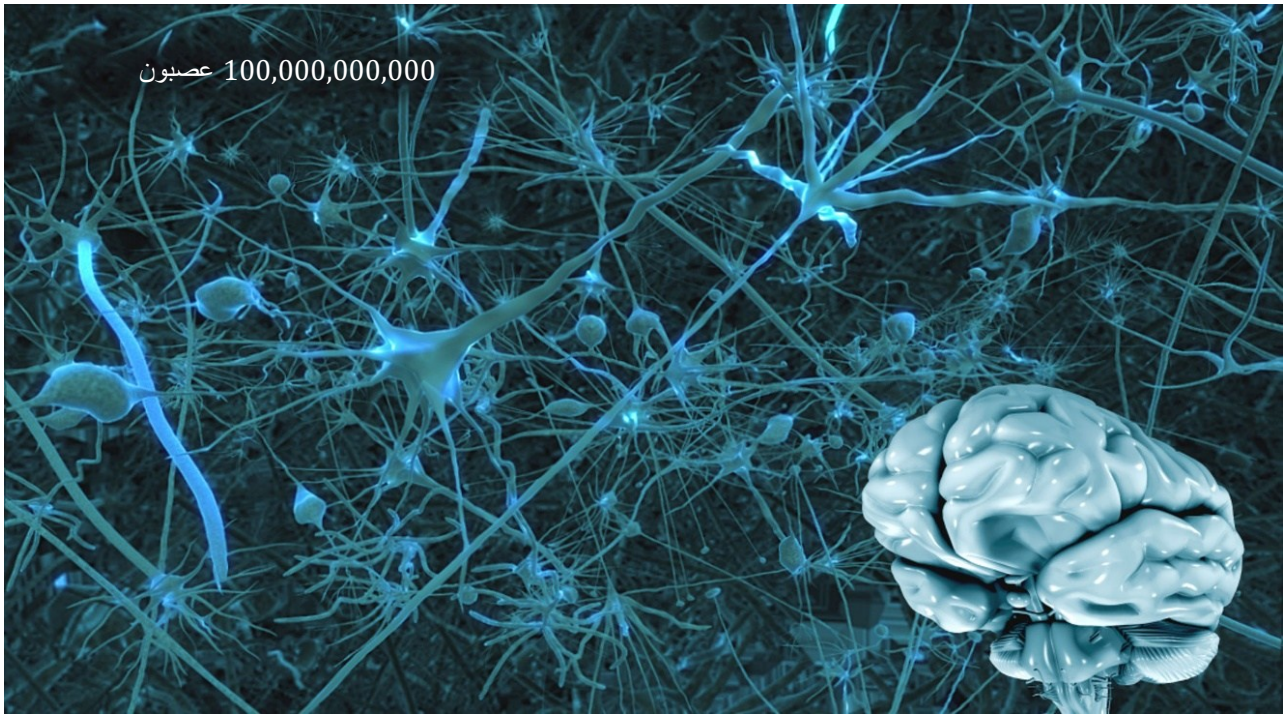
توجه الخلايا العصبية تقريباً كل طاقتها نحو هدف واحد وهو: **نقل الإشارات العصبية** [39، 75، 95]. أما الخلايا الدبقية، فهي المسؤولة عن حمايتها وتغذيتها وتحسين وظيفتها.

يعود انتقال النبضات العصبية عبر الخلايا العصبية إلى الخصائص الكهروكيميائية لأغشية البلازما الخاصة بها [96]. وتنتقل الإشارات من خلية عصبية إلى أخرى عبر وصلات تسمى **المشابك** (Synapses) [41، 52]. وهناك نوع محدد جداً من هذه المشابك يربط الخلية العصبية بخلية مستجيبة (مثل الليف العضلي)؛ يسمى هذا المشبك **الوصلة العصبية العضلية** Neuromuscular Junction [4، 40].

يتم انتقال المعلومات عبر المشبك العصبي بواسطة جزيئات كيميائية تسمى **الناقلات العصبية** Neurotransmitters [39، 40، 41، 52]. الأداء السليم للجهاز العصبي المركزي أمر ضروري للغاية، لدرجة أنه معزول عن بقية الجسم بواسطة حاجز يحد من مرور المواد الضارة المحتملة وهو: الحاجز الدموي الدماغي Blood-Brain Barrier [3، 41، 42، 70، 81].

وأخيراً، فإن أعظم قدرة للجهاز العصبي هي قدرته على التكيف والتعديل المستمر حسب الحاجة؛ حيث تتشكل أو تقوى آلاف الدوائر العصبية الجديدة يومياً. وتفتح هذه القدرة، المعروفة بـ**اللدونة العصبية** Neuroplasticity [97، 98]، آفاقاً واسعة لعلاج العديد من الاضطرابات، خاصة تلك ذات الطبيعة الحسية.

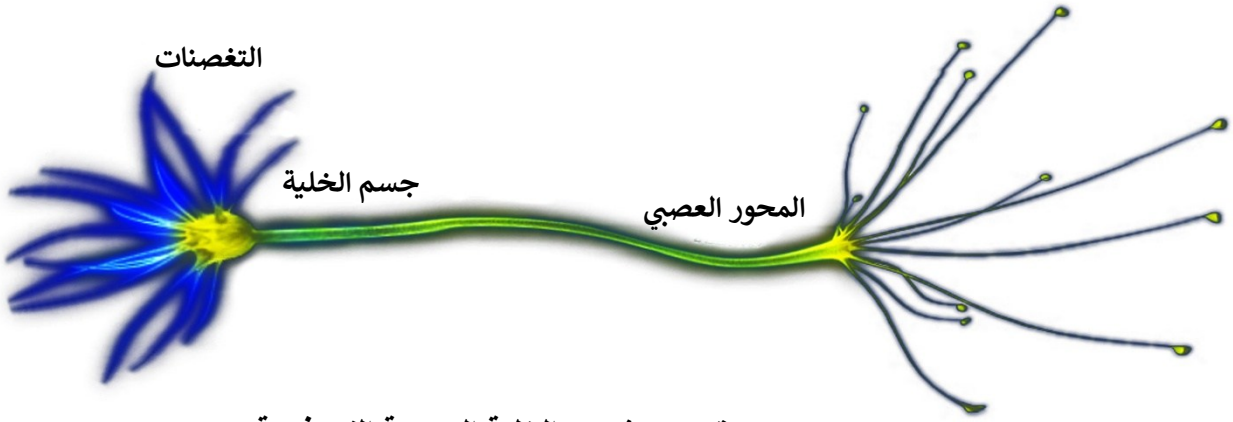
الخلية العصبية [41، 52، 64، 94، 100] أو **العصبون** هي الوحدة الهيكلية والوظيفية للجهاز العصبي [39، 64]. يحتوي الأخير على حوالي 100 مليار عصبون [1، 4].



صورة 38: نسيج عصبي.

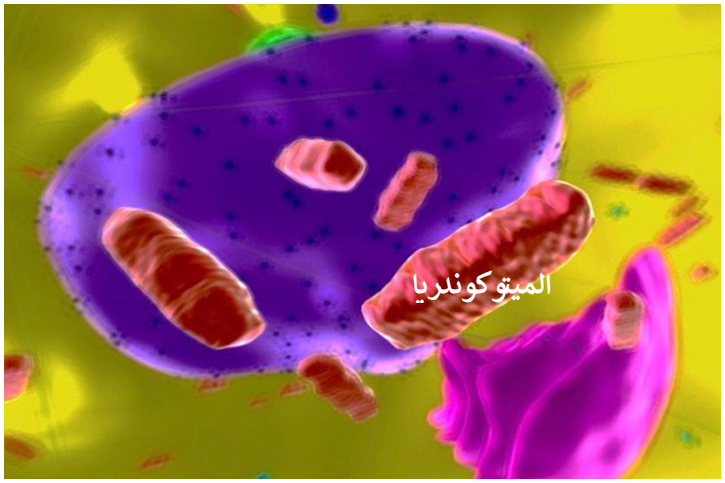
1. تشريح العصبون النموذجي:

يحتوي العصبون النموذجي على ثلاث مناطق مميزة [1، 40، 99]: **جسم الخلية** Cell body ، **والتغصنات** Dendrites، **والمحور العصبي** Axon.



صورة 39: تشريح الخلية العصبية النموذجية.

1 .1. جسم الخلية:



صورة 40: الميتوكوندريا.

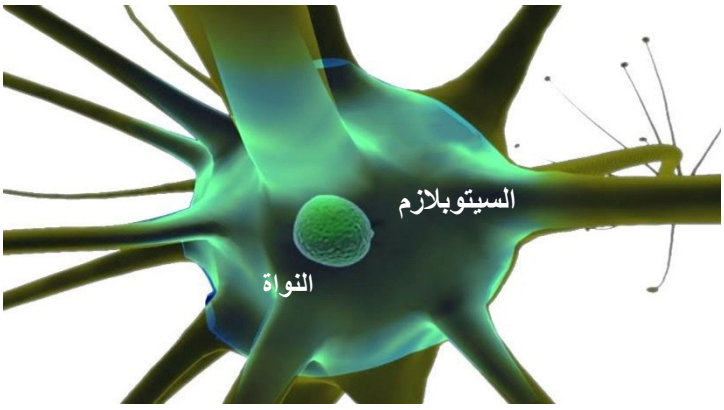
ويعرف أيضاً ب(السوما) (Soma) [5، 75] أو Perikaryon [57، 101]، ويحتوي على **النواة والسيتوبلازم**، ويشمل:

- **شبكة إندوبلازمية خشنة** rough endoplasmic reticulum: موقع تخليق البروتين.
- **جهاز جولجي** Golgi apparatus : موقع تخزين ونضج البروتين. وهي نقطة المرور الإلزامية والمنظمة لحركة الحويصلات الصغيرة.
- عدة **ميتوكوندريا**، توفر الطاقة اللازمة لاستقلاب الخلايا.

يختلف قطر جسم الخلية حسب نوع العصبون، ويتراوح بين 5 إلى 120 ميكرومتر [91، 102].

1 .2. التغصنات:

هي امتدادات لجسم الخلية [5، 96]؛ تهدف بشكل أساسي إلى زيادة مساحة السطح المستقبلة للنبضات العصبية [1، 4، 36]. وغالباً ما تُغطى بهياكل تشبه البراعم تسمى الأشواك التغصنية Dendritic Spines [41، 74، 103]. يحتوي العصبون النموذجي على عشرات الآلاف من هذه الأشواك، كل منها يشكل مشبكاً عصبياً [74].



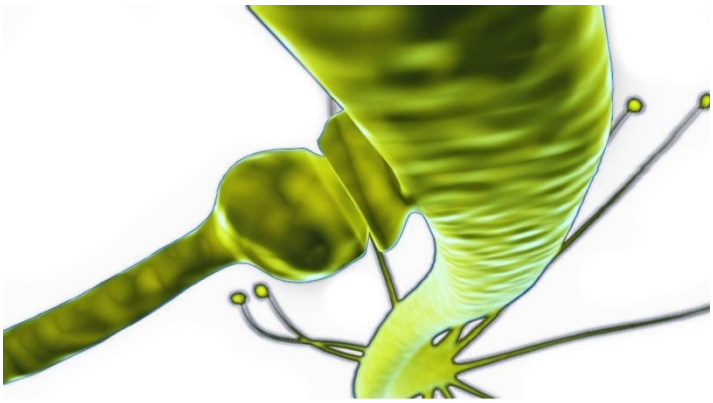
صورة 41: جسم الخلية في الخلية العصبون.

1 .3. المحور العصبي (المحوار):

ينبثق المحوار [5، 91، 96] من جسم الخلية بدءاً من **ربوة المحوار** Axon Hillock [81، 104]، وهي منطقة غنية جداً بالأنابيب الدقيقة، وتسمى أيضاً منطقة الزناد [40، 81] لأنها نقطة البداية المعتادة للنبضات العصبية [40].

يتبع المحوار مساراً بطول متغير قبل أن ينتهي **بتشجر انتهائي** (telodendria) [75]. وهذا يؤدي إلى عدة نهايات عصبية، وفي طرف كل منها يوجد انتفاخ يسمى **الزر الانتهائي** terminal button أو المقبض المشبكي synaptic knob [101]، والذي يحتوي على عدة حويصلات مشبكية مملوءة بالناقلات العصبية. قبل التشجر النهائي، قد يصدر العصبون عدة فروع تحمل السيالة العصبية إلى أماكن أخرى؛ تسمى الفروع الجانبية للمحوار [105].

يحيط غشاء المحور العصبي (أكسوليما Axolemma [106]) **بالأكسوبلازم** Axoplasm [91] (امتداد لسيتوبلازم جسم الخلية)، الذي يتم عبوره طولياً بواسطة خيوط عصبية وأنابيب دقيقة تثبت بنية المحوار وتضمن النقل ثنائي الاتجاه للمواد بين جسم الخلية والأطراف المحورية [74].



صورة 42: مشبك محوري- محوري.

2. النقل المحوري:

هناك أربعة أنواع من النقل المحوري [35، 50، 107]:

ناقلان سريعان (أمامي وخلفي): يحملان الحويصلات بسرعة تتراوح بين 10 إلى 40 سم/يوم [108] من جسم الخلية إلى نهاية العصب والعكس صحيح.

نقل بطيء أمامي: بسرعة تتراوح بين 0.1 إلى 2 مم/يوم [57].

نقل ميتوكوندري [104]: يجدد الميتوكوندريا في النهايات العصبية باستمرار بسرعة من 1 إلى 4 سم/يوم [5].

3. خصائص الخلية العصبية:

صورة 43: الهيكل الخلوي للخلايا العصبية.

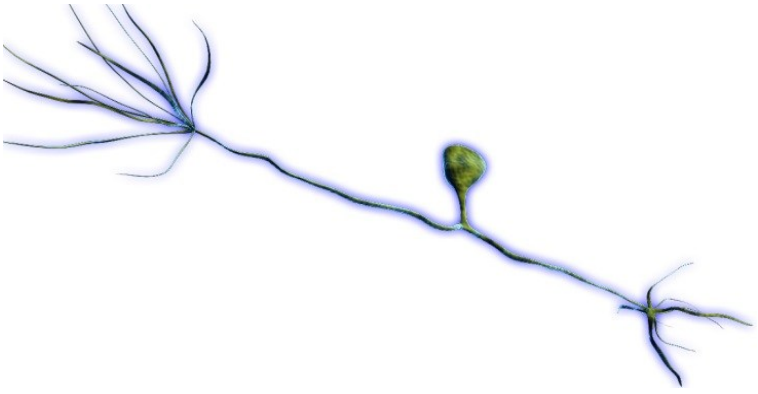
يمتلك العصبون عدة خصائص تميزه عن الخلايا الأخرى في الجسم:

1 .1. خلية قابلة للإثارة:

يستقبل العصبون وينقل إشارات كهروكيميائية بفضل بروتينات غشائية تنظم انتقال الأيونات [42، 110].

1 .2. خلية إفرازية:

تفرز الخلية العصبية ناقلات عصبية (وأحياناً هرمونات) عند طرفها المحوري [109].

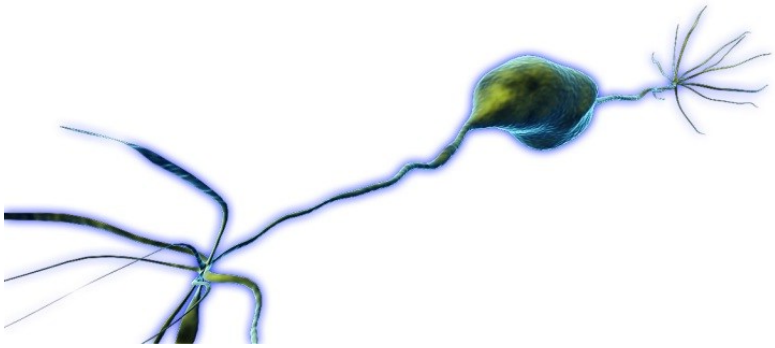


صورة 44: عصبون أحادي القطب.

1 .3. خلية لا انقسامية:

باستثناء بعض المناطق (مثل **الحصين** hippocampus) [40]، لا تنقسم الخلايا العصبية بعد النضج، مما يجعلها خلايا ذات طول عمر فائق. وهذا يفسر ندرة الأورام الدماغية ذات الأصل العصبي [110].

نفقد يومياً عشرات الآلاف من الخلايا العصبية [111]. ومع أنها غالبا لن تتجدد، لا يؤدي ذلك لاضطراب ملحوظ بسبب اللدونة العصبية التي تعوض هذا الفقدان.



صورة 45: عصبون ثنائي القطب.

1 .4. خلية مستقطبة:

لها قطبان أساسيان [112]: **الشجرة الجسدية التغصنية**، تستقبل الإشارة، والقطب **المحوري**، ينشرها. مع ذلك، يمكن للمحور العصبي استقبال إشارة مباشرة عند مستوى **المشبك المحوري-المحوري** [75].

1 .5. خلية ذات معدل أيضٍ عالٍ جداً:

يحتاج العصبون إلى إمداد مستمر بالأكسجين والجلوكوز high metabolism [110]، مما يفسر الموت الدماغي خلال دقائق عند نقص الأكسجة.

1 .6. تتميز الخلايا العصبية بتعدد أشكال استثنائي:

يتم تمييز أكثر من 150 نوعا [Jeanette Norden - Understanding the Brain] حسب حجمها وقطبيتها وبنيتها ووظيفتها وموقعها[35]. وبناءً على شكلها، نميز ثلاث فئات رئيسية [40، 49].

- الخلايا العصبية **أحادية القطب** أو شبه أحادية القطب (غالبا حسية).
- الخلايا العصبية **ثنائية القطب** (مثل بعض الخلايا العصبية البينية).
- الخلايا العصبية **متعددة الأقطاب** (مثل الخلايا العصبية الحركية).

صورة 46: عصبون متعدد الأقطاب.

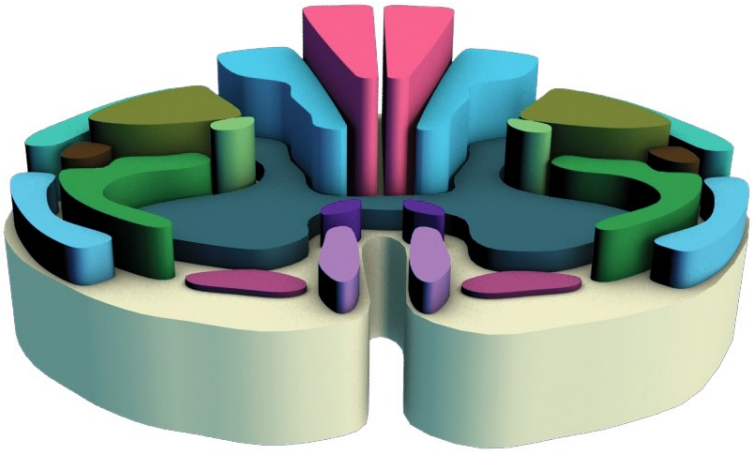
وظيفياً، نميز بين الخلايا العصبية الحسية (نحو الجهاز العصبي المركزي)، والخلايا العصبية الحركية (بعيداً

عنه)، والخلايا البينية (Interneurons) التي تربط بينهما. تتجمع ألياف الأعصاب في مسارات داخل الجهاز العصبي المركزي وأعصاب في الجهاز المحيطي، بينما تتجمع أجسام الخلايا في القشرة والنوى (مركزي) والعقد (محيطي).

1 .7. الخلايا العصبية هي أطول الخلايا في الجسم:

يمكن أن يصل طولها إلى متر واحد [113].

إذا كان جسم الخلية بحجم برتقالة ، فإن التغصنات ستكون بطول 2 إلى 5 سم، والمحور العصبي سيكون بطول ألف متر.

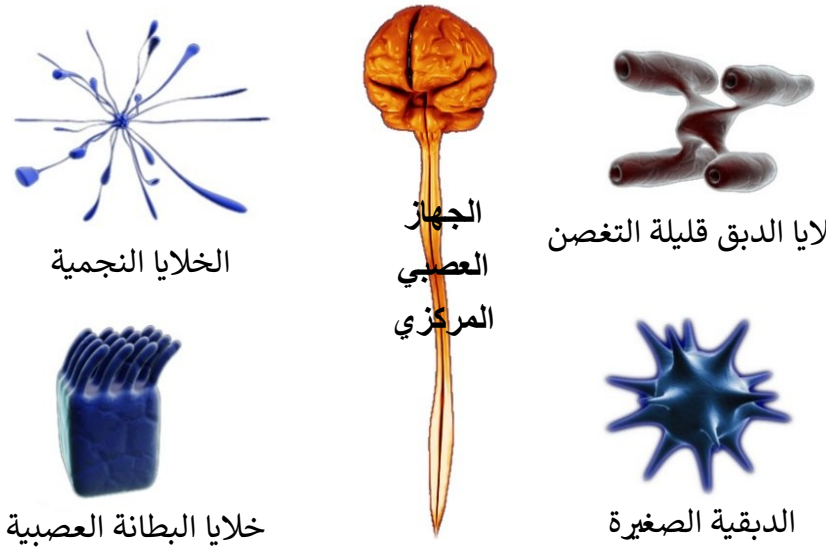


صورة 47: المسارات داخل الجهاز العصبي المركزي.

صورة 48: الخلايا الدبقية.

على الرغم من تعقيد وكثافة الخلايا في الأنسجة العصبية، إلا أنها تتكون بشكل رئيسي من فئتين كبيرتين من الخلايا [52، 93]: الخلايا العصبية [41، 52، 64، 94، 100]، اللاعب الرئيسي والنهائي في نقل النبضات العصبية، والخلايا الدبقية Glial cells [50، 57، 114] - وتسمى أيضاً خلايا الدبق العصبي [116] - التي تعمل بمثابة دعامات للخلايا العصبية، من بين أدوار أخرى.

بينما يحتوي الجهاز العصبي على حوالي 100 مليار خلية عصبية [1، 4]، فإن الخلايا الدبقية تفوقها عدداً بحوالي عشر مرات [114، 115]؛ وهذا يثبت الدور المهم الذي تلعبه هذه الخلايا.



صورة 49: الخلايا الدبقية المركزية.

عند اكتشافها في النصف الثاني من القرن التاسع عشر [100، 116، 117]، كان يُعتقد أن الخلايا الدبقية (مشتقة من كلمة "دبق" وتعني "الغراء") تُستخدم أساساً كغراء لربط الخلايا العصبية معاً [40، 118]. مع مرور الوقت، نُسبت لها العديد من الوظائف الأساسية الحاسمة لعمل الخلايا العصبية [40، 57].

على عكس الخلايا العصبية التي تكون في الغالب لا انقسامية، يمكن للخلايا الدبقية أن تتكاثر [36، 119].

هناك فئتان من الخلايا الدبقية [120]:

- الخلايا الدبقية المركزية: وتشمل الأنواع الأربعة من الخلايا الدبقية في الجهاز العصبي المركزي: **الخلايا النجمية، والخلايا الدبقية قليلة التغصن**، وخلايا **البطانة العصبية**، **والدبقية الصغيرة**.
- الخلايا الدبقية المحيطية: وتشمل **الخلايا الساتلة** وخلايا **شوان**.

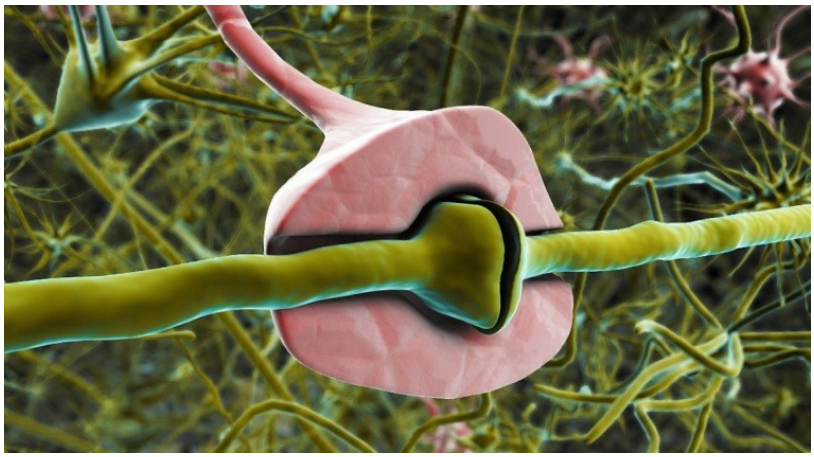
صورة 50: الخلايا النجمية من النوع الأول، المحيطة بشعيرات الدم.

1. الخلايا النجمية:

تُعد الأكثر وفرة وأكبرها حجماً [1، 35، 94، 121]، وهي على شكل نجمة مع عدة استطالات. يتم التمييز بين: الخلايا النجمية من **النوع الأول** [35، 70] التي تلامس الشعيرات الدموية، والخلايا النجمية من **النوع الثاني** [35، 70] التي تحيط بالخلايا العصبية والشقوق المشبكية، مما يمنع تشتت الناقلات العصبية.

للخلايا النجمية Astrocytes العديد من الوظائف [104]، منها:

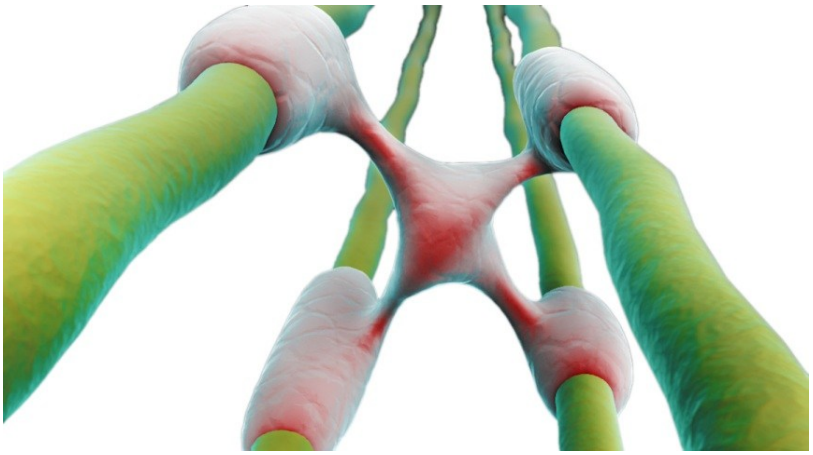
- تلعب دوراً حيوياً في تكوين الحاجز الدموي الدماغي [39].
- تضمن توفر الأكسجين والعناصر الغذائية للخلايا العصبية [40].
- تساعد في الحفاظ على بيئة كيميائية مناسبة لإنتاج جهود الفعل [40، 116].
- تلتقط الناقلات العصبية الزائدة في الشق المشبكي وتشارك في عملية الأيض [57، 116].
- توفر الدعم البنيوي من خلال تشكيل شبكة تحافظ على بنية النسيج العصبي [2].
- تتشكل ندوب الدبقية في المناطق التالفة من الدماغ [50].



صورة 51: خلية نجمية من النوع الثاني تحيط بمشبك عصبي.

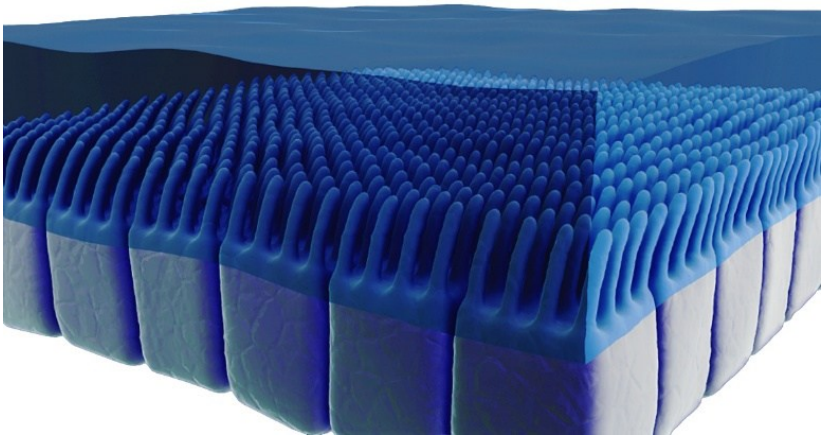
- توجيه هجرة الخلايا العصبية خلال التطور الجنيني [120]، وتؤدي العديد من الوظائف الأخرى...

2. خلايا الدبق قليلة التغصن:



صورة 52: خلية الدبق قليلة التغصن.

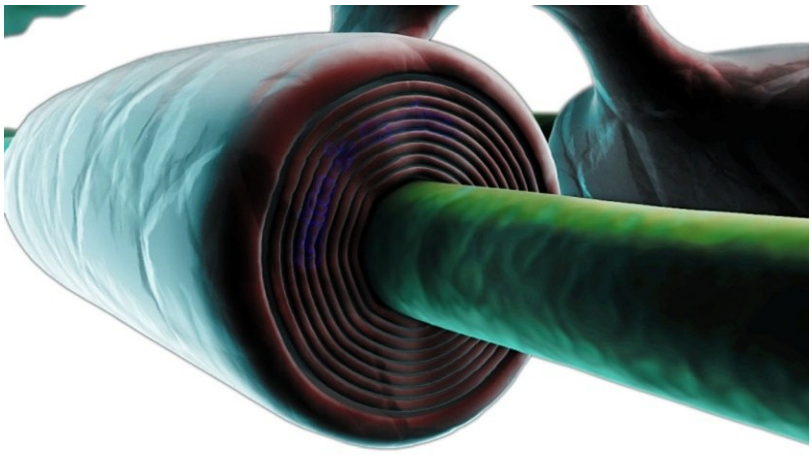
الخلايا قليلة التغصن Oligodendrocytes [1، 49، 81، 100، 104، 122] أصغر حجماً ولديها استطالات أقل من الخلايا النجمية. كما أنها تعمل كشبكة دعم لخلايا الجهاز العصبي المركزي لكنها توفر بشكل أساسي عملية الميالين (Myelination) الخاصة بها [100، 123].



صورة 53: البطانة العصبية.

كل خلية قليلة التغصن ترسل عدة استطالات تلتف حول المحاور العصبية، والتي تصبح محاطة بعدد كبير من الطبقات متحدة المركز (30 إلى 100) [40، 100]. تشكل هذه الطبقات **غمد الميالين** myelin sheath [104، 113، 124، 125]: وهي مادة تتكون أساساً من الدهون تعزل وتحمي المحاور العصبية، مشابهة للبلاستيك حول الأسلاك الكهربائية. والأهم من ذلك، أن غلاف الميالين هذا يعمل على تسريع سرعة نبضات الأعصاب [125]. يمكن لخلية قليلة التغصن أن تغلف حتى 30 أو 50 محوراً متجاوراً [4، 100].

3. خلايا البطانة العصبية:



صورة 54: غمد الميالين.

خلايا البطانة العصبية Ependymal cells [126] مكعبة أو عمودية؛ غالباً ما تكون مهدبة وتشكل ظهارة بسيطة تبطن التجاويف المركزية للجهاز العصبي المركزي. تضمن إفراز السائل الدماغي الشوكي وتسهيل دورانه.

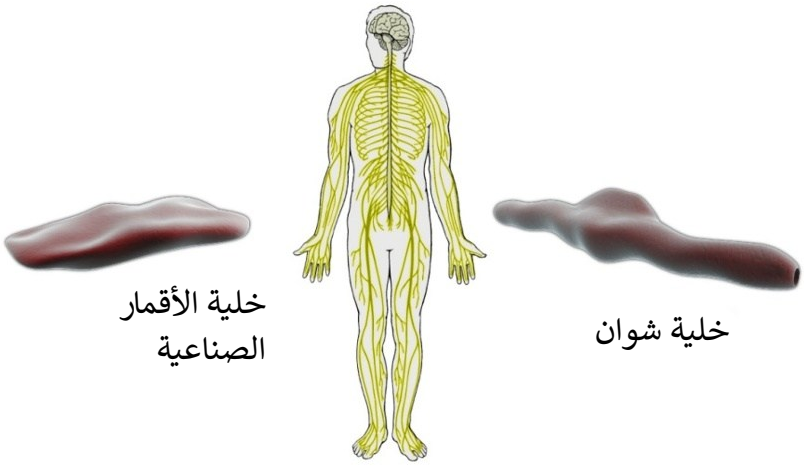
4. الدبقية الصغيرة:

الخلايا الدبقية الصغيرة Microglia [104] هي

خلايا صغيرة على شكل نجمة مع استطالات قليلة؛ تشترك في نفس الأصول الجنينية مع الخلايا الوحيدة (Monocytes) والبلعميات. تحمي الخلايا الدبقية الصغيرة خلايا الجهاز العصبي المركزي من الهجمات المعدية والسامة، ويمكنها الهجرة إلى المناطق المصابة والقضاء على حطام الخلايا الميتة. دورها الوقائي ذو أهمية كبيرة لأن خلايا الجهاز المناعي لا تستطيع الوصول إلى الجهاز العصبي المركزي.

5. الخلايا الساتلة:

الخلايا الساتلة Satellite Cells [40، 128، 129] هي خلايا مسطحة مرتبة حول أجسام الخلايا العصبية داخل العقدة، ولها وظائف مشابهة للخلايا النجمية.



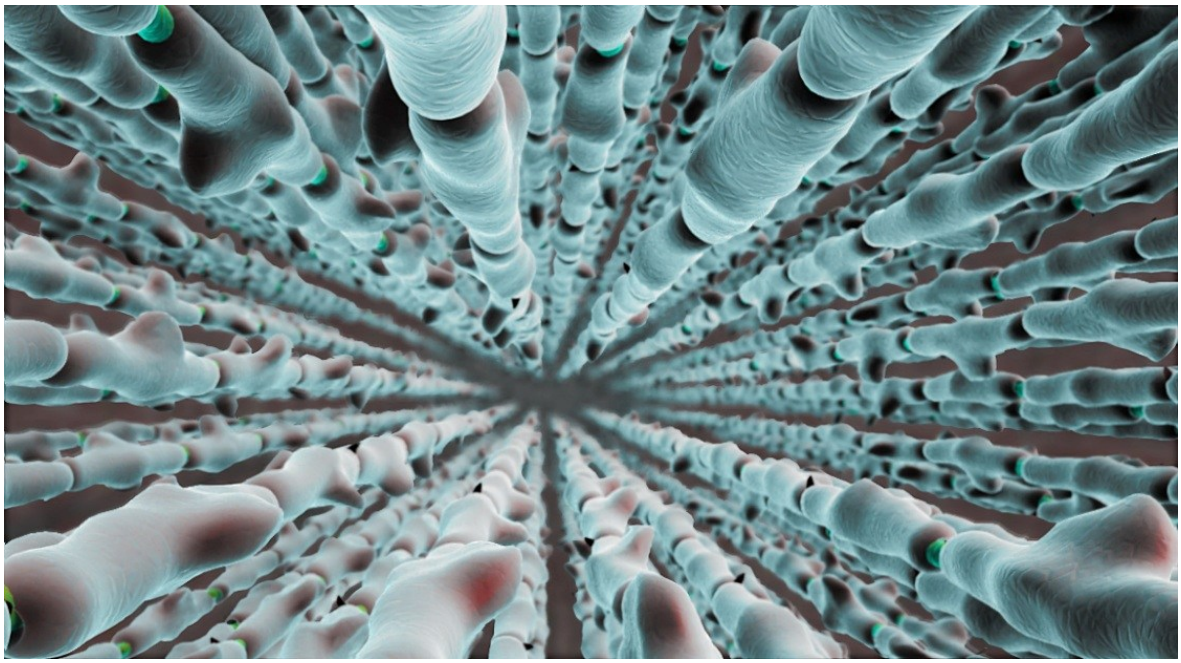
صورة 55: الخلايا الدبقية العصبية المحيطية

6. خلايا شوان:

خلايا شوان Schwann cell [39، 124، 127] Neurolemmocytes [128، 129]؛ هي خلايا مسطحة تشكل أغلفة الميالين التي تحيط بالمحاور العصبية في الجهاز العصبي المحيطي. تغلف كل خلية شوان جزءاً من محور عصبي واحد فقط [40، 124، 126، 130]. أحياناً، قد تحيط خلية شوان حول المحاور العصبية دون أن تشكل غمداً للميالين؛ ويقال إن هذه المحاور العصبية غير ميالينية [131].

تنتظم عدة خلايا شوان في سلسلة حول محور عصبي واحد؛ والتضيق الذي تحدده كل خلية شوان وجارتها يسمى **عقدة رانفييه** Node of Ranvier [81، 94]. في هذا المستوى يمكن أن تظهر فروع جانبية من المحور العصبي [99].

المنطقة بين عقدتين من رانفييه تسمى المقطع بين العقدي. تلعب خلايا شوان دوراً داعماً ومغذياً للمحاور المحيطية، ويمكنها تسريع سرعة النبضات العصبية حتى 100 مرة [132]، كما تلعب دوراً مهماً جداً في تجديد محاور الجهاز العصبي المحيطي في حال حدوث إصابة [100] ...



صورة 56: الألياف العصبية داخل الجهاز العصبي المحيطي.

دور العصبون الرئيسي هو استقبال، نشر ونقل **الإشارات العصبية**؛ حيث يمتلك غشاء البلازما الخاص به خصائص كهروكيميائية محددة تسمح له بالتفاعل مع المنبه ونقل تأثيره إلى نهاية العصب.

يحتوي غشاء البلازما في الخلايا العصبية على **قنوات** و**مضخات** قادرة على تنظيم توزيع الأيونات على جانبي الغشاء وفقاً لشحنتها الكهربائية وتركيزها. هذا التنظيم يلعب دوراً أساسياً في نقل النبضات العصبية.

على عكس السلك الكهربائي، لا يكون تدفق الإلكترونات هو ما يوصل الإشارة [96]، بل موجة من التبادلات الأيونية تحدث عبر الغشاء؛ لذلك فإن هذا الانتشار **كهركيميائي** بطبيعته.

1. مفاهيم أساسية:

مفهومان مهمان جداً للتذكر: **تدرج التركيز** [39] و**التدرج الكهربائي** [39].

في الأوساط البيولوجية، تميل الجزيئات إلى الانتشار من مناطق ذات تركيز عالٍ نحو مناطق منخفضة التركيز؛ ثم يقال إنها تتبع تدرج تركيزها Concentration gradient.

تتبع الجزيئات المشحونة أيضاً تدرجاً كهربائياً Electrical gradient (تدرج الجهد)؛ وبالتالي، تنتشر الجزيئات ذات الشحنة الموجبة نحو المناطق السالبة والعكس صحيح.

لكن غالباً ما تخضع هذه الجزيئات لتدرجات كهربائية وتركيزية مختلفة، بل أحياناً متضادة. تنتشر حينئذ بطريقة متوازنة وفقاً لهذين التدرجين، وفقاً لتدرج **كهروكيميائي** Electrochemical gradient [100].

2. جهد الراحة:

يحدث انتشار الأيونات عبر غشاء البلازما عبر قنوات محددة. قنوات البوتاسيوم شديدة النفاذية [113]، هذا ليس الحال مع قنوات الصوديوم. في الواقع، في حالة الراحة، يكون الغشاء ضعيف النفاذية للصوديوم؛ بل ويعتبر غير منفذ له [5، 75].

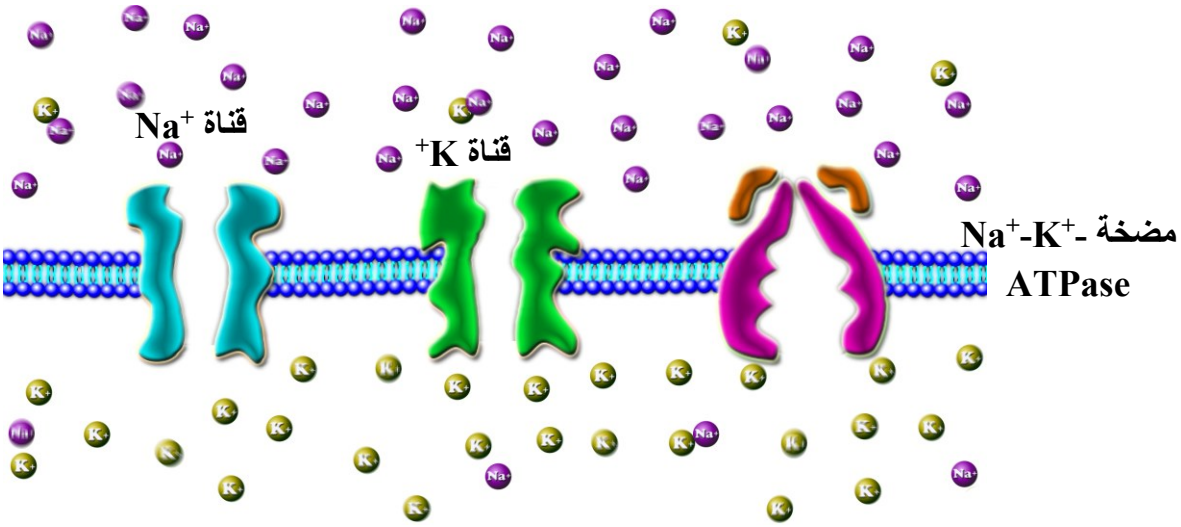
على غشاء البلازما، هناك **مضخة Na+-K+-ATPase** تحرك بجهد - مع كل استهلاك لجزيء ATP (العملة العالمية للطاقة الخلوية) - 3 أيونات صوديوم خارج الخلية مقابل كل أيونين K^+ تتحرك إلى الداخل. تستهلك هذه المضخة كمية هائلة من الطاقة لدرجة أن البعض نسب 30% أو حتى 50% من إجمالي الطاقة التي يستهلكها الدماغ إليها.

بشكل عام، تملأ مضخة Na^+-K^+-ATP_{ase} الخلية بالبوتاسيوم وتفرغها من الصوديوم؛ ومع كل دورة، تنقل شحنة صافية موجبة نحو خارج الخلية.

تتبع أيونات K^+ داخل الخلية تدرجها الكيميائي وتخرج نحو الوسط خارج الخلوي، حاملة معها المزيد والمزيد من الشحنات الموجبة. وبذلك يصبح الجانب داخل الخلوي من الغشاء سالباً الشحنة، مما يحد من انتشار أيونات البوتاسيوم بشكل إضافي.

لذلك، خارج أي نقل، فإن التوازن الذي تُنشِئه جميع هذه العناصر يخلق فرق جهد كهربائي بين الوسط خارج الخلوي المشحون إيجاباً والوسط داخل الخلوي **سالب الشحنة**. يسمى هذا الجهد عبر الغشاء **جهد الراحة** Resting potential، وغالباً ما يقع بين 50- و 75- ميلي فولت.

هناك جزيئات أخرى وعناصر متداخلة لم يتم تفصيلها هنا لتبسيط الظاهرة؛ فهي أكثر تعقيداً بكثير [39، 41، 100، 133].



صورة 57: قنوات ومضخات في غشاء البلازما للخلايا العصبية.

3. جهد الفعل:

هناك **قناة صوديوم مبوبة بالجهد** voltage-gated sodium channel على الغشاء تفتح فقط أثناء تغير الجهد الكهربائي بين جانبي الغشاء. عندما يتجاوز جهد الغشاء قيمة العتبة، تفتح قنوات الصوديوم المبوبة بالجهد وتسبب تدفقاً هائلاً لأيونات Na^+ إلى الخلية (حوالي 1 مليون/ثانية [96، 134]) حتى **تنعكس قطبية الغشاء** (مرحلة إزالة الاستقطاب Depolarization phase) [39، 41].

يمكن للبوتاسيوم بعد ذلك اتباع تدرج تركيزه والخروج من الخلية؛ وهذا يعيد تدريجياً جهد الغشاء إلى حالته الساكنة (**مرحلة إعادة الاستقطاب** Repolarization phase). خلال هذه المرحلة، يتم تعطيل قنوات الصوديوم ولا يمكن فتحها خلال فترة الجموح.

يستمر ضخ الصوديوم بنشاط خارج الخلية مع عودة أيونات البوتاسيوم إلى الداخل.

التأخير في عودة البوتاسيوم إلى الخلية مسؤول عن فرط الاستقطاب الذي يتراجع تدريجياً.

4. انتشار الإشارة:

عندما يحدث **إزالة استقطاب** الغشاء لسبب أو آخر - غالباً على مستوى ربوة المحوار [113]، حيث يكون تركيز قنوات الصوديوم المبوبة بالجهد أكبر - تتم إهاجة القنوات القريبة، وهكذا دواليك.

تستمر موجة إزالة الاستقطاب هذه حتى تعبر إشارة إزالة الاستقطاب الغشائي كل الطول المحوري وتنتهي عند الزر الانتهائي.

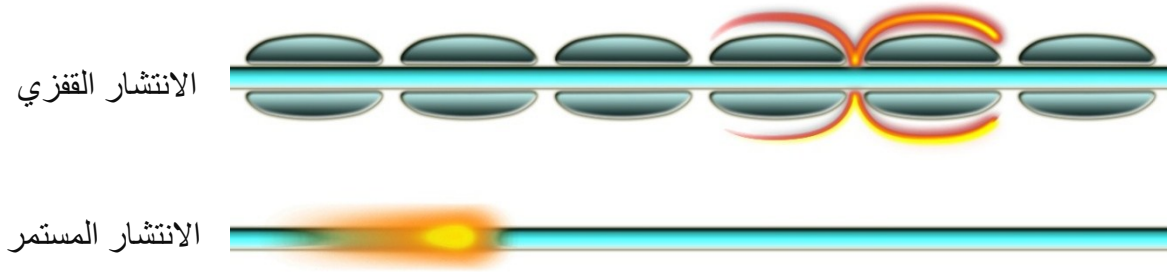
تمنع فترة الجموح لقنوات الصوديوم المبوبة بالجهد الإشارة من التحرك إلى الوراء [135]؛ وبالتالي، تنتشر الإشارة دائماً في **اتجاه واحد** فقط. تسمى هذه الموجة من جهود الفعل **السيالة العصبية**. الانتشار هذا يخضع لقانون الكل أو لا شيء: إما أن يتجاوز جهد الغشاء قيمة العتبة وينتج عنه جهد فعل Action Potential (AP)، أو يتم تجاهله ببساطة.

على ليف عصبي واحد، لا تتغير سعة جهد الفعل؛ يتم تحديد ترميز شدة الإشارة بتردد جهود الفعل - فكلما زادت جهود الفعل، زادت شدة الإشارة.

تختلف سرعة انتقال النبضات العصبية من خلية عصبية إلى أخرى. فعليا، كلما زاد قطر المحور، زادت سرعة انتشار الإشارة.

تعتمد سرعة السيالة العصبية أيضاً على تكوين الميالين في المحور [100]: في **الألياف الميالينية**، يقفز جهد الفعل من عقدة إلى أخرى؛ ويشار إلى ذلك بـ النقل القفزي، وهو سريع جداً (حتى 120 م/ث [75، 119])، على عكس الانتشار المستمر الأبطأ في الألياف غير الميالينية.

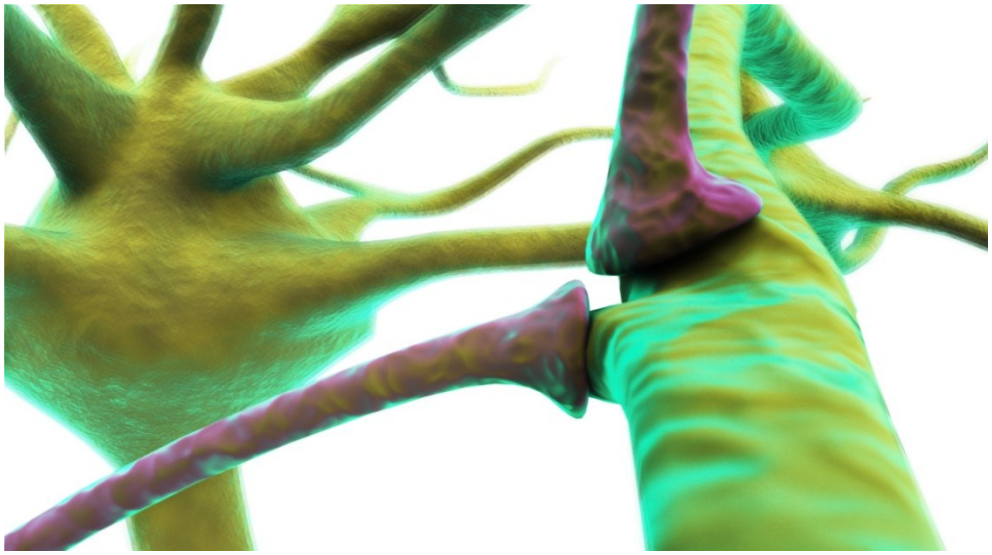
في الألياف الميالينية، تتركز قنوات Na^+ عند العقد؛ وجهد الفعل المسجل عند هذا المستوى كبير جداً لدرجة أنه يمكن أن يؤثر بسرعة على قنوات الصوديوم في العقدة التالية، وهكذا.



صورة 58: الانتشار القفزي والمستمر للسيالات العصبية.

في عام 1897، لاحظ عالم الفيزيولوجيا العصبية الإنجليزي تشارلز شيرينغتون **Charles Sherrington** [74] أن سرعة السيالة العصبية من القشرة الدماغية إلى الأطراف كانت أقل من سرعة انتشارها داخل ليف عصبي واحد. استنتج أنه لابد أن هناك نوعاً من الانقطاع يبطئ نقل النبضة. وهكذا، قدم مفهوم **المشبك** Synapse (من اليونانية Syn التي تعني "معاً"، وHaptein التي تعني "لمس" أو "الإمساك"؛ أي "الاتصال") [52].

تتواصل الخلايا العصبية مع بعضها البعض عبر المشابك العصبية. يمكن أن يحتوي عصبون واحد على ما بين 1,000 و10,000 تشابك عصبي [109] (وحوالي 300,000 على خلايا بوركينجي Purkinje cells في المخيخ [57]). اضرب هذا العدد في 100 مليار خلية عصبية للحصول على فكرة عن عدد الاتصالات داخل الجهاز العصبي!



صورة 59: مشبك كيميائي.

1. تصنيف:

يمكن تصنيف المشابك العصبية حسب موقعها، تركيبها أو وظيفتها أو طبيعة الناقل العصبي المنبعث[39، 71].

1 .1. وفقاً للموقع:

يمكن أن تكون الأطراف المحورية على اتصال مع التغصنات (**مشبك محوري-تغصني** axodendritic synapse)، أو جسم الخلية (**مشبك محوري-جسدي** axosomatic synapse)، أو حتى تنتهي عند محور عصبي آخر (**مشبك محوري-محوري** axo-axonic synapse) [4].

1 .2. وفقاً لطبيعتها:

هناك فئتان رئيسيتان من المشابك العصبية [41]:

- **المشابك الكهربائية** [42]، التي تشكل وصلات فجوية بين بعض الخلايا العصبية؛ تلعب دوراً مهماً أثناء التطور وغالباً ما تتحول لاحقاً إلى مشابك كيميائية. في البالغين، تقتصر على عدة مناطق من الدماغ.

- **المشابك العصبية الكيميائية** [52] وهي الأكثر انتشاراً بفارق كبير؛ حيث تنتقل الإشارة عبر إفراز جزيئات كيميائية تسمى الناقلات العصبية. يمكن أن يكون لهذه الناقلات العصبية تأثير تحفيزي (مثل الأستيل كولين، والجلوتامات) أو تأثير مثبط (مثل GABA). قد يفرز العصبون أكثر من نوع واحد من الناقلات العصبية [38، 39، 41].

صورة 60: مشبك كيميائي.

1 .3. وفقاً للخلية ما بعد المشبك:

يمكن للمشابك أن تربط الخلايا العصبية بخلايا عصبية أخرى أو بخلايا مستجيبة [2]: غدية (**وصلة عصبية غدية** neuroglandular junction) أو عضلية (**وصلة عصبية عضلية** neuromuscular junction).

2. أجزاء المشبك العصبي:

صورة 61: أجزاء المشبك الكيميائي.

يتكون المشبك من ثلاثة أجزاء [5]: **منطقة ما قبل المشبك**، التي تتوافق مع الزر الانتهائي لمحور ما قبل المشبك؛ **ومنطقة ما بعد المشبك** (المنطقة المقابلة للزر الانتهائي)؛ ومساحة وسيطة تسمى **الشق المشبكي**.

يحتوي الزر الانتهائي على **الحويصلات المشبكية** المملوءة بالناقلات العصبية وعدة ميتوكوندريا (مصدر للطاقة). والجزء بعد المشبك لا يحتوي على الحويصلات المشبكية، مما يجعل انتشار الإشارة أحادي الاتجاه عند هذا المستوى.

يحتوي الجزء بعد المشبكي على مستقبلات، غالباً من النوع المرتبط بالقنوات، والتي تفتح استجابة لعمل الناقلات العصبية المنبعثة.

3. المراحل:

عندما يصل قطار من جهود الفعل (سلسلة من جهود الفعل) إلى الزر الانتهائي، يؤدي ذلك إلى فتح **قنوات الكالسيوم المبوبة بالجهد**. فيدخل الكالسيوم الخلية بشكل هائل، ومن خلال سلسلة من التفاعلات الكيميائية [39،

[57]، يحفز اندماج الحويصلات المشبكية مع غشاء البلازما. في المتوسط، يتم إطلاق 300 حويصلة مشبكية مع كل جهد فعل [57]. وكلما زاد عدد جهود الفعل، زادت الحويصلات التي تنطلق.

تنتشر الناقلات العصبية نحو منطقة ما بعد المشبك لتنشيط مستقبلاتها ثم يتم التخلص منها بسرعة [57] - إما عن طريق الانتشار خارج الشق المشبكي (حيث تلتقطها الخلايا الدبقية) أو عن طريق التحلل بواسطة إنزيم معين وإعادة امتصاصها بواسطة الزر الانتهائي لإنتاج المزيد من الناقلات العصبية (إعادة القبط Reuptake [100]).

4. الجهود ما بعد التشابكية:

4 .1. الجهد الاستثاري بعد المشبكي:

في المشبك العصبي **الاستثاري** Excitatory synapse، يتسبب الناقل العصبي في فتح قنوات الصوديوم، مما يسمح بدخول الصوديوم إلى الخلية ويخلق إزالة استقطاب محلية تسمى الجهد الاستثاري بعد المشبكي Excitatory Postsynaptic Potential (EPSP) [4، 39، 41].

نادراً ما يؤدي ذلك إلى تحفيز جهد فعل في التغصنات أو جسم الخلية، لأن هاتين المنطقتين فقيرتان جداً في قنوات الصوديوم المبوبة بالجهد. لذا فهو جهد متدرج graded potential تنخفض سعته مع مرور الوقت والمسافة من المشبك العصبي المثير إلى ربوة المحوار (وهي منطقة غنية جداً بقنوات الصوديوم المبوبة بالجهد والموقع المعتاد لبدء جهد الفعل).

4 .2. الجهد التثبيطي بعد المشبكي:

في المشبك **المثبط** Inhibitory synapse، يتسبب الناقل العصبي (مثل GABA) في فتح قنوات **الكلوريد** (مما يسمح للكلوريد بالدخول إلى الخلية) أو قنوات **البوتاسيوم** (التي تسمح للبوتاسيوم بالخروج من الخلية) في المنطقة بعد المشبكية.

في كلتا الحالتين، هناك فرط استقطاب محلي في غشاء البلازما يسمى الجهد التثبيطي بعد المشبكي Inhibitory Postsynaptic Potential (IPSP) [4]. ينتشر هذا الاستقطاب الفائق بنفس طريقة EPSP إلى ربوة المحوار، حيث يجعل من الصعب توليد جهد فعل. غالباً ما تقع المشابك المثبطة بالقرب من ربوة المحوار، حيث يمكن أن يكون تأثيرها المثبط أكثر فعالية.

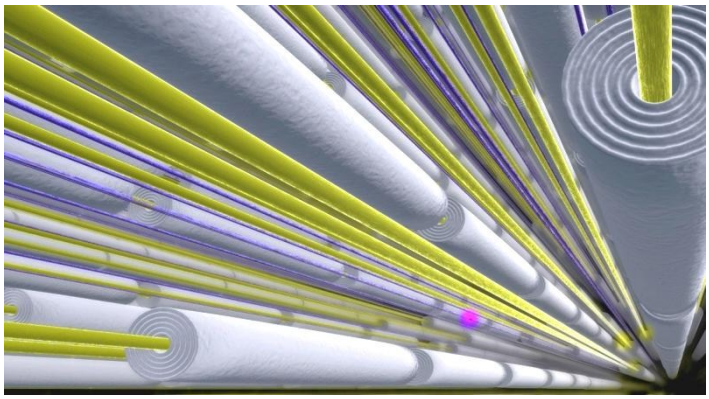
5. الدمج العصبي :

فعليا، من النادر أن يولد تحفيز واحد جهد فعل Action Potential (AP). يتلقى العصبون عدة محفزات في نفس الوقت. تحدث معالجة هذه المحفزات عند ربوة المحوار من خلال جمع مكاني وزمني Integration للجهود المختلفة المستلمة [38، 39، 54].

في الجمع المكاني Spatial summation [1]: إذا تجاوز مجموع الجهود الاستثارية والتثبيطية من المشابك العصبية المختلفة التي تصل إلى ربوة المحوار في نفس الوقت قيمة العتبة، فسوف يؤدي ذلك إلى تحفيز جهد فعل؛ وإلا، سيتم تجاهله.

في الجمع الزمني Temporal summation [52]: إذا حدثت العديد من الجهود الاستثارية متقاربة في الزمن، فإنها تتراكم ويمكن أن تصل أيضاً إلى عتبة إزالة الاستقطاب لتحفيز جهد الفعل.

تعمل ربوة المحوار بعد ذلك ك**مدمج عصبي** [96]، يقرر - بناء على الجهود المختلفة المجمعة - ما إذا كان سيتم تحفيز جهد فعل أم لا.



صورة 62: ألياف عصبية في الجهاز العصبي المحيطي.

تتم حركات الجسم بفضل العضلات؛ فعن طريق الانقباض، يصغر طول العضلة، وبذلك تتمكن من تقريب العظمين اللذين ترتبط بهما من بعضهما البعض. الجهاز العصبي هو الذي يتحكم في هذا الانقباض العضلي عبر الأعصاب.

يحتوي كل عصب على آلاف الألياف العصبية [51، 75] المنتظمة في محاور حسية (استطالات محيطية) تنقل المعلومات الحسية، ومحاور حركية تنقل النبضات الحركية

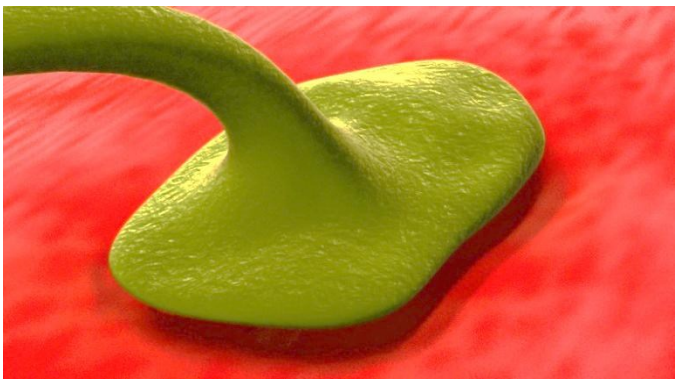
1. الوحدة الحركية:

كل عصبون حركي يغذي عدة ألياف عضلية؛ وهذا الارتباط يحدد ما يسمى **بالوحدة الحركية** Motor unit[41، 54، 107، 109].

بشكل عام، كلما قل عدد ألياف العضلات في وحدة الحركة، زادت دقة الحركة. فعلى سبيل المثال، في العضلة الصدغية، هناك حوالي 1,000 ليف عضلي لكل وحدة حركية [1، 3]، بينما في العضلات المحركة للعين لا يوجد سوى **خمسة ألياف فقط**، مما يعكس درجة الدقة العالية في حركات العين [4، 41].

أما شدة انقباض العضلات، فهي تتناسب طردياً مع عدد الوحدات الحركية التي يتم تجنيدها.

2. الوصلة العصبية العضلية:



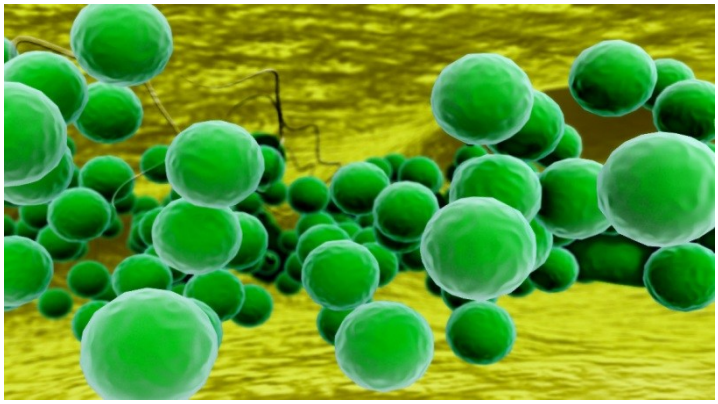
صورة 63: وصلة عصبية عضلية.

يصدر العصبون الحركي عدة فروع تنتشر أحياناً عبر كامل سمك العضلة. تهدف كل نهاية إلى تحفيز ليف عضلي واحد في موقع محدد جداً هو: **الوصلة العصبية العضلية** Neuromuscular junction [2، 4، 54].

2 .1. الزر الانتهائي:

قبل نهاية المحور العصبي مباشرة، يفقد العصبون الحركي غمده الميالييني ويشكل زراً **انتهائياً**. يحتوي الأخير على العديد من الميتوكوندريا لضمان توفير الطاقة وعدة حويصلات مشبكية؛ حيث تحتوي كل حويصلة على حوالي 10,000 جزيء من **الأستيل كولين** Acetylcholine (ACh) [4، 100، 136] (الناقل العصبي الحصري للوصلة

العصبية العضلية).



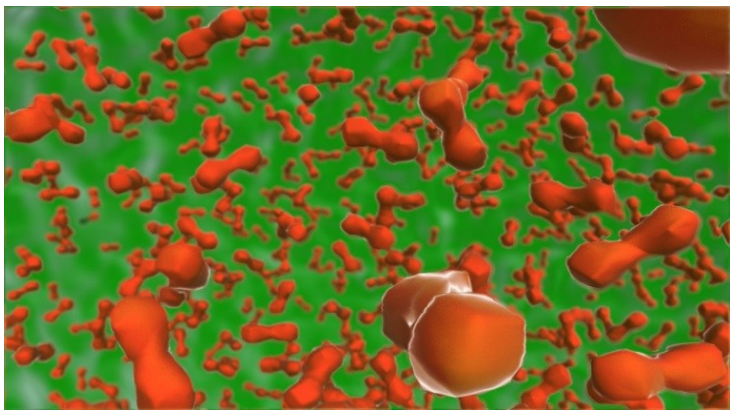
صورة 64: **الحويصلات المشبكية.**

2. 2. الصفيحة الانتهائية الحركية:

على ألياف العضلات، توجد **الصفيحة الانتهائية الحركية** Motor end plate، وهي المنطقة المقابلة مباشرة للزر الانتهائي. على الرغم من أن هاتين المنطقتين (الزر المشبكي والصفيحة الانتهائية) قريبتان جداً من بعضهما، إلا أنه لا يوجد اتصال مادي فعلي بينهما.

الصفيحة الانتهائية الحركية [39، 109، 135]، سميكة وغير قابلة للإثارة كهربائياً، تشكل طيات وصلية تزيد من مساحة سطح التلامس المشبكي.

3. مراحل الإشتغال:



صورة 65: **جزيئات الأستيل كولين.**

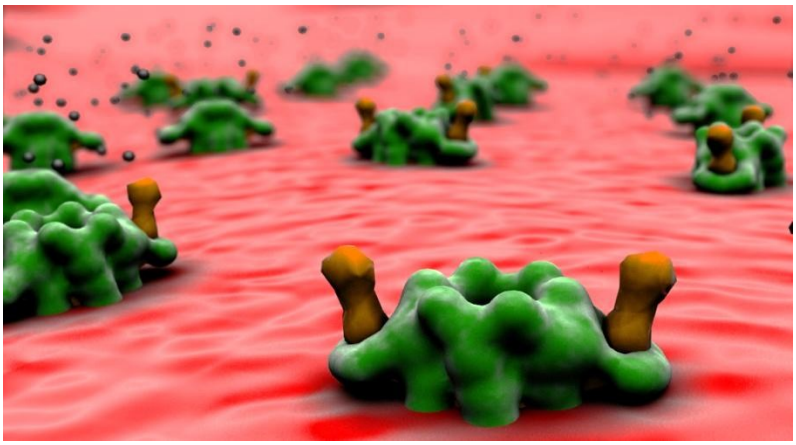
عند الوصول إلى نهاية العصب، يؤدي النبض الحركي إلى فتح قنوات الكالسيوم، مما يؤدي إلى تدفق هائل لأيونات الكالسيوم إلى داخل الخلية. يعزز الكالسيوم اندماج حويصلات الأستيل كولين مع غشاء الخلية [39، 57]، مما يطلق محتوى الناقل العصبي بالكامل في الشق المشبكي.

تنتشر جزيئات الأستيل كولين بعد ذلك نحو **المستقبلات الكولينية** Cholinergic receptors، التي تتركز بشكل رئيسي داخل الطيات.

ارتباط جزيئتين من ACh بمستقبل واحد [5، 100، 113، 136] يحفز فتح قناة الصوديوم، مما يسهل دخول أيونات الصوديوم إلى الليف العضلي، ويؤدي بالتالي إلى إزالة استقطاب الغشاء بعد المشبكي وخلق **جهد الصفيحة الانتهائية** [4].

بناء على عدد المستقبلات المنشطة، يمكن أن يتجاوز هذا الجهد قيمة العتبة، وبالتالي يحفز جهد فعل عضلي ينتشر عبر غشاء العضلة بأكمله ويتسبب في انقباض الليف العضلي.

قد يحدث إطلاق بسيط لـ ACh عن طريق خروج تلقائي إلى الحيز المشبكي حتى في غياب أي تحفيز عصبي؛ مع ذلك، فإن عدد المستقبلات المنشطة بهذه الطريقة ليس كافياً لتحفيز جهد فعل عضلي [136].

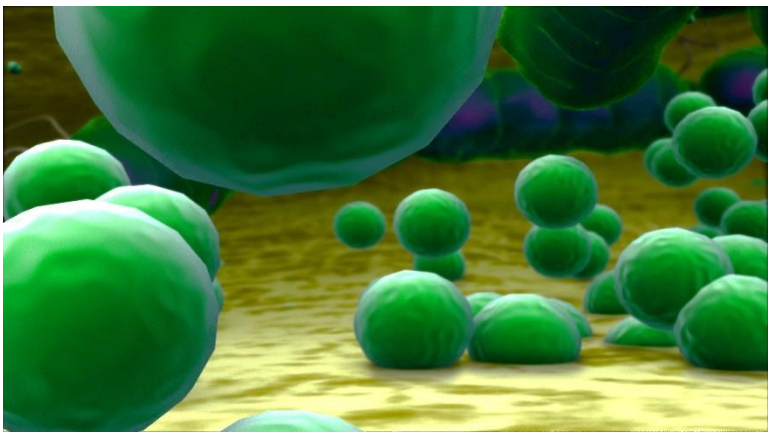


صورة 66: مستقبلات ACh عند لوحة نهاية المحرك.

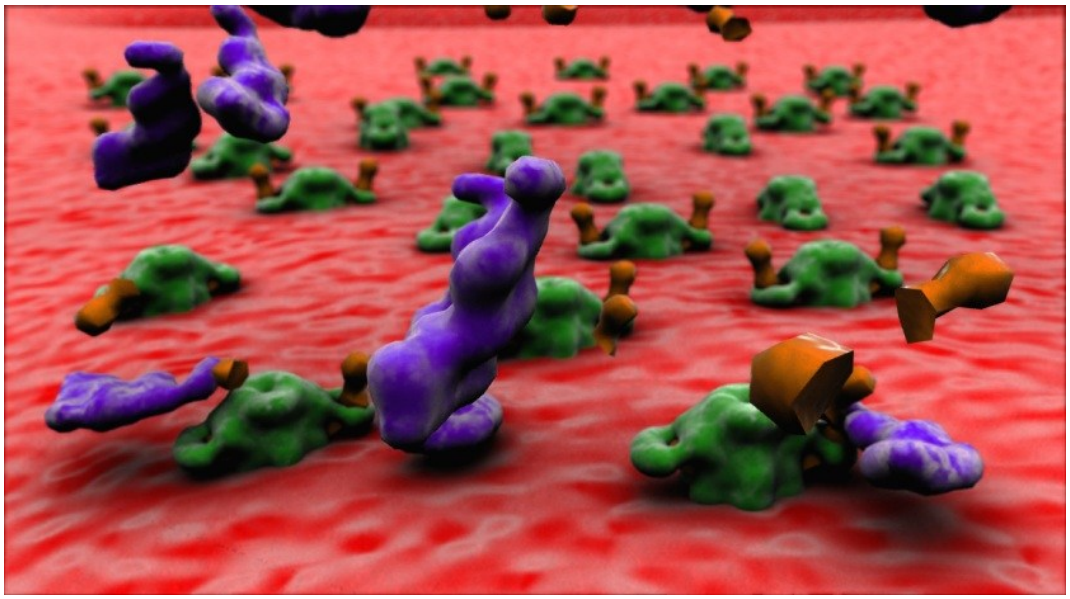
4. التخلص من الأسيتيل كولين:

يتم تحطيم جزيئات الأستيل كولين بسرعة بواسطة إنزيم (أستيل كولينستيراز [1، 12]) الموجود في الحيز المشبكي. ينتج هذا التحلل جزيئتين: الأسيتات والكولين، حيث يعود الأخير إلى نهاية العصب لتكوين جزيئات أستيل كولين جديدة.

وبالتالي، يمنع التدمير السريع للأستيل كولين حدوث انقباض عضلي لفترة طويلة غير مرغوب فيها.



صورة 67: اندماج الحويصلات مع الغشاء.



صورة 68: تحليل جزيئات ACh بواسطة أستيل كولينستيراز.

تتواصل الخلايا العصبية مع بعضها البعض ومع الخلايا الأخرى من خلال إفراز مواد كيميائية حيوية تسمى الناقلات العصبية Neurotransmitters [5، 38، 41، 54].

تفرز العديد من الخلايا العصبية أكثر من نوع واحد من الناقلات العصبية [38، 39، 41]، ويمكن أن يكون لبعضها تأثيرات مختلفة على نفس الخلية المستهدفة، كما أن زمن الاستجابة متغير أيضاً.

يحتوي كل زر انتهائي على عدة آلاف من الحويصلات [1]، كل واحدة منها مملوءة بحوالي 10,000 جزيء ناقل عصبي [4، 100، 136].

1. الناقلات العصبية:

1 .1. معايير الناقلات العصبية:

حتى الآن، تم تحديد أكثر من 50 مادة [52، 82] تستوفي معايير الناقلات العصبية. هذه المعايير الرئيسية هي كما يلي [38، 39، 41]:

- يجب أن يكون الناقل العصبي موجوداً في الخلية العصبية قبل المشبكية.
- يجب أن يحدث إطلاقه استجابة لإزالة الاستقطاب قبل المشبكي.
- يجب أن تكون هناك مستقبلات محددة لهذا الناقل العصبي في العصبون بعد المشبكي.

تم اعتبار جزيئات أخرى منتشرة في الجسم، مثل ATP وأكسيد النيتريك، ناقلات عصبية [57، 110]، رغم أنها تمتلك خصائص محددة أخرى.

1 .2. تصنيف الناقلات العصبية:

هناك عدة تصنيفات للناقلات العصبية بناءً على تركيبها الكيميائي الحيوي وآلية عملها [10].

أ. وفقا لبنيتها:

نميز بين **فئتين رئيسيتين** بشكل عام بناءً على تركيبهما [38، 41، 52]: **الببتيدات العصبية** و**الجزيئات الصغيرة**.

- تتكون الببتيدات العصبية [2، 57] أساساً من سلاسل الأحماض الأمينية؛ وتشمل مجموعة واسعة من الجزيئات ذات التأثيرات المتنوعة، مثل الإندورفينات [76] والسوماتوستاتين [5]، ويتم تصنيعها في السوما.
- تجمع الجزيئات الصغيرة [38] معظم الناقلات العصبية الكلاسيكية، مثل **الأستيل كولين** [41]، و**الجلوتامات** [38]، و**GABA** [48]، و**الكاتيكولامينات** [52]. يتم تصنيعها بشكل أساسي في النهايات العصبية ولها تأثير أسرع بكثير

من البتيدات العصبية.

بغض النظر عن موقع تصنيع الناقلات العصبية، يتم دائماً تصنيع الإنزيمات المطلوبة في جسم الخلية [80].

ب. وفقا لتأثيرها:

يمكن أن تكون الناقلات العصبية **محفزة** أو **مثبطة**؛ كما يمكن أن يكون لها تأثير مباشر أو غير مباشر على مستقبلاتها.

2. المعدِّلات العصبية:

بينما يكمن الدور الأساسي للناقلات العصبية في نقل النبضات من خلية عصبية إلى أخرى، تعمل المعدلات العصبية [1] (التي تفرزها الخلايا العصبية أيضاً) على تعديل عمل الخلية المستهدفة وتمثيلها الغذائي على مدى فترة زمنية أطول. تؤثر هذه المعدلات عادة على مجموعة من الخلايا العصبية وتناغم وظائفها.

3. الهرمونات العصبية:

الهرمونات العصبية [1]، مثل بعض **الكاتيكولامينات** (الإبينفرين والنورإبينفرين)، هي مواد تفرزها خلايا الأعصاب في مجرى الدم؛ وبالتالي تعمل عن بُعد على الخلايا المستهدفة المنتشرة في جميع أنحاء الجسم.

يمكن للناقل العصبي أيضاً أن يعمل كمنظم عصبي أو هرمون عصبي حسب موقع إنتاجه وآلية انتشاره.

4. مستقبلات الناقلات العصبية:

جميع المواد الكيميائية الحيوية المذكورة أعلاه لا يمكن أن تؤثر إلا في المواقع القادرة على التعرف عليها واستقبالها وهي: **المستقبلات** [41].

المستقبلات هي هياكل جزيئية كبيرة محددة توجد في مناطق معينة من غشاء البلازما في الخلايا المستهدفة.

الجزيئات التي ترتبط بالمستقبل وتنشطه تسمى **الروابط** (Ligands) أو **المنشطات** (Agonists)، أما المواد القادرة على الارتباط بالمستقبل وحجبه فتسمى **المضادات** (Antagonists).

هناك نوعان من المستقبلات [41]:

- **المستقبلات المرتبطة بالقنوات** (تسمى أيضاً **الأيونوتروبيك**) [4، 39]، والتي تسمح بالعمل المباشر والسريع للناقلات العصبية؛ حيث تفتح قناة تسبب انتشاراً أيونياً وتغييراً مباشراً في جهد الغشاء.
- **المستقبلات الأيضية** (مرتبطة ببروتين G) [4، 39]، والتي تحدد الاستجابات المشبكية البطيئة التي ينتجها بروتين G والمرسلات الثانوية داخل الخلية.

يشكل مزيج المستقبلات والمواد الكيميائية التي تنشطها أو تعطلها هدفاً رئيسياً للأدوية العلاجية [38، 41] ومعظم المخدرات.

صورة 69: الناقلات العصبية الرئيسية.

الدماغ البشري، الذي يزن حوالي 2% فقط [137] من كتلة الجسم، يحتاج إلى أكثر من 20% [138] من إجمالي إمدادات الطاقة للجسم؛ وبالتالي، يتلقى هو وحده 16% [5] من التروية الشريانية.

الجهاز العصبي المركزي لا يمتلك احتياطيات حقيقية من الطاقة أو الأكسجين [109]، والخلايا العصبية غير قادرة على العمل بشكل لاهوائي [52]. لذلك فهو عضو يعتمد كلياً على التروية الشريانية الجيدة وإمداد كاف من الأكسجين والمغذيات. وبالتالي، بعد 10 ثوان فقط بدون أكسجين، يُفقد الوعي، وبعد بضع دقائق تبدأ الخلايا العصبية بالضمور [105].

بجانب ذلك، يحتاج الجهاز العصبي إلى بيئة مستقرة ليعمل بشكل مثالي، فهو لا يتحمل التقلبات المفاجئة في التركيب الجزيئي والأيوني داخل **الفضاءات الخلالية** Interstitial spaces. لهذا السبب، يتم عزل الجهاز العصبي بالكامل تقريباً عن الدم بواسطة حاجز يعمل كمرشح إلزامي وانتقائي للغاية يسمى **الحاجز الدموي الدماغي** Blood Brain Barrier (BBB) [41، 70].

قبل اكتشاف الخلايا الدبقية الصغيرة ودورها المناعي داخل الجهاز العصبي المركزي، كان يعتقد أن الأخير يعتمد على الحاجز الدموي الدماغي كوسيلة وحيدة للدفاع السلبي ضد الهجمات السامة والمعدية.

1. مكونات الحاجز الدموي الدماغي:

يتكون الحاجز الدموي الدماغي من ثلاثة عناصر أساسية [70]:

الوصلات المحكمة لخلايا البطانة التي تبطن داخل الشعيرات الدموية. في الدماغ، تحتوي هذه الوصلات على بنية أكثر إحكاماً بكثير من بقية الجسم، وعدد الميتوكوندريا في هذه الخلايا البطانية أعلى بـ 5 إلى 10 مرات من غيرها [91]؛ وهذا استجابة للطلب العالي جداً للطاقة لعمليات النقل النشطة على هذا المستوى.

الغشاء القاعدي للشعيرات الدموية الشريانية.

الأقدام الانتهائية للخلايا النجمية من النوع الأول [41، 70]، والتي (بالاندماج) تشكل درعاً حقيقياً ضد مرور العناصر غير المرغوب فيها إلى الأنسجة العصبية.

2. فسيولوجيا الحاجز الدموي الدماغي:

بالإضافة إلى مشاركتها السلبية نسبياً في تكوين الحاجز الدموي الدماغي، تستطيع الخلايا النجمية أيضاً التحكم في انقباض وتمدد الأوعية الدموية [96]، مما ينظم تدفق الدم لإدارة امتصاص المواد حسب الاحتياجات.

يلعب الحاجز الدموي الدماغي دوراً فسيولوجياً وتشريحياً في آن واحد؛ يمكن للغازات (الأكسجين وثاني أكسيد

الكربون)، بالإضافة إلى المواد الذائبة في الدهون والكحول [91]، أن تعبره بحرية حسب تدرج تركيزها (من تركيز أعلى إلى أقل). على النقيض من ذلك، لا يمكن للجزيئات القطبية (المؤينة أو المحبة للماء) أن تنتشر إلا من خلال آليات نقل نشطة تتضمن قنوات ومضخات محددة، والتي تعمل فقط وفقاً للمتطلبات.

3. الحاجز الدموي الدماغي والعلاجات:

يشكل الحاجز الدموي الدماغي عقبة حقيقية أمام مرور الأدوية [41] التي تستهدف الحالات العصبية مثل أورام الدماغ. تجرى حالياً عدة مشاريع بحثية لمعالجة هذه المشكلة.

يمكن تجاوز هذا القيد إما بحقن جرعات عالية من الأدوية، أو إعطاء منبه أو مادة أولية تعبر الحاجز (كما في حالة L-dopa مقابل الدوبامين [1، 41])، أو عن طريق **الحقن داخل القراب** Intrathecal Injection [42] (مباشرة في السائل الدماغي الشوكي).

4. الحاجز الدموي الدماغي والأمراض:

عند حديثي الولادة والرضع، الحاجز الدموي الدماغي ليس فعالاً بنفس القدر كما عند البالغين؛ فهو يسمح بمرور بعض الجزيئات العصبية السامة، مثل أصباغ الصفراء bile pigments، التي يمكن أن تضر الدماغ (**اليرقان النووي** kernicterus) [42].

في بعض الحالات المرضية، مثل **التهاب السحايا**، يحدث انهيار في الحاجز الدموي الدماغي، مما يسهل لحسن الحظ مرور المضادات الحيوية مثل البنسلين إلى الجهاز العصبي المركزي [42].

"البشر مبرمجون وراثياً، مبرمجون للتعلم" (فرانسوا جاكوب François Jacob ، 1981).

1. الدماغ مقابل الكمبيوتر:

يُظهِر عمل الجهاز العصبي ونظام الحاسوب عدة أوجه تشابه [118، 228، 229]:

- كلاهما يستخدم **إشارة ثنائية** أساسية (0-1). في الحواسيب، إما أن يتدفق التيار أو لا يتدفق. في الجهاز العصبي، يتوافق هذا مع قانون الكل أو لا شيء لجهود الفعل.

- كلاهما يتكون من **مكون مادي** (معدات مادية للكمبيوتر وأعضاء للجهاز العصبي) و**مكون برمجي** [229] (برامج لأنظمة الحاسوب والوظائف العليا للجهاز العصبي) [228].

ومع ذلك، فإن الجهاز العصبي أقوى بلا حدود على عدة مستويات:

- إذا قارنا **الترانزستور** (العنصر الأساسي في المعالج الدقيق، وهو مركز الحساب ومعالجة البيانات في الحاسوب) **بالمشبك العصبي**، حيث يؤدي كلاهما وظائف متشابهة، نجد أن أعلى المعالجات الدقيقة أداءً المصممة اليوم تحتوي فقط على حوالي 3 مليارات ترانزستور [ويكيبيديا، عدد الترانزستورات]. على الرغم من أن هذا العدد يبدو هائلا جدا، إلا أن الجهاز العصبي يمتلك حوالي **100 تريليون تشابك عصبي** (100,000,000,000,000) [4، 57] - هذا العدد من الاتصالات العصبية داخل جسم الإنسان أمر مثير للدهشة والإعجاب.

- دماغنا حاسوب خارق لا يدير فقط هذا العدد الهائل من الخلايا العصبية والمشابك العصبية، بل يفعل ذلك **بتكلفة طاقة ضئيلة**: تقريباً ما يلزم لتشغيل مصباح كهربائي عادي. إذا بنينا حاسوباً فائقاً بنفس عدد الترانزستورات، فسيحتاج إلى ما لا يقل عن 100 ميغاواط من الطاقة للعمل - وهو ما يكفي لتشغيل مدينة كاملة [139]!

- الدماغ لا يتفوق في عدد الاتصالات واستهلاكه المنخفض للطاقة فحسب، بل هو أيضاً أكثر كفاءة في إدارة تلك الروابط. في الدماغ، تعمل هذه القطع بشكل **متواز**: مليارات الأوامر المعلوماتية تدور في نفس الوقت في كل لحظة. على النقيض من ذلك، تعمل المعالجات الدقيقة عادة في الوضع التسلسلي، حيث تعالج قطعة تلو الأخرى من المعلومات.

- ومع ذلك، فإن أعظم قدرة للجهاز العصبي ليست قوته الخام. القوة الحقيقية والغير قابلة للإنكار للجهاز العصبي هي، وستظل دائماً، **مرونته ولدونته**. كل يوم، نفقد حوالي 100,000 خلية عصبية [111]، ومع ذلك نستمر في العيش وكأن شيئاً لم يتغير. يرجع ذلك إلى تكوين وصلات جديدة تعوض العجز. على العكس، من الممكن أن يتعطل المعالج الدقيق بعد فقدان ترانزستور واحد.

2. الاكتشاف:

في عام 1890، لاحظ عالم الفسيولوجيا الروسي الشهير **إيفان بافلوف** Ivan Pavlov [76] أن الكلاب تميل إلى إفراز اللعاب قبل أن تلامس فعلياً الطعام. قرر أن يحقق في هذا **"الإفراز النفسي"** بمزيد من التفصيل. أجرى تجربة كان يشير فيها إلى كل وجبة لكلب بصوت جرس. بعد بضعة أيام، بدأ الكلب يفرز لعابه كلما سمع الإشارة. استنتج بافلوف أن ردود الفعل الفسيولوجية يمكن أن تتحفز بواسطة تكييف معين للدماغ، وقدم مفهوم **المنعكس الشرطي** Conditioned reflex [54].

كان لهذه التجربة تأثير كبير على علم الأعصاب وعلم النفس الحديث. لاحقاً، صاغ تلميذه **جيرزي كونورسكي** Jerzy Konorski، الذي طور أبحاث بافلوف بشكل أكبر، مصطلح اللدونة العصبية.

نعلم اليوم أن ردود الفعل الشرطية ليست سوى امتدادات لخاصية أساسية وجوهرية في الجهاز العصبي: اللدونة العصبية Neuroplasticity [97].

اللدونة العصبية هي أكثر القدرات الدماغية إثارة للإعجاب؛ فهي القدرة على التغيير والتكيف مع الظروف البيئية والتجربة. بفضل اللدونة العصبية يمكننا الحفظ والنسيان والتعلم والتطور والتعافي من إصابات الدماغ التي قد تكون أحياناً مدمرة.

اكتشاف بافلوف ما هو إلا مجرد مثال واحد على ما يمكن أن يفعله الجهاز العصبي. في الواقع، الجهاز العصبي في حالة من التغير والتطور المستمر، ولا تزال الأبحاث في هذا المجال تثير إنبهارنا كل يوم بالإمكانات المذهلة للدونة العصبية.

بفضل التقنيات الحديثة مثل PET Positron Emission Tomography **(تصوير الانبعاث البوزيتروني** [67]**)** **والتصوير بالرنين المغناطيسي الوظيفي** Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) [76]، التي تسمح بتحديد مواقع المناطق الدماغية المسؤولة عن وظائف محددة، ثبت أن كل شخص **يمتلك توزيعاً فريداً** للمناطق الوظيفية داخل دماغه. ورغم وجود تشابهات واسعة، إلا أن هناك اختلافات قائمة على ماضي كل فرد وخبراته.

على سبيل المثال، لدى عازف الكمان منطقة دماغية أكثر تطوراً للعضلات التي تتحكم في إصبع الخنصر مقارنة بالأصابع الأخرى. وبالمثل، فإن الشخص الكفيف منذ الولادة أو الطفولة الذي يستخدم لغة برايل للقراءة يطور نشاطاً كبيراً في **القشرة البصرية**، رغم عدم قدرته على الرؤية.

كلما أصبحت منطقة دماغية غير فعالة بسبب آفة في جهاز حسي أو مستجيب، تعيد تخصيص مواردها العصبية لوظائف أخرى. **في الدماغ، لا تبقى أي جهة خاملة!**

هذا يفسر كيف يمكن للمكفوفين أن يمتلكوا سمعاً ولمساً متطورة للغاية، وكيف يطور الصم والبكم مهارات تواصل بلغة الإشارة مذهلة، وكيف يتمكن أفراد آخرون ذوو إعاقة من التعويض عن ذلك من خلال تطوير قدرات

أخرى جديدة. كما أن اللدونة العصبية تفسر كيف يمكننا أن نصبح أكثر ذكاءً مع مرور الوقت، حتى ونحن نفقد عشرات الآلاف من الخلايا العصبية يومياً دون استبدالها.

3. الآليات:

من أين تأتي هذه المرونة واللدونة في الجهاز العصبي؟

في الواقع، هناك عدة آليات أساسية تحدث على المستويين المحلي والعالمي.

3 .1. على المستوى **المشبكي** (اللدونة المشبكية):

إذا تم تحفيز جهد فعل في عصبون ما قبل المشبك وتكرر نفس التحفيز عدة مرات، يلاحظ أن استجابة العصبون بعد المشبك تزداد قوة مع مرور الوقت؛ وبالتالي يحدث تحسن في كفاءة المشبك. إذا تم إعادة تنشيط نفس الخلية العصبية قبل المشبكية بعد بضعة أيام، يتم تسجيل نفس الاستجابة الشديدة بعد التشابك [52].

تسمى هذه الظاهرة **التعزيز طويل الأمد** Long-Term Potentiation (LTP) [3، 38، 39]. كلما تم استخدام المشبك العصبي بشكل متكرر، يصبح أكثر تفاعلية وكفاءة على مدى فترة طويلة. يحصل ذلك بسبب:

- زيادة إفراز الناقلات العصبية.
- زيادة في عدد مستقبلات ما بعد المشبك أو تغيرات في خصائصها (الفسفرة Phosphorylation)، مما يجعلها تظل مفتوحة لفترة أطول.
- انخفاض في إعادة قبط الناقلات العصبية.

3 .2. على المستوى **الخلوي** (اللدونة العصبية):

يمكن للخلية العصبية أن تخلق **مشابك عصبية جديدة** (تكوين التشابك Synaptogenesis) أو تعديل بنية الأشواك التغصنية، مما يؤثر على سعة الإثارة المشبكية. يمكن أن تختلف عتبة الإثارة عند ربوة المحوار أيضاً حسب عدة عوامل، خاصة الهرمونية؛ عتبة أعلى تجعل من الصعب توليد جهد الفعل[74].

علاوة على ذلك، رغم استثنائيتها، يمكن أن تحدث مستويات منخفضة من تكوين الأعصاب Neurogenesis، غالباً في الحصين، حيث تولد خلايا عصبية الجديدة بوظائف جديدة.

3 .3. على مستوى **عالي** (اللدونة الدماغية):

يمكن أن يحدث إعادة تنظيم للشبكات العصبية وإعادة تدوير اتصالاتها. نذكر العبارة الشهيرة **لدونالد هيب** [140] (الذي اعتبر أبا اللدونة العصبية في خمسينيات القرن الماضي): **"الخلايا العصبية التي تطلق معاً تترابط معاً"** [140]. كلما تم تفعيل دائرة عصبية بشكل متكرر، فإنها تشكل شبكة قوية مخصصة لوظيفة محددة [141].

4. التطبيقات:

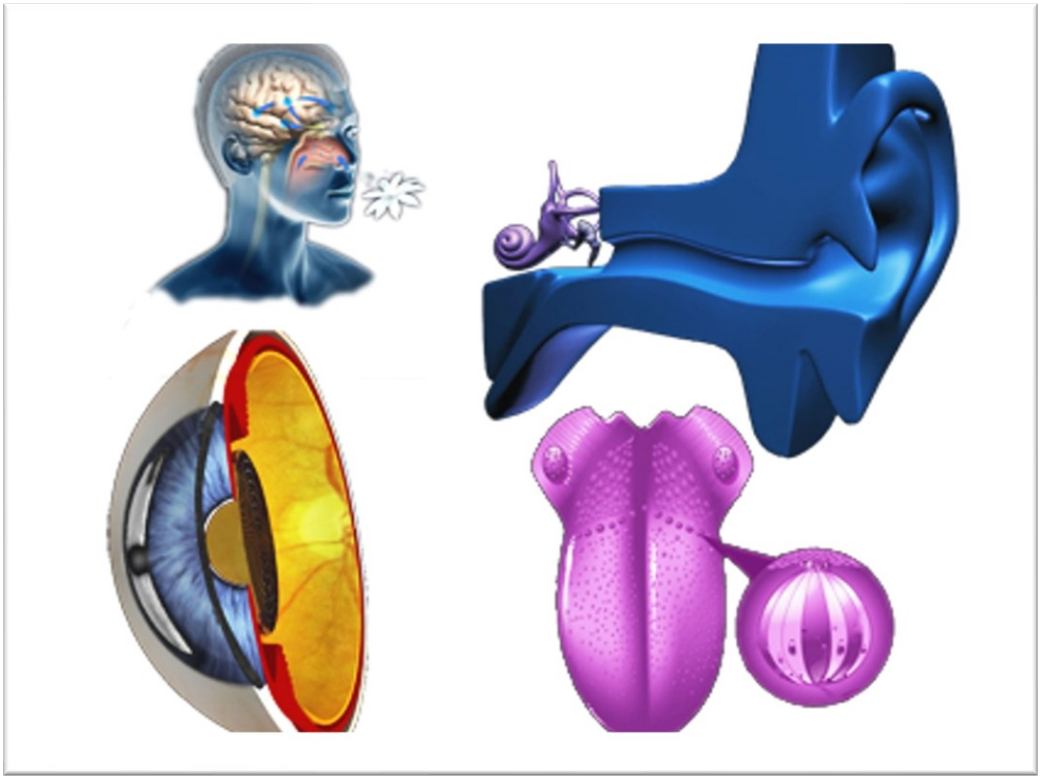
تركز دراسات متزايدة على اللدونة العصبية، وذلك لتوضيح آلياتها وحدودها - وقبل كل شيء - مؤهلاتها. اليوم، يمتلك جراحو الأعصاب المعرفة اللازمة للتنبؤ بما إذا كانت وظيفة ما ستتعافى بعد إجراء جراحي في الدماغ.

بدأت هذه المرونة الدماغية تُستغَل في السنوات الأخيرة، خاصة في مجال فقدان الحواس. على سبيل المثال، توجد الآن أجهزة تسمح للأشخاص المصابين بأنواع معينة من العمى بـ **"الرؤية"** باستخدام اللسان [97، 141]: كاميرات مثبتة على الجبهة تنقل بيانات بصرية إلى جهاز موضوع على اللسان، حيث تتحول إشارات الضوء إلى إشارات ميكانيكية. ونظراً لأن اللسان حساس للغاية، فإنه يسمح للمريض بالتمييز بين "البكسلات الميكانيكية Mechanical pixels ". مع مرور الوقت، يتكيف الدماغ مع هذه الوظيفة الجديدة، وتتولى القشرة البصرية إدراك هذه الوسيلة الحسية الجديدة.

مثال آخر يتعلق بمريضة فقدت إحساسها بالتوازن بسبب السمية التيهية Vestibulotoxicity الناتجة عن المضادات الحيوية. تم تزويدها بجهاز يرسل إشارات اهتزازية منتظمة إلى أرضية الفم بناء على توجهها المكاني. تدريجياً، تكيف دماغها مع هذا الشكل الجديد من الإشارة ودمج وظيفته بنفس الطريقة التي يدمج بها البيانات العصبية من الأذن الداخلية.

تثبت هذه التطبيقات العملية للدونة العصبية في فقدان الحواس مرة أخرى أن الأعضاء الحسية ليست سوى وسائل لاستخراج البيانات من العالم. رغم قوتها وتعقيدها، إلا أن فشلها الطرفي يمكن تجاوزه بوسائل اصطناعية **(الاستبدال الحسي** [97])، وسيتكيف الدماغ بنجاح مع هذه الأساليب الجديدة.

الأنظمة الحسية



الأنظمة الحسية - عموميات 68
الحساسية الشعورية 69
الرؤية 74
السمع 80
التوازن 86
الشم 89
التذوق 91

تلعب الحواس دوراً أساسياً في حياتنا. من خلال أنظمتنا الحسية المختلفة نشعر بالاتصال ببيئتنا وندرك باستمرار ما يحدث حولنا.

يتلقى دماغنا تقريبا **أكثر من مليار** قطعة من المعلومات من وسائل حسية مختلفة في كل ثانية [142]. هذا العدد الهائل يدل على مدى ارتباط الجهاز العصبي باستمرار بالبيئة.

مثل العديد من المخلوقات الأخرى، نمتلك عدة وسائل حسية تكتشف خصائص فيزيائية وكيميائية متنوعة. على سبيل المثال، نمتلك **نظاماً بصرياً** استثنائياً حساساً للضوء. من خلال هذا النظام، ندرك الموجات الكهرومغناطيسية كصور ذات معنى. لدينا أيضاً **نظام سمعي** يكتشف حتى أدق التغيرات في ضغط الهواء ويحولها إلى صوت مفهوم. نظامان كيميائيان آخران - **الشمي** و**التذوقي** - يسمحان لنا باكتشاف الجزيئات الكيميائية ومنحها رائحة وطعماً. **نظام توازن** آخر يخبرنا (بوعي أو لا) عن موقعنا وحركاتنا في الفضاء.

وقبل كل شيء، نمتلك كياناً حسياً مثيراً للإعجاب: **النظام الحسي الجسدي** (Somatosensory System)، الذي هو حيوي مثل الرؤية والسمع، إن لم يكن أكثر. هذا النظام، المنتشر والموزع في جميع أنحاء الجسم [39]، يوفر باستمرار معلومات عن أجسامنا، وما يلمسها، وقبل كل شيء، ما يهددها.

غالباً ما تتكون الأنظمة الحسية من عضو مستقبل، مسار نقل، ومنطقة استقبال وإدراك قشرية داخل الدماغ. تحدث ترجمة الإشارة في عضو المستقبل - أي تحويل الخصائص الفيزيائية-الكيميائية إلى **إشارات كهربائية** يمكن نقلها بواسطة الخلايا العصبية.

وصول هذه الإشارات الكهربائية إلى المناطق القشرية الأولية يمثل فقط المرحلة الأولى من استيعاب المعلومات داخل الدماغ. في الواقع، هناك حاجة لمناطق أخرى، تعرف **بالمناطق القشرية الترابطية**، لكي تكتسب المعلومات معنى؛ هذه العملية هي ما نسميه **الإدراك**.

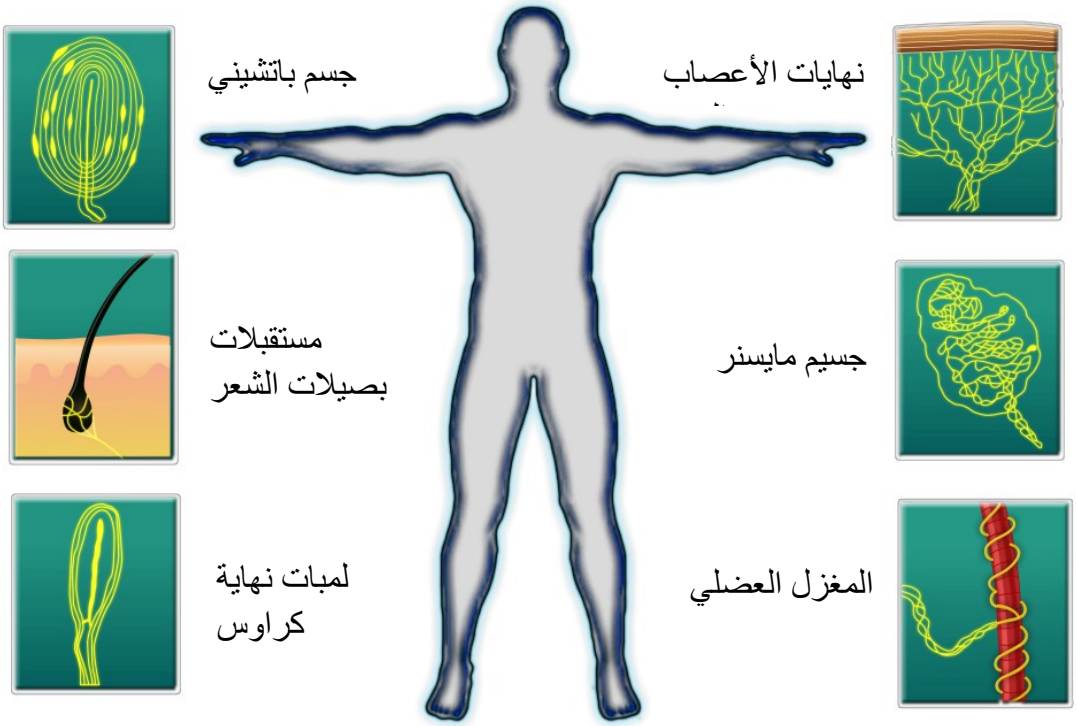
الحساسية الشعورية (Somesthesia) [2، 5، 72] (المعروفة أيضاً بالإحساس الجسدي، أو الحساسية العامة) تختلف عن الأنظمة الحسية الأخرى. في الواقع، أعضاء استقبالها موزعة في جميع أنحاء الجسم [39]، و تتشكل من أنماط حسية مختلفة تماماً [5].

1. الأنماط الحسية الجسدية:

الحساسية الشعورية هي، في الواقع، نظام متعدد الحواس يوفر معلومات عن:

- **اللمس الدقيق** (التمييزي/Epicritic) [36]: اكتشاف الأشكال الدقيقة والملمس الدقيق للأشياء.
- **اللمس الخشن** (البدائي/Protopathic): يعطي فكرة عامة عن هندسة الأجسام.
- **قياس الضغط**.
- **الاهتزاز** (Pallesthesia) [107].
- درجة **الحرارة** [4].
- **الألم** (مستقبلات الألم/Nociception) [5].
- والإحساس **بموقع الأطراف في الفضاء** (Statokinesia).

عموما، نميز ثلاث فئات رئيسية للحساسية العامة [5، 96]:



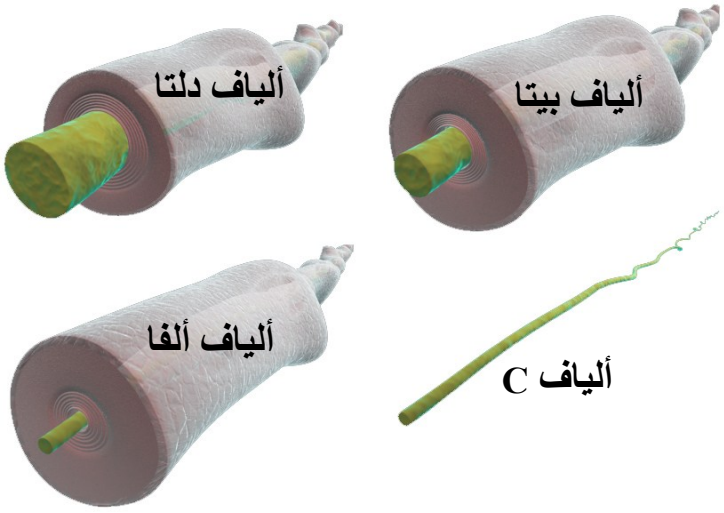
صورة 70: مستقبلات الجسم.

- **الإدراك الخارجي**: الحساسية المتعلقة بالعالم الخارجي.
- **الإحساس العميق** (Proprioception) [4]: إدراك الموقع النسبي لأجزاء الجسم (حساسية عميقة).
- **الإدراك الداخلي** [74]: حساسية الأحشاء والأنظمة النباتية.

2. المستقبلات:

هناك عدة أنواع من المستقبلات [41، 57] تشارك في تحويل إشارات مختلفة (ميكانيكية، حرارية، وكيميائية) إلى جهود فعل: اللغة التي تفهمها الخلايا العصبية. وبالتالي، نميز:

- **مستقبلات ميكانيكية** (تتفاعل مع الضغط).
- **مستقبلات كيميائية** تحفزها المواد الكيميائية.
- **مستقبلات حرارية** (حساسة للحرارة).
- **مستقبلات الألم** (التي تجمع بيانات عن الألم) [57].



صورة 71: ألياف عصبية شعورية.

في فئة المستقبلات الميكانيكية [5]، توجد عدة أنواع تعتمد على **القوة التمييزية** (القدرة على التمييز بين نقطتي تحفيز قريبتين) و**وقت التكيف مع المنبه** (التأخير الذي يتوقف فيه المستقبل عن إصدار جهود الفعل).

لذا نميز: **مستقبلات الشعر** [44]، **أقراص ميركل** Merkel discs [38، 41]، **جسيمات مايسنر** Meissner corpuscles (مهمة جداً للمس الدقيق) [38]، وجسيمات روفيني Ruffini corpuscles [143].

هناك نوعان من مستقبلات الحرارة [36]: مستقبلات السخونة ومستقبلات البرودة.

بالنسبة للحساسية العميقة، هناك ثلاثة أنواع من المستقبلات: **أعضاء وتر جولجي** Golgi tendon organs [54، 109]، **المغازل العصبية العضلية** Neuromuscular spindles [3، 38، 109]، **ومستقبلات المفاصل** [54، 109].

هناك أيضاً المستقبلات **متعددة الوسائط** Polymodal receptors [57، 144] **والنهايات العصبية الحرة** [41] التي تقدم بشكل أساسي معلومات عن الألم.

3. الإرسال

3. 1. المسارات المحيطية للإرسال الحسي الجسدي:

صورة 72: سلسلة من ثلاثة خلايا عصبية للانتقال الحسي الجسدي.

ترتبط المستقبلات بألياف عصبية تؤمن إرسال المعلومات الحسية من المستقبلات إلى الجهاز العصبي المركزي. يتم تمييز أربعة أنواع من الألياف بقطرها والميالين [57]:

- ألياف **A-alpha** وهي ألياف ميالينية ذات قطر كبير: (للإحساس العميق).
- ألياف **A-beta** وهي ألياف ميالينية متوسطة القطر: (للاستقبال الميكانيكي).
- ألياف **A-delta** وهي ألياف ميالينية صغيرة القطر.
- ألياف **C** غير الميالينية ذات القطر الصغير: (للمستقبلات الألمية والحرارية) [3].

تقع أجسام الخلايا (شبه أحادية القطب) لهذه الألياف في **العقد الشوكية** للأعصاب الشوكية، وفي **عقدة غاسر** Gasserian ganglion (العقدة الثلاثية التوائم) [45] للعصب ثلاثي التوائم Trigeminal nerve ، المسؤول عن حساسية الوجه.

3. 2. حقول الاستقبال:

صورة 73: القطاعات الجلدية.

المجال المستقبِل [5] هو المنطقة التشريحية التي تعصبها العمليات التغصنية **لخلية عصبية واحدة**. هذه المناطق أصغر وأكثر عدداً في الأطراف (أطراف الأصابع، الشفاه، اللسان)، وهذا يفسر الحساسية العالية في هذه المناطق.

3. 3. القطاعات الجلدية:

يحتوي كل جذر حسي (Dermatome) على ألياف حسية مرتبطة بمنطقة محددة من الجلد تسمى **القطاعات الجلدية** [41]. هناك 31 زوجاً من الأعصاب الشوكية؛ ومع ذلك، هناك فقط 30 زوجاً من القطاعات الجلدية. وذلك لأن الجذر العصبي الشوكي الأول، C1، غالباً لا يحتوي على ألياف حسية [13، 18].

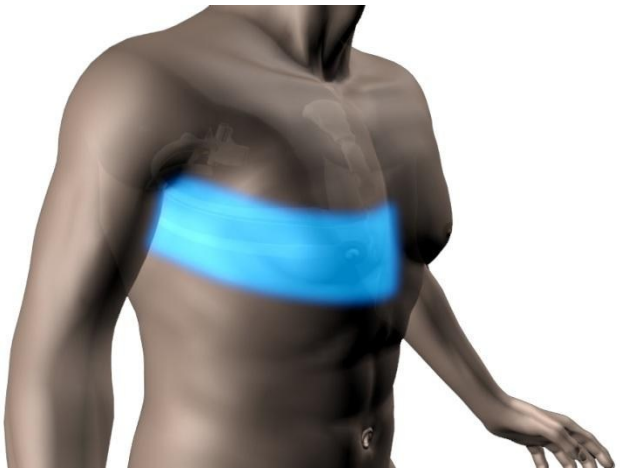
4. 3 المسارات المركزية للإرسال الحسي الجسدي:

تقليدياً هناك سلسلة من **ثلاث عصبونات** تضمن توصيل الإشارة الحسية إلى القشرة الدماغية. داخل الجهاز العصبي المركزي، تنتظم الألياف الحسية في مسارين رئيسيين: **نظام الفتيل الإنسي** Medial Lemniscus (مسار العمود الظهري) و**النظام خارج الفتيلي** Anterolateral System/Spinothalamic Tract (المسار الشوكي المهادي أو الجانبي الأمامي).

نظام الفتيل الإنسي [41]: تحمل أليافه معلومات تتعلق باللمس الدقيق، والاهتزاز، والإحساس العميق. وهي تشكل الأعمدة الخلفية من الحبل الشوكي وتصعد إلى **النوى الرقيقة** Gracile Nucleus **والإسفينية** Cuneate Nucleus [36] في النخاع المستطيل. في هذا المستوى، تلتقي مع العصبونات الثانية، التي تعبر الخط الأوسط **(التصالب)** وتصعد على طول **الفتيل الإنسي** إلى **المهاد**، حيث تصنع مشبكاً عصبياً ثانياً.

يحمل **النظام خارج الفتيلي** [145] الواردات الخاصة بالألم، والحس الحراري، واللمس الخشن. تتشبك الخلايا العصبية الأولى في هذا النظام مباشرة عند دخولها الحبل الشوكي على مستوى **المادة الهلامية** Substantia gelatinosa ؛ أما الخلايا العصبية الثانية فتعبر الخط الأوسط وتشكل **المسار الأمامي الجانبي** الذي يصل إلى **المهاد**، حيث تشكل هذه الألياف مشبكاً ثانياً. كما تنقل ألياف هذا النظام إشارات إلى نوى **جذع الدماغ** المختلفة، لا سيما **التكوين الشبكي** Reticular formation والمادة الرمادية حول **المسال** (Periaqueductal gray).

هناك أيضاً نظام ثالث يربط المخيخ بالألياف التي تحمل معلومات عن **الإحساس العميق اللاواعي** (المسار الشوكي المخيخي Spinocerebellar tract) [38، 75].



صورة 74: قطاع جلدي.

كلا النظامين (الفتيلي وخارج الفتيلي) يصلان إلى المهاد عند **المركب البطني القاعدي** Ventrobasal complex [50]. في هذا المكان، هناك خريطة جسدية لأجزاء مختلفة من الجسم: الرأس عند **النواة البطنية الخلفية الإنسية** (VPM) Ventral Posterior Medial nucleus [71] وبقية الجسم عند **النواة البطنية الخلفية الوحشية** (VPL) Ventral Posterior Lateral nucleus [2].

من المهاد، تصعد **العصبونات الثالثة** إلى **القشرة الحسية الجسدية الأولية** primary somatosensory cortex .

4. الإدراك:

القشرة الحسية الجسدية الأولية Primary Somatosensory Cortex (S1) تقع في **التلفيف ما بعد المركزي** Postcentral gyrus وتتوافق مع المناطق 3 و1 و2 من تصنيف **برودمان** Brodmann's classification [38]. على هذا المستوى، هناك أيضاً **تمثيل تضاريسي** Somatotopic representation [57] لجميع أجزاء الجسم. هذا التمثيل غير متناسب، ويعتمد على الدقة الحسية وتوزيع الحقول الاستقبالية في كل جزء من الجسم. هذا التجسيد يمثله قزم **بينفيلد** الشهير (Penfield Homunculus) [119]، الذي له يدان عملاقتان وفم ضخم لكن جذعه صغير.

تنتقل ألياف القشرة الحسية الجسدية الأولية إلى القشرة الحسية الجسدية الثانوية Secondary Somatosensory Cortex (S2) [38]، التي تشارك في عمليات الذاكرة. تنضم أخرى إلى القشرة **الحسية الجسدية الترابطية** Associative Somatosensory Cortex خلفياً في **القشرة الجدارية الخلفية** Posterior Parietal Cortex (المناطق 5 و7) [57]، حيث يحدث دمج المعلومات الحسية مع المعلومات البصرية لبناء واقع متماسك.

عموما ، تستقبل وتحلل كل قشرة حسية جسدية المعلومات الحسية من الجانب المقابل للجسم.

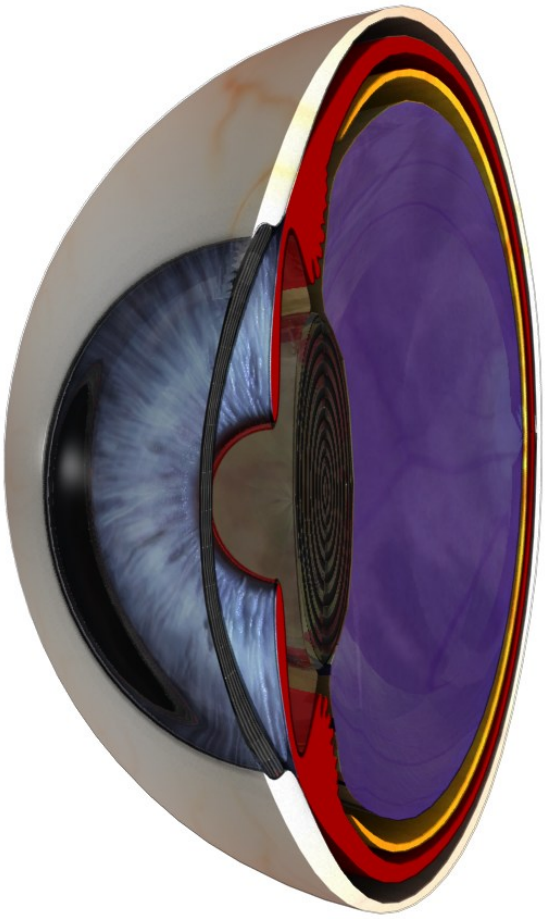
"نحن لا نرى بأعيننا؛ بل نرى بأدمغتنا." - **جانيت نوردون**

من بين جميع الأنظمة الحسية المتاحة لنا، تعد الرؤية [52، 57، 133] بلا شك الحاسة الأكثر تأثيراً في حياتنا. بفضل الرؤية يمكننا الملاحظة والتحليل والتفاعل بشكل صحيح مع العالم من حولنا؛ بدون الرؤية، ستوصد في وجوهنا نافذتنا الأولى التي نطل بها على هذا العالم.

1. الاستقبال:

1. 1. التشريح:

العضو المستقبِل للرؤية هو العين (**كرة العين**) [43، 45]. يتكون هذا العضو الكروي من **ثلاث طبقات** [42]، وهي من الخارج إلى الداخل: **الصلبة** Sclera، **والمشيمية** Choroid، **والشبكية** Retina.



صورة 75: مقطع طولي لكرة العين.

الصلبة (بياض العين) [146] هي غلاف أبيض قوي يحافظ على الضغط الداخلي ويحمي العين من التلف الميكانيكي. تستمر في الأمام كغلاف رقيق شفاف غير وعائي وغني بالتعصيب يسمى **القرنية** [64]، والتي تنتفخ في مقدمة كرة العين.

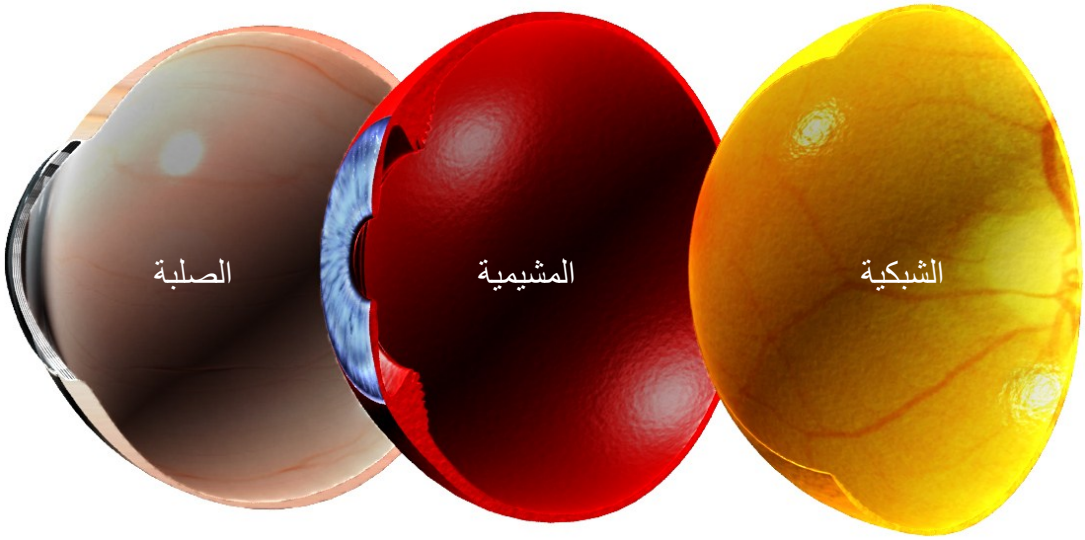
المشيمية [5، 64، 146]: غلاف أسود غني بالأوعية الدموية يغذي خلايا المستقبلات الضوئية في العين ويحافظ على داخل العين كغرفة مظلمة. تمتد المشيمية أماما **بالجسم الهدبي** Ciliary body [94، 122، 147] **والقزحية** Iris [133]، التي تمنحنا لون أعيننا وتحدد فتحة **البؤبؤ**. تُعرف هذه الهياكل الوعائية مجتمعة **بالعنبية** (Uvea) [72].

الشبكية [57]: غشاء رقيق يبلغ سمكه حوالي 0.5 مم [154] ويحتوي على تروية دموية عالية. هذا هو النسيج العصبي الذي يمتد إلى **العصب البصري** على مستوى **القرص البصري** Optic disc (الحليمة البصرية optic Papilla). الشبكية هي الجزء الحسي الذي يحتوي على خلايا **المستقبلات الضوئية** [39، 94].

خلف القزحية تقع العدسة (**العدسة البلورية** Crystalline lens) [99، 148]، وهي بنية شفافة ثنائية التحدب تشارك في تركيز أشعة الضوء على الشبكية.

بالداخل مواد تحافظ على شكل العين الكروي: أمام العدسة يوجد **الخلط المائي** Aqueous Humour [104، 148]، وهو سائل شفاف منخفض اللزوجة يغذي القرنية. وخلف العدسة يوجد الخلط الزجاجي Vitreous Humor [116،

[148، 149]، وهي مادة هلامية شفافة تثبت الشبكية في مكانها مقابل جدار العين وتمتص كمية كبيرة من الأشعة فوق البنفسجية.



صورة 76: طبقات العين الثلاث.

1 .2. بصريات:

القرنية هي أول سطح يجب أن يمر به الضوء ليصل إلى الشبكية؛ هي منحنية وبالتالي تساهم بشكل كبير في تجميع أشعة الضوء.

البؤبؤ هو الحجاب الحاجز للعين [52]؛ ينظم كمية الضوء الداخل عن طريق تغيير قطره استجابة لشدة الضوء، وذلك بفضل **النظام العضلي المعاكس للقزحية** Antagonistic Muscular System Of The Iris [150]: فالألياف الشعاعية توسع البؤبؤ، بينما الألياف الدائرية تضيقه.

العدسة هي الجزء الشيئي Objective العين [43]. شكلها ثنائي التحدب ومرونتها يسمحان لها بتعديل انحنائها للتركيز على الأجسام على مسافات مختلفة؛ وتسمى هذه الظاهرة **المطابقة** (Accommodation) [3].

تعمل العين ككاميرا [43] مع **حجاب حاجز** (البؤبؤ) [52] للتحكم التلقائي في التعريض، و**جزء شيئي** (القرنية والعدسة) [43] في وضع التركيز التلقائي، و**سطح حساس للضوء** (الشبكية). تركز الصورة الناتجة على الشبكية (في العين السوية البصر)، حيث يتم تصغيرها وقلبها.

1 .3. الشبكية:

أ. خلايا الشبكية:

تتكون الشبكية [3] (**النسيج العصبي** الذي ينشأ من **الدماغ البيني** أثناء التطور [41، 72]) أساساً من ثلاث طبقات من الخلايا العصبية [1، 70، 151]. من الداخل إلى الطبقة الخارجية للعين، نجد أولاً **خلايا العقدة** Ganglion cells [4،

[99، 152]، التي تشكل محاورها العصب البصري؛ هناك حوالي مليون ليف في كل عين [75، 96، 133، 149، 152].

بعد ذلك تأتي **الخلايا الثنائية القطب** Bipolar cells [153]، التي تعمل كوسيط بين المستقبلات الضوئية وخلايا العقدة، مكونة الطبقة الوسيطة.

ومن المفارقات أن **الخلايا العصبية المستقبلة للضوء** [99] تشكل الطبقة الأبعد عن الضوء، لأنها على اتصال مباشر مع ظهارة المشيمية.

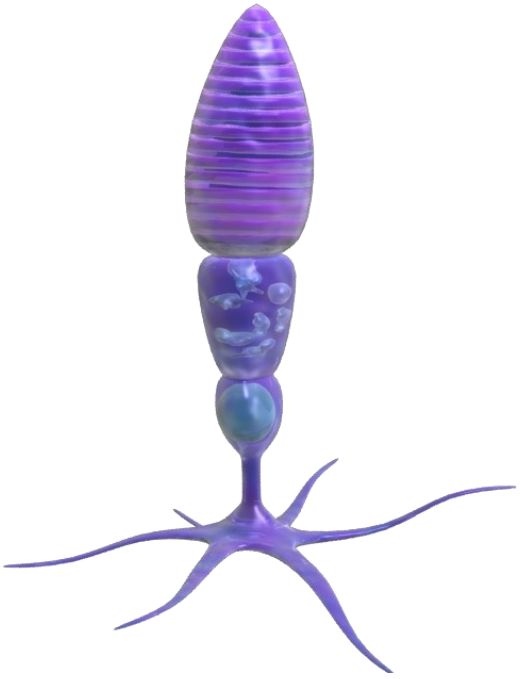
يوجد نوعان آخران من الخلايا العصبية أيضاً في الشبكية: **الخلايا الأفقية** والخلايا **عديمة المحوار** (Amacrine) [99]. تتداخل هذه الخلايا بين الطبقات الثلاث للشبكية وتساعد في تحسين التباين وتحديد الصورة المنقولة إلى الدماغ.

ب. المستقبلات الضوئية:

هناك نوعان من خلايا المستقبلات الضوئية: **المخاريط** Cones و**العصي** Rods. تحتوي كل عين بشرية على حوالي 125 مليون مستقبل ضوئي [99]، منها فقط 5 ملايين [75] مخروط.

- **المخاريط:**

على الرغم من أنها أقل عدداً بكثير من العصي، إلا أن المخاريط هي التي تحدد **حدة بصرنا** [48]. تحتوي المنطقة المركزية من الشبكية (**البقعة** Macula) [154] على منطقة مركزية تسمى **النقرة** Fovea [4، 39، 148] وهي خالية تماماً من العصي [38، 39]؛ لا يوجد في هذا المستوى سوى المخاريط.



صورة 77: مخروط.

توفر لنا المخاريط رؤية الألوان [1، 39] بفضل ثلاثة أصباغ (**أوبسينات** opsins [38]) حساسة للأزرق والأخضر والأحمر؛ حيث يحتوي كل مخروط بشكل تفضيلي على واحدة من هذه الأصباغ. وتسمح لنا المخاريط بإدراك تفاصيل الصورة [1، 39] لأن كل مخروط مرتبط بخلية ثنائية القطب واحدة، والتي بدورها مرتبطة بخلية عقدة واحدة [41].

- **العصي:**

العصي [153] حساسة جدا للضوء [1]؛ حيث يمكن لعصية واحدة أن تمتص وتتفاعل مع فوتون واحد فقط [5، 41]! تحتوي العصي على صبغة أساسية تسمى **الرودوبسين** Rhodopsin [57]؛ حيث تحتوي كل عصية على حوالي

1,000 قرص يضم 40 مليون صبغة رودوبسين [155].

يحتوي الرودوبسين على جزيء (**الريتينال**، وهو مشتق من فيتامين أ [4، 42]) يتغير شكله كلما امتص الضوء، مما يسبب تفاعلاً متسلسلاً يؤدي إلى فرط استقطاب الغشاء وتحفيز الخلية ثنائية القطب.

تنتشر العصي بشكل رئيسي على أطراف الشبكية وتسمح لنا باكتشاف حركة الأجسام [149]. وحساسيتها العالية تتيح لنا الرؤية في الظلام (الرؤية العتمية/Scotopic) [41]، على عكس المخاريط التي توفر الرؤية الضوئية.

ت.القرص البصري (الحليمة البصرية Optic Papilla):

في فحص قاع العين [67]، تبدو المنطقة التي تتجمع فيها جميع ألياف الأعصاب لتشكيل العصب البصري واضحة جداً؛ تسمى هذه المنطقة القرص البصري (الحليمة البصرية) [148]. ونظراً لعدم وجود مستقبلات ضوئية في هذا المكان، فهي تعتبر نقطة عمياء blind spot [41]. لماذا مع ذلك لا نلاحظ أي فجوة في مجال رؤيتنا؟ الإجابة هي أن الدماغ يملأ المعلومات المفقودة باستخدام بيانات تُجمع من المناطق المحيطة [39].

ث.الشبكية وأنصاف الحقول البصرية:

تنقسم الشبكية إلى جزأين [72]: **الشبكية الأنفية** Nasal Retina **والشبكية الصدغية** Temporal Retina. بالمقابل، ينقسم المجال البصري أيضاً إلى نصفي حقلين، كل منهما يتوافق مع منطقة الشبكية التي تستقبله [41]. تتلقى شبكية الأنف للعين اليمنى والشبكية الصدغية للعين اليسرى الضوء من نصف الحقل البصري الأيمن، والعكس صحيح.

2. الإرسال:

تشكل جميع الألياف العصبية المنبثقة من خلايا العقدة **العصب البصري** [41، 116]. و هو العصب الوحيد في الجسم الذي ينتمي إلى الجهاز العصبي المركزي وليس للجهاز العصبي المحيطي [41].

صورة 78: شبكية الأنف والشبكية الصدغية.

من الناحية التشريحية، العصب البصري هو الوحيد المحاط بثلاث طبقات من السحايا [64]. ومن الناحية الجنينية، يتطور من الدماغ البيني [50]. وعلى المستوى الخلوي، لا يحتوي على خلايا شوان بل على خلايا الدبق قليلة التغصن، ولهذا السبب غالباً ما يتأثر **بالتصلب المتعدد** Multiple-Sclerosis.

ينشأ العصب البصري من خلف العين وينتهي عند **التصالب**

البصري Optic Chiasm، فوق **الغدة النخامية** مباشرة.

التصالب البصري [119] هو نقطة تقاطع حيث تعبر ألياف كل **شبكية أنفية** الخط الأوسط لتلتحق بألياف من **الشبكية الصدغية** للعين المقابلة، مما يشكل زوجاً من **المسارات البصرية** Optic Tracts. ويحتوي كل مسار بصري على معلومات من نصف **الحقل البصري المقابل** [50].

تدور المسارات البصرية حول جذع الدماغ **(السويقات المخية)** وتصل إلى **النوى الركبية الجانبية** lateral geniculate nuclei للمهاد. من هناك، تنبعث عدة حزم من الألياف **(الإشعاعات البصرية** Optic Radiations**)** [41، 149] على **القشرة البصرية الأولية** في **الفص القذالي**، وإلى جهات أخرى مثل **الأكيمات العلوية** superior colliculi في جذع الدماغ، حيث تتم معالجة ظواهر انعكاسية معينة.

صورة 79: عصا.

3. الإدراك:

القشرة البصرية الأولية (Visual Cortex 1 / V1) (منطقة برودمان 17) [49، 73] الموجودة في **الفص القذالي** هي أول محطة قشرية للألياف العصبية في الجهاز البصري؛ وتقوم باستقبال المعلومات البصرية وتتولى معالجتها الأولية.

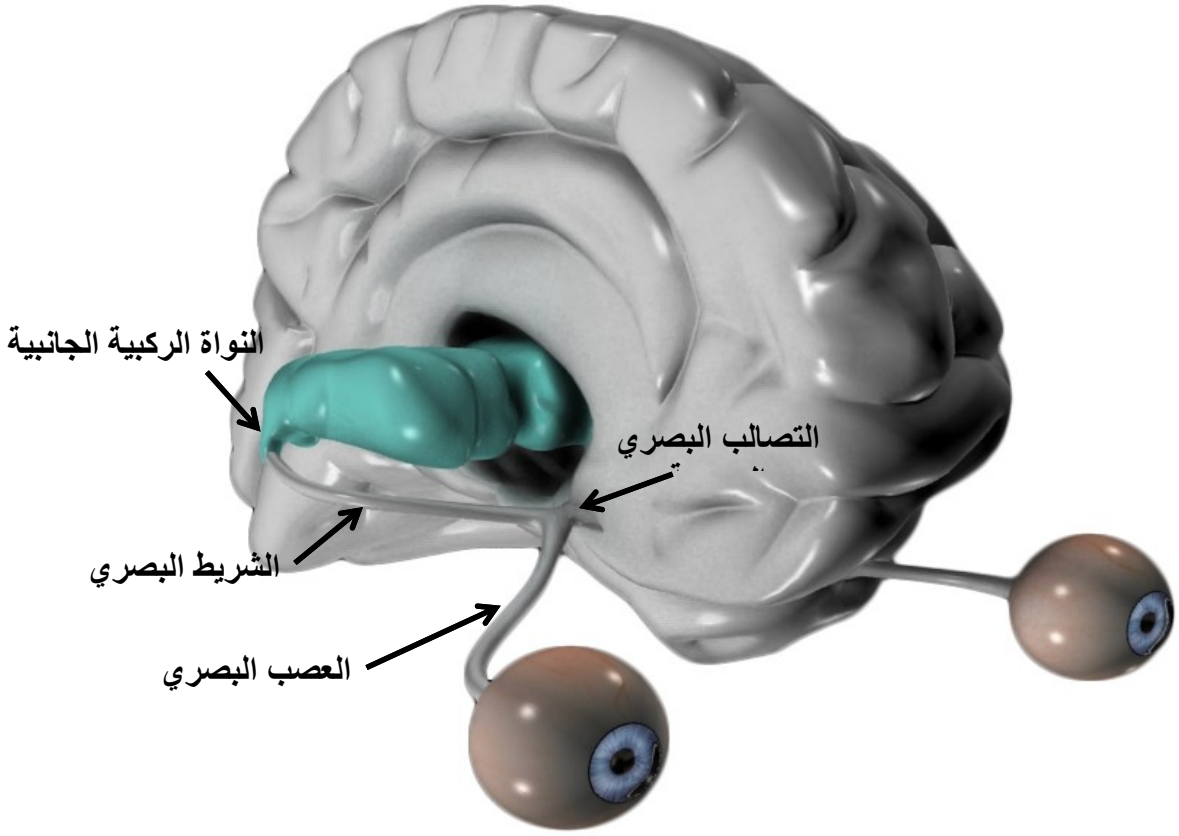
كل قشرة بصرية تحلل **نصف الحقل البصري المقابل**. هناك **خريطة شبكية** (Retinotopy) [5] مع مساحة كبيرة جداً من القشرة البصرية تتوافق مع المنطقة المركزية **للبقعة (النقرة)**.

من القشرة البصرية الأولية Primary Visual Cortex (V1)، تنتقل ألياف عصبية أخرى إلى مناطق **القشرة البصرية الثانوية** [57]؛ حيث تشمل المنطقة **البصرية الثانية (V2)** التي تساهم في إدراك الأنماط المعقدة وتفسير الخطوط والزوايا، و**المنطقة البصرية الثالثة (V3)** المختصة بإدراك الأشكال الكلية قيد الحركة. كما تمتد الإشارات إلى **المنطقة البصرية الرابعة (V4)** المسؤولة بشكل أساسي عن معالجة وإدراك الألوان والتفاصيل الدقيقة للأجسام، وصولاً إلى **المنطقة البصرية الخامسة (V5)** المعروفة أيضاً بالمنطقة الصدغية الوسطى Middle Temporal (MT) Area، وهي المنطقة المتخصصة بشكل دقيق في تحليل حركة الأجسام وسرعتها واتجاهها في الفضاء [57].

تنبعث ألياف أخرى إلى مناطق بعيدة من القشرة تسمى **المناطق الترابطية** Associative Areas [57]. هناك نوعان رئيسيان من هذه المسارات [57]:

التيار الظهري (المسار **"أين"** أو مسار القذالي-الجداري): يحلل هذا النظام الحركة والعمق والاتجاه المكاني، مما يسمح بتحديد مواقع الأجسام.

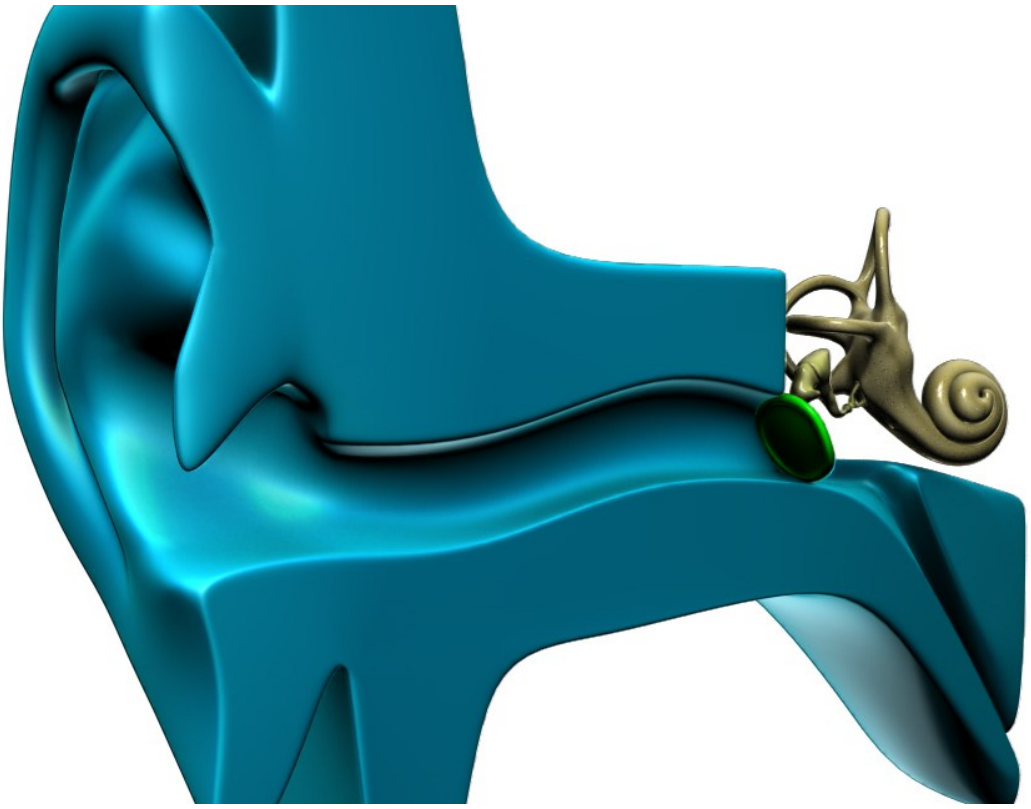
التيار البطني (المسار **"ماذا"** أو مسار القذالي-الصدغي): يحلل الشكل واللون، مما يسمح بالتعرف على الأشياء وإدراكها.



صورة 80: مسارات الإرسال البصري.

ما يعرف **بالصوت** [3، 39] ما هو في الواقع إلا سلسلة من مناطق تنبثق على مستوى الجمجمة الضغط العالي والمنخفض في الهواء. يشكل هذا التتابع **موجة صوتية** [141]. تتميز كل موجة صوتية بتردد [39]، هو عدد الدورات cycles في الثانية، والمعبر عنه بـ هيرتز Hertz (Hz)، وسعة amplitude [39]، وهي شدة الصوت، المعبر عنها بـ ديسيبل Decibels (dB).

الديسيبل هو وحدة لوغاريتمية، يعني أنه عندما تزداد موجة صوتية بعشرة ديسيبل في السعة، يكتسب الصوت قوة أكبر **بعشرة أضعاف**.



صورة 81: الجهاز السمعي.

1. الاستقبال:

العضو المستقبِل للصوت هو الأذن [57]، ويتكون من ثلاثة أجزاء: **الأذن الخارجية**، و**الأذن الوسطى**، و**الأذن الداخلية**.

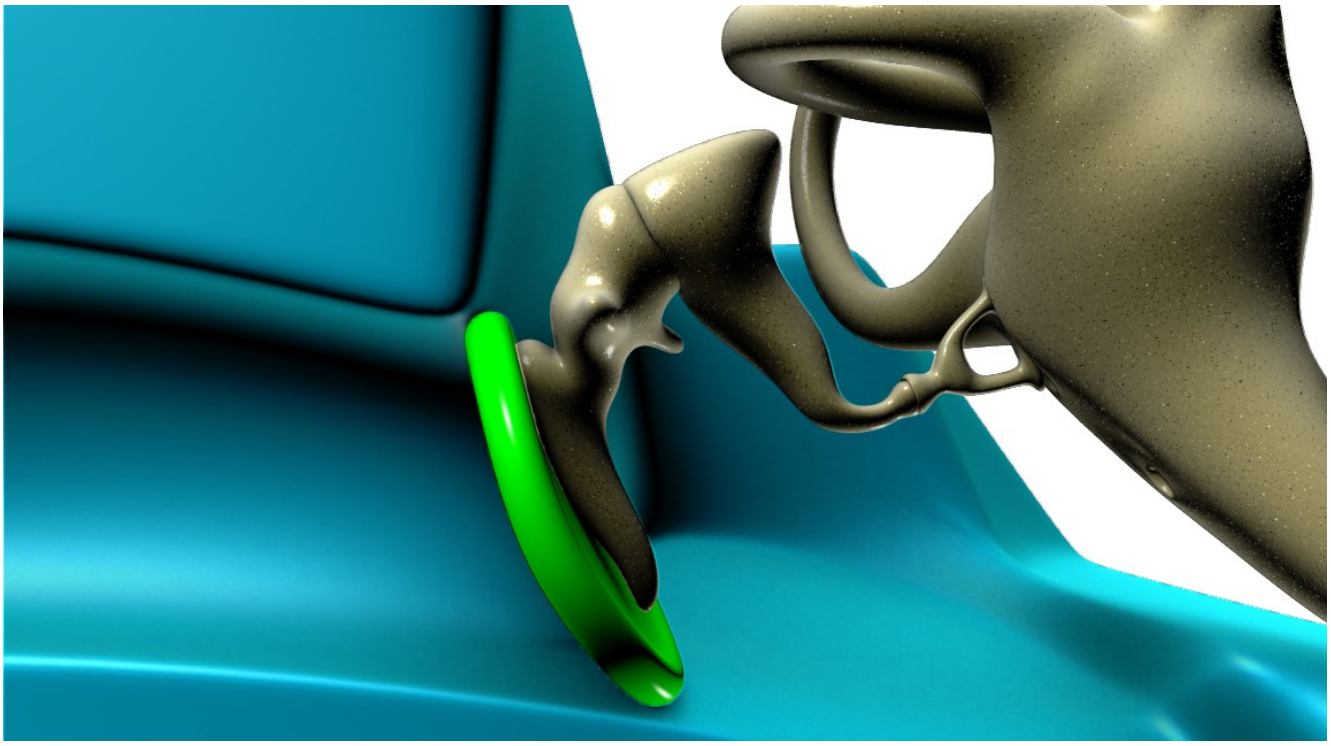
1 .1. الأذن الخارجية:

تشمل الأذن الخارجية [38] **الصيوان** (Pinna-Auricle)، والذي بفضل شكله الشبيه بالبوق، يضخم شدة الصوت ويخفف الانتقال المفاجئ للهواء من البيئة المفتوحة إلى القناة السمعية الخارجية الضيقة. وتوجه الأخيرة

(التي يبلغ طولها حوالي ثلاث سنتيمترات) موجات الصوت إلى **طبلة الأذن** Eardrum (**غشاء الطبل** Tympanic Membrane) [5]، وهو غشاء رقيق يهتز باستمرار استجابة للصدمات الصوتية.

1 .2. الأذن الوسطى:

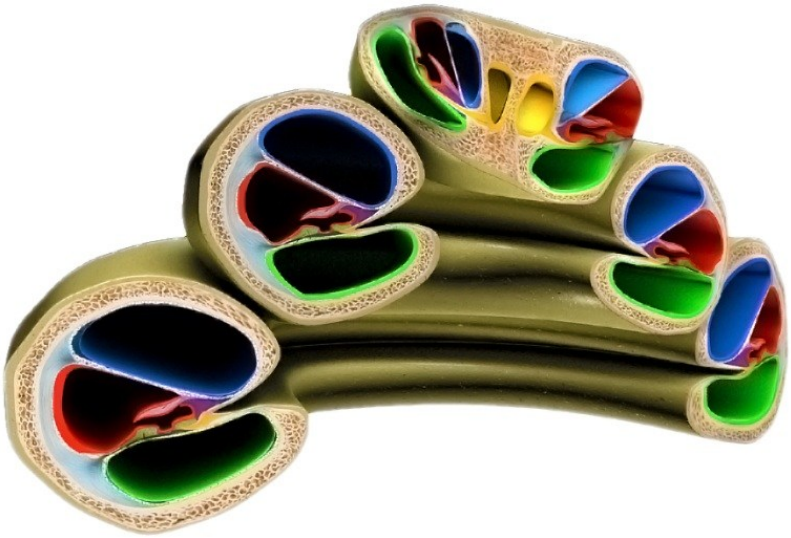
تحتوي الأذن الوسطى [41] على ثلاث عظيمات أساسية: **المطرقة** Malleus، التي تتصل بطبلة الأذن بواسطة المقبض؛ **والسندان** Incus؛ **والركاب** Stapes. يُعرف هذا المركب باسم السلسلة العظمية Ossicular Chain [84]، ويعمل كوسيط صوتي بين وسط الهواء خارج طبلة الأذن والوسط السائل للأذن الداخلية خلف **النافذة البيضاوية** Oval Window.



صورة 82: السلسلة العظمية.

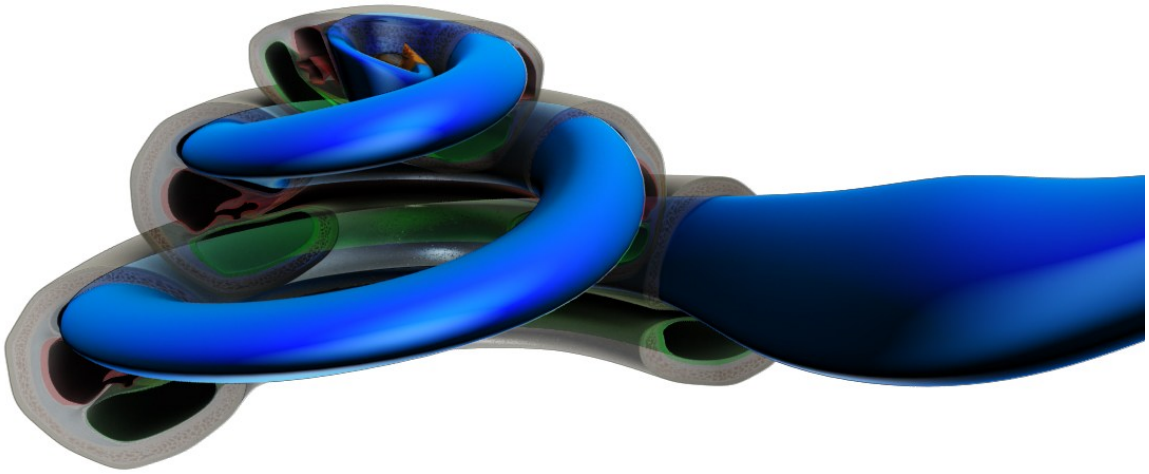
عندما تمر موجة صوتية من الهواء إلى وسط سائل، تنخفض قوتها بنسبة 99.9%؛ ويُعرف هذا بالمقاومة أو، بشكل أكثر شيوعاً، **بالمعاوَقة الصوتية** Acoustic Impedance [52]. وتسمح النسبة العالية جداً لقطر الطبلة إلى قطر النافذة البيضاوية بتجاوز هذا الفقد [3] وتضخيم شدة الاهتزاز بمقدار 30 ديسيبل.

في الأذن الوسطى، هناك آلية لتقليل شدة الصوت التي تزيد عن 70 ديسيبل (شدة ضارة



صورة 83: جزء من القوقعة.

بالأذن الداخلية). يتم تحقيق ذلك من خلال **المنعكس الركابي** Stapedial Reflex [72]، الذي يتضمن **عضلة الركاب** stapedius muscle والعضلة الموترة للطبلtensor tympani muscle ؛ حيث تصبح السلسلة العظمية أكثر صلابة، مما يضعف شدة الصوت.



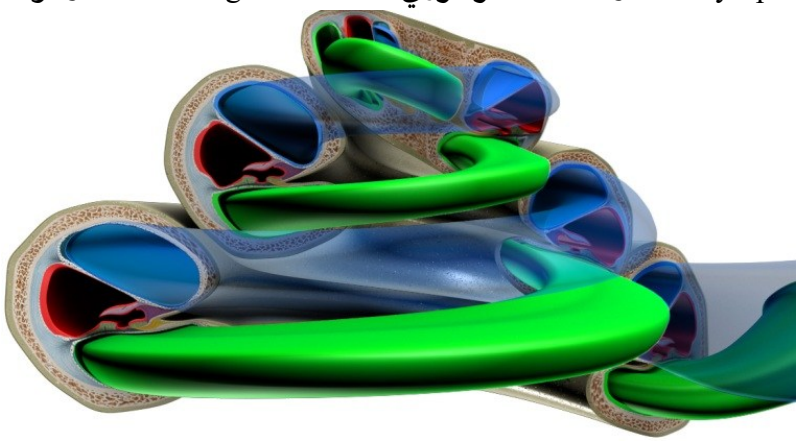
صورة 84: القناة الدهليزية.

1 .3. الأذن الداخلية:

تحتوي الأذن الداخلية [5، 41] على **القوقعة** Cochlea [57]، وهي العضو الفعلي لتحويل الإشارات الميكانيكية (الاهتزازات) إلى إشارات كهربائية (جهود فعل)، لغة الخلايا العصبية. للقوقعة شكل مخروطي حلزوني مشابه لصدفة الحلزون، مع لفتين ونصف [133] حول عمود عظمي يسمى العميد (Modiolus).

ينقسم الجزء الداخلي من القوقعة على طولها إلى **ثلاثة تجاويف**: **القناة الدهليزية** Scala Vestibuli في الأعلى، و**القناة الطبلية** Scala Tympani في الأسفل، و**القناة القوقعية** Cochlear Duct (القناة الوسطى) بينهما. القناة الدهليزية على اتصال **بالدهليز** Vestibule و**النافذة البيضاوية**؛ وتتواصل عند القمة مع القناة الطبلية من خلال فتحة تسمى الثقب القوقعي (Helicotrema). تحتوي كلتا الغرفتين على **اللمف المحيطي** Perilymph.

تحتوي القناة القوقعية على **اللمف الداخلي** Endolymph وكذلك **عضو كورتي** Organ Of Corti [41، 57]، وهو البنية المسؤولة عن تحويل الاهتزازات إلى إشارات كهربائية. تُفصل القناة القوقعية عن القناة الطبلية بواسطة **الغشاء القاعدي** basilar Membrane، وعن القناة الدهليزية بواسطة غشاء رايسنر Reissner's membrane.



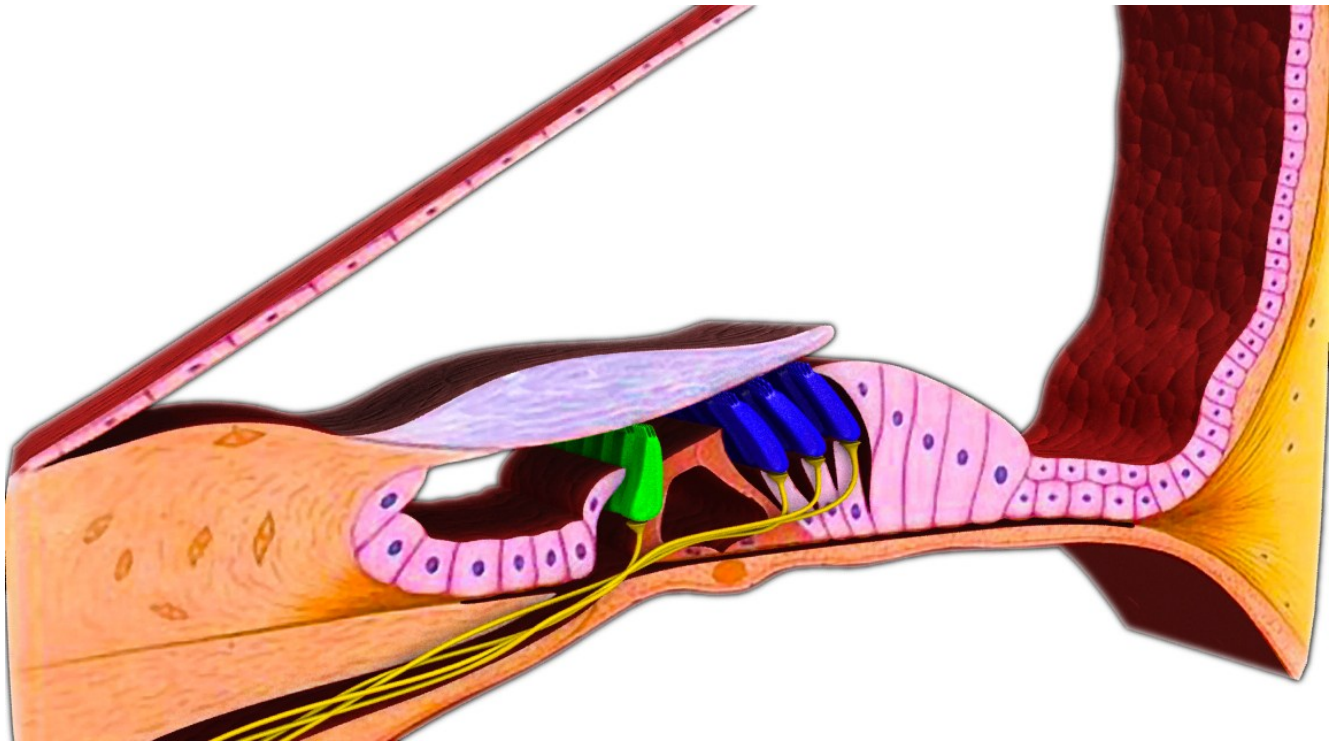
صورة 85: القناة الطبلية.

1 .4. عضو كورتي:

يتكون **عضو كورتي** [41] من نوعين من

الخلايا الحسية: **خلايا شعرية داخلية** Inner Hair Cells (IHCs) مرتبة في صف واحد (يوجد حوالي 3,500 خلية شعرية في القوقعة)، وخلايا شعرية خارجية Outer Hair Cells (OHCs) مرتبة في ثلاثة صفوف على شكل حرف V [38]. تحتوي هذه الخلايا على أهداب متصلة بغشاء يسمى **الغشاء السقفي** Tectorial Membrane.

عندما تنزلق الخلايا الشعرية بالنسبة للغشاء السقفي، فإنها تزيل الاستقطاب وتطلق الناقلات العصبية [41] التي تحفز الألياف العصبية. تتبع هذه الألياف الغشاء القاعدي إلى العميد، حيث تشكل أجسام خلاياها العقدة الحلزونية. ومن هذه العقدة، تتجمع الألياف المحورية لتشكيل العصب القوقعي في مركز القوقعة.



صورة 86: عضو كورتي.

1 .5. طريقة الإشتغال:

عندما تصل اهتزازات الصوت إلى طبلة الأذن، يتم تضخيمها وتنتقل عبر السلسلة العظمية إلى النافذة البيضاوية؛ هذا يسبب اهتزاز اللمف المحيطي داخل القناة الدهليزية [39].

اعتماداً على تردد الموجة الصوتية، فإن **الغشاء القاعدي** (الذي يصبح أكثر مرونة واتساعاً تدريجياً من القاعدة إلى القمة [5]) يهتز بشكل تفضيلي عند **منطقة محددة** [39]. تقع هذه المنطقة بالقرب من النافذة البيضاوية للأصوات عالية النبرة، وبالقرب من القمة للأصوات منخفضة النبرة [41].

في منطقة الاهتزاز التفضيلي، تنزلق الخلايا الشعرية ضد الغشاء السقفي [5]، وتزيل الاستقطاب، ثم ترسل إشارة عصبية عبر الألياف العصبية الواردة **إلى جذع الدماغ**.

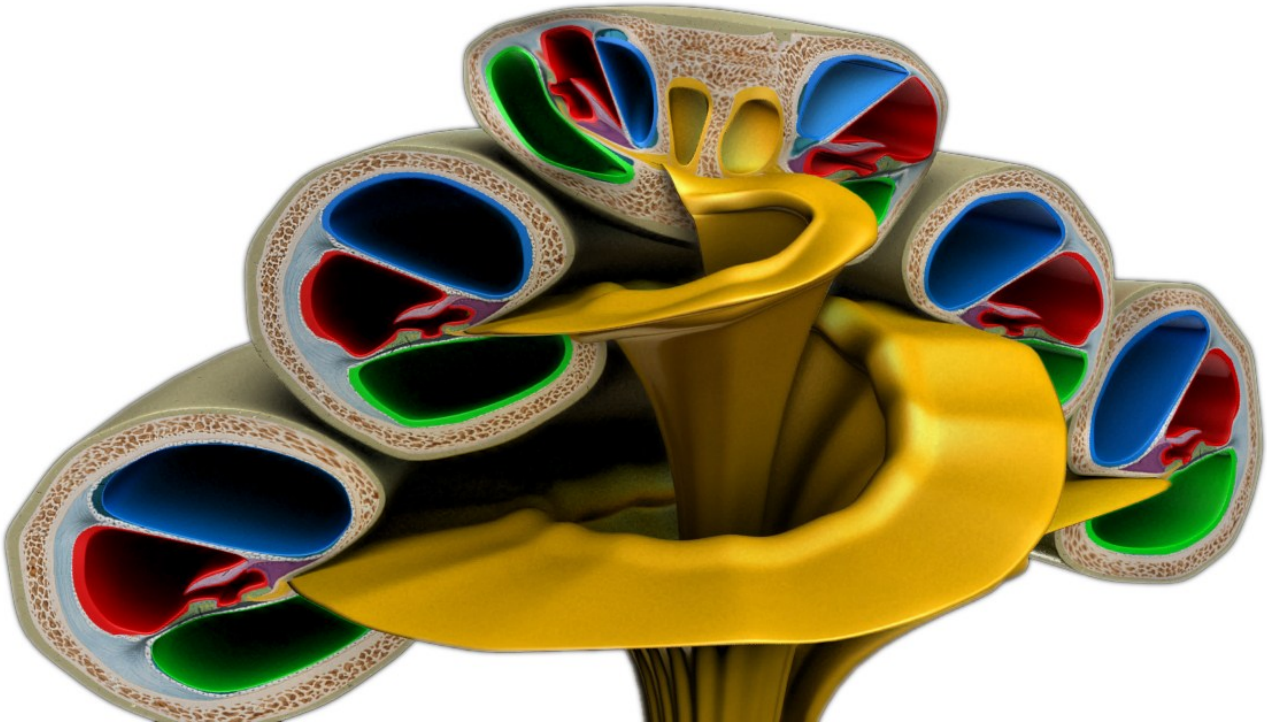
الوظيفة الرئيسية لخلايا الشعر الخارجية هي الانقباض لتضخيم اهتزاز الغشاء القاعدي عند نقطة التحفيز

[96]، مما يسمح للخلايا الشعرية الداخلية بإزالة الاستقطاب عند سعات منخفضة. تلعب الخلايا الشعرية الداخلية الدور الأبرز في الاستقبال السمعي [38]؛ بينما تعمل الخلايا الشعرية الخارجية أكثر **كموالفات** Tuners تضخم الاهتزازات عند الحاجة. ويتضح ذلك من حقيقة أن 95% من الألياف الواردة مخصصة للخلايا الشعرية الداخلية.

2. الإرسال - الإدراك:

عندما تزيل الخلايا الشعرية الداخلية الاستقطاب، فإنها تحفز الألياف العصبية المرتبطة بها، والتي تحمل الإشارة العصبية إلى **العقدة الحلزونية** Spiral Ganglion. ومن هناك، ينتقل جهد فعل عبر **العصب القوقعي** إلى **نواة القوقعة** المماثلة في جذع الدماغ [50].

محطات الإرسال المركزية للنظام السمعي هي أكثر تعقيداً من تلك الموجودة في النظام البصري. في الواقع، تتطلب معالجة الأصوات التي تستقبلها الأذن استخراج كميات هائلة من البيانات: معلومات عن الشدة، والتردد، وتحديد الموقع المكاني [3]، والمدة، وتصفية الضوضاء الخلفية.



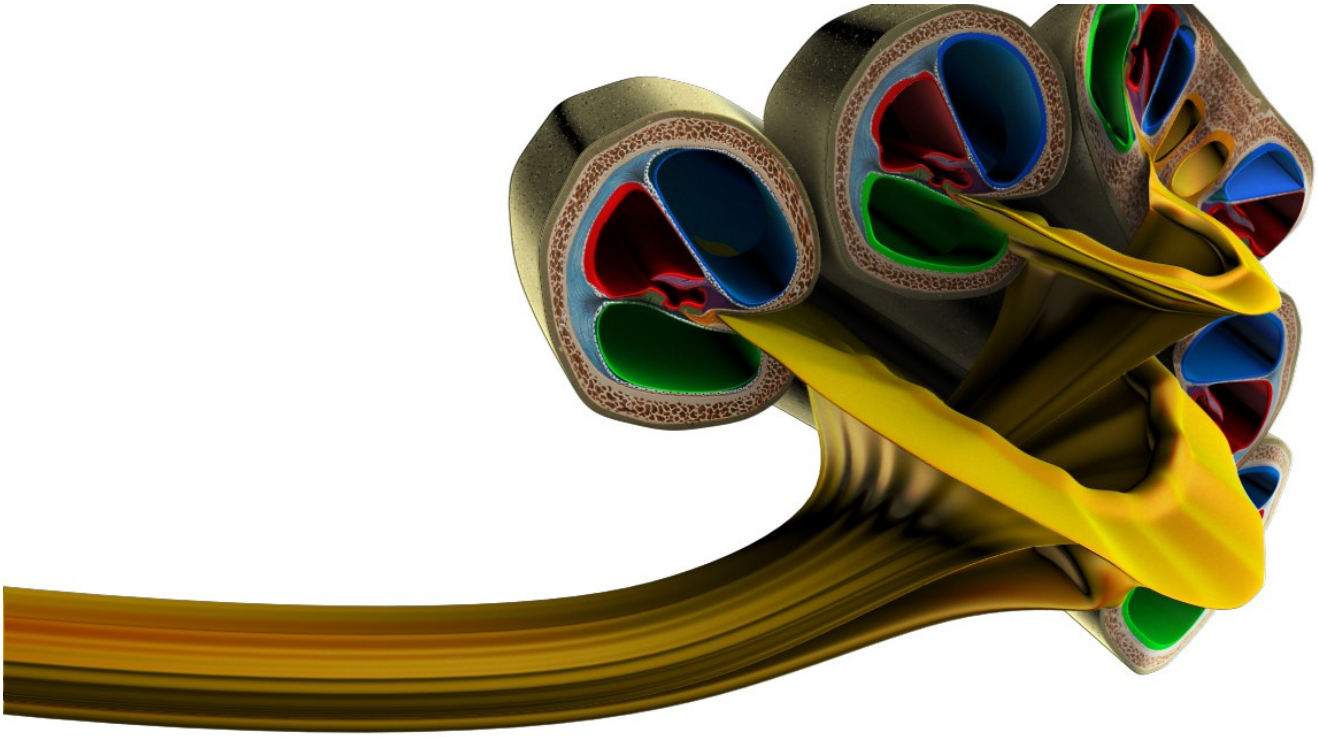
صورة 87: القوقعة والعقدة الحلزونية.

يتم تمييز **مسارين سمعيين** رئيسيين [5] داخل الجهاز العصبي المركزي: **المسار السمعي الأساسي** [41، 49، 133] و **المسار السمعي غير الأولي**.

يبدأ **المسار السمعي الأساسي** (المخصص حصرياً للإدراك السمعي) من نواة القوقعة المماثلة ويصل إلى **المركب الزيتوني العلوي** Superior Olivary Complex (المقابل في 80% من الحالات). تصعد هذه الألياف لتصل إلى **نوى**

الفتيل الوحشي Lateral Lemniscus Nuclei، ثم **الأكيمة السفلية** Inferior Colliculus، والمهاد عند **الجسم الركبي الإنسي** Medial Geniculate Body. ومن هناك، تصل الألياف إلى القشرة السمعية الأولية في منطقة برودمان 41 [39]، وتحيط بها **منطقة سمعية ثانوية**. يجدر بالذكر أن هناك تنظيماً **نغمياً** (Tonotopy) [5] داخل القشرة السمعية الأولية، مع توزيع متدرج لترددات صوتية مختلفة [39].

المسار السمعي غير الأولي هو مسار غير محدد ومتعدد الوسائط؛ يقوم بعمل محطات إرسال في الجانب نفسه والمقابل في **التكوين الشبكي** Reticular Formation ثم **المركز الشبكي** للمهاد. ومن هناك، تُسقط أليافه إلى قشرة الترابط متعدد الحواس.



صورة 88: العصب القوقعي.

يلعب التوازن [42، 130] دوراً حيوياً في حياتنا؛ فبفضل هذه القدرة يمكننا الوقوف والمشي وتحديد اتجاه أنفسنا في الفضاء.

يعتمد التوازن على مجموعة من الآليات التي تثبت الجسم أثناء الوقوف وأثناء الحركة النشطة أو السلبية. تساعد هذه الآليات في الحفاظ على وضعية مرجعية وتسمح للجسم بالعودة إليها بغض النظر عن الظروف المحيطة.

يتطلب الحفاظ على التوازن الساكن والديناميكي آليات تتضمن مكوناً حركياً مكوناً من عناصر عصبية عضلية، ولكن أيضاً، والأهم من ذلك، آليات تخبر الجهاز العصبي المركزي باستمرار بموقع أجزاء الجسم المختلفة وحركاتها.

صورة 89: المتاهة العظمية.

1. الأنماط الحسية للتوازن:

حاسة التوازن هي نظام فريد؛ أولاً، هو نظام يعمل في الغالب بشكل **لا واعي**، وثانياً، يتضمن عدة طرق حسية [96]. ومن بين الأعضاء المشاركة في نظام التوازن الحسي:

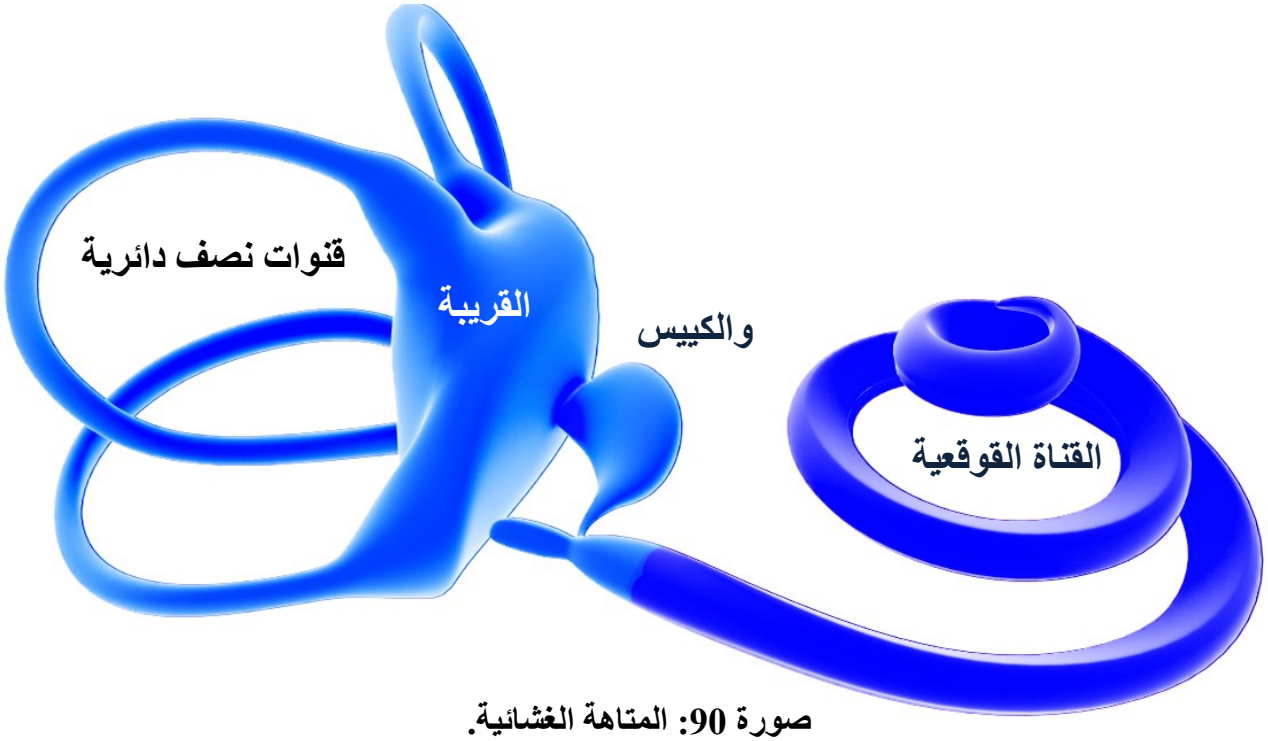
- الجهاز **الدهليزي** [67]: عضو محدد للتوازن.
- النظام **البصري**.
- **الحساسية العميقة** (Proprioception).
- الحساسية السطحية **لباطن القدمين**.

تقوم جميع هذه الأنظمة بمزامنة إشاراتها الواردة لإبلاغ الجهاز العصبي المركزي باستمرار بوضع أو حركات أجزاء الجسم المختلفة حتى يتمكن من التفاعل بالطريقة الأنسب.

2. الاستقبال:

تتكون الأذن الداخلية أساساً من **تيه عظمي** Bony labyrinth يحتوي على **اللمف المحيطي**، وبداخله تيه غشائي يملؤه **اللمف الداخلي**. ينقسم **التيه الغشائي** Membranous Labyrinth إلى مكون سمعي أمامي **(القناة القوقعية)** ونظام **دهليزي** خلفي [38، 39]، وهو العضو المحدد للتوازن.

يبلغ قطر الجهاز الدهليزي حوالي 1 سم ويتكون من غرفتين: **القريبة** (Utricle) **والكييس** (Saccule)، بالإضافة إلى **ثلاث قنوات نصف دائرية**.



صورة 90: المتاهة الغشائية.

2 .1. أعضاء غبار التوازن:

تسمى القريبة والكييس أعضاء **غبار التوازن** (Otolith Organs) [38] لأنهما تحتويان على بلورات كربونات الكالسيوم (غبار التوازن). هاته الأخيرة متخصصة في اكتشاف حركات وتسارعات الرأس الخطية، بالإضافة إلى موقعه الثابت بالنسبة لمحور الجاذبية.

القريبة موجهة أفقياً [38]؛ حيث تكتشف خلاياها الحسية جميع الحركات التي تحدث في المستوى الأفقي. أما **الكييس**، فله اتجاه عمودي؛ ويوفر معلومات حسية عن الحركات الرأسية. هذان النظامان يبلغان الجهاز المركزي باستمرار بموقع الرأس وحركات الإزاحة التي يمر بها في جميع الاتجاهات.

الخلايا الحسية في الجهاز الدهليزي تشبه الخلايا الشعرية في القوقعة [41]؛ وهي منغرسة في **النسيج الطلائي** Epithelium، مع وجود **أهداب** cilia على قطبها القمي Apical Pole : **الأهداب الساكنة** Stereocilia و **المتحركة** Kinocilia. تغمر هذه الأهداب بطبقة هلامية (**القمة**/Cupula) [52] والتي تكون، في القريبة والكيس، مغطاة بالبلورات الدقيقة (غبار التوازن) التي تزيد من قوامها.

عندما يتحرك الرأس، يستغرق **اللمف الداخلي** (بسبب القصور الذاتي لديه) وقتاً ليتبعه، وبالتالي يدفع القمة في الاتجاه المعاكس للحركة. يحمل هذا الفعل الأهداب الخاصة بالخلايا الحسية معه، مما يؤدي إلى إزالة الاستقطاب [41] وتنشيط الخلايا العصبية الواردة المرتبطة به.

2. 2. قنوات نصف دائرية:

القنوات الثلاث نصف الدائرية مرتبة كل في أحد مستويات الفضاء الثلاثة [38، 52]؛ وبالتالي، هناك قناة **أمامية**، و**خلفية**، و**جانبية**. تنتهي كل منها بالقرب من القريبة بانتفاخ (**أمبولة القناة**). تحتوي الأخيرة على خلايا حسية تعمل وفق نفس آلية [38] تلك الموجودة في الكيس والقريبة، باستثناء أن القمم في هذا المستوى لا تحتوي على غبار التوازن.

وبسبب ترتيبها الدائري، تشير القنوات نصف الدائرية إلى **الحركات الدورانية** للرأس.

3. الإرسال - الإدراك:

الألياف العصبية التي تنشأ من الخلايا الشعرية في الجهاز الدهليزي تتواجد أجسامها الخلوية في **عقدة سكاربا** (العقدة الدهليزية) [50]. من هذه العقدة، يخرج **العصب الدهليزي** وينضم إلى العصب القوقعي لتشكيل **العصب الدهليزي القوقعي** Vestibulocochlear Nerve.

بعد الوصول إلى **النواة الدهليزية** [38] في جذع الدماغ، تنقل ألياف الفرع الدهليزي **للعصب القحفي الثامن** الإشارات مع خلايا عصبية أخرى تصل إلى مناطق مختلفة من الجهاز العصبي المركزي: **المهاد** [41]، و**المخيخ**، و**القشرة الدماغية**، و**الحبل الشوكي**، و**التكوين الشبكي**، و**نوى محرك العين** المسؤولة عن **المنعكس الدهليزي-العيني** vestibulo-ocular reflex [50]. هذا المنعكس يثبت الصور على الشبكية أثناء الحركة.

تماماً مثل التذوق، الشم [5، 133، 141] حاسة منبهاتها ذات طبيعة **كيميائية**. بفضل هذه الحاسة، يمكننا اكتشاف وتحليل المواد الكيميائية الموجودة في الهواء والتي تشكل ما نسميه: **الروائح**.

بينما تكتسي هذه الحاسة أهمية حيوية لدى أنواع أخرى، فإن أهميتها لدى الإنسان تعتبر **ثانوية جداً**. وفي الواقع، حاسة الشم لدى الإنسان قليلة التطور مقارنة بالحيوانات الأخرى [5] وتصطدم بذاتية كبيرة تجعل دراستها أمراً صعباً.

1. الاستقبال:

يقع العضو المستقبِل للشم في الجزء العلوي من **التجويفات الأنفية**. ويتعلق الأمر **بالمخاطية الشمية** Olfactory Mucosa [94، 130] التي تضم خلايا حسية شمية، يبلغ عددها 10 ملايين لدى الإنسان مقابل 200 مليون لدى الكلاب مثلا [141]! هذه الخلايا عبارة عن عصبونات ثنائية القطب مزودة بأهداب شمية، ولديها القدرة على اكتشاف الروائح عند نهاية تغصناتها.

تعتبر العصبونات الشمية فريدة من نوعها: فهي **تستمر في التكاثر** لدى الشخص البالغ (تكوين الأعصاب/Neurogenesis) [4، 116]. ويبلغ متوسط عمر العصبون الشمي الأولي حوالي 30 إلى 60 يوماً [99].

يستطيع الإنسان تمييز ما بين 4000 و 10.000 رائحة مختلفة [5]، كل رائحة تنشط بشكل تفضيلي مجموعة معينة من العصبونات المستقبلة [5]. يقوم مخاط المخاطية الشمية بالتقاط الجزيئات التي ستتحد **مع البروتينات المستقبلة** على مستوى غشاء الأهداب للمستقبلات الشمية. هذا الاتحاد سيؤدي إلى سلسلة من التفاعلات الكيميائية الحيوية التي ستنتهي بإزالة استقطاب الغشاء وتوليد جهد فعل [38، 41].

2. الإرسال:

تقوم محاور العصبونات المستقبلة بعبور **الصفيحة المصفوية** Cribriform Plate **للعظم الغربالي** Ethmoid Bone مشكلة **العصب الشمي** [41، 50، 116]. يعد هذا الأخير عصباً خاصاً جداً؛ فأولاً، هو **أقصر عصب** حيث يتجاوز طوله بالكاد سمك الصفيحة المصفوية، وثانياً، لا يمتلك بنية تشريحية صلبة ومتماسكة مثل بقية أعصاب الجسم، بل هو عبارة عن كتلة من حزم الألياف العصبية التي تعبر الصفيحة المصفوية في أماكن مختلفة.

يخلط بعض المؤلفين بين العصب الشمي **والسبيل الشمي** Olfactory Tract [83] الواقع بين **البصلة** Bulb **والأشرطة الشمية** Olfactory Striae ، في حين يتفق أغلبهم على أن العصب الشمي ليس سوى مجموعة الألياف العصبية الموجودة بين المخاطية الشمية **والبصلة الشمية** [116].

تتميز **البصلة الشمية** [4، 38، 41] بوجود **الكبيبات** Glomeruli [38، 96]، وهي بنيات كروية تحتوي على الوصلات المشبكية للعصبونات المستقبلة، و**الخلايا التاجية** (Mitral cells) (وهي العصبونات الرئيسية للإرسال في البصلة الشمية) [5]، والعصبونات **البينية المحلية**. ويوجد حوالي 1.000 كبيبة في البصلة الشمية [5]، وتضم كل واحدة منها في المتوسط 25.000 وصلة مشبكية.

تتجمع العصبونات الشمية التي تمتلك نفس الأُلفة لرائحة معينة في كبيبة واحدة حيث تشكل مشابك عصبية مع الخلايا التاجية الخاصة بالإرسال. تمر هذه الأخيرة عبر **السبيل الشمي** [116] ثم **الشريط الشمي الوحشي** lateral olfactory stria [45] لتنتهي مباشرة على مستوى **القشرة الكمثرية** Piriform و**ما قبل الكمثرية** Prepiriform (القشرة الشمية الأولية) [50] **دون المرور أولاً بالمهاد.**

3. الإدراك:

من **القشرة الشمية الأولية**، تتوجه عدة ألياف إلى تحت المهاد، والمهاد، واللوزة، والحصين، و**القشرة الحجاجية الجبهية** Orbitofrontal Cortex [38].

تؤدي الألياف التي تنبعث إلى **الجهاز الطرفي** limbic system (**الحصين** و**اللوزة** بشكل خاص) إلى ردود فعل عاطفية وتحفز تكوين الذكريات.

تقوم بعض الروائح مثل روائح الدخان أو الغاز أو الظربان بتحفيز الجهاز العصبي الودي. كما تحفز الروائح الفاتحة للشهية إفراز اللعاب، بينما تسبب الروائح الكريهة ردود فعل دفاعية مثل العطس أو الاختناق أو القيء.

اللسان عضو عضلي غشائي يتكون من 17 عضلة [116] قوية جداً يعصبها **العصب تحت اللسان** Hypoglossal nerve [107]. يؤدي اللسان دوراً أساسياً في اللغة وفي التغذية؛ كما يلعب دور المستقبل الحسي الرئيسي لحاسة كيميائية [36]: التذوق [38، 72].

1. الاستقبال:

توجد على المخاطية اللسانية العديد من البروزات التي تسمى (**الحليمات اللسانية** lingual papillae) [99]. نميز منها: الحليمات **الكأسية** Circumvallate [4، 72]، **والفطرية** Fungiform [41]، **والخيطية** Filiform [72]. تعد الحليمات الكأسية والفطرية هي البنيات المسؤولة عن التذوق [99].

على عكس المستقبلات الشمية البدائية التي تتكون من نهايات حرة للخلايا الحسية العصبية، فإن تحويل إشارة التذوق يتم على مستوى مستقبلات متخصصة: (**براعم التذوق** Taste Buds) [41]. تقع هذه البراعم على مستوى مخاطية الحليمات الكأسية والفطرية [99]، وهي مكونة من خلايا داعمة (**خلايا قاعدية** Basal Cells) تحيط بالخلايا المستقبلة المرتبة بشكل مركزي.

يحتوي كل برعم على ما بين 50 إلى 150 خلية مستقبلة [38]. تضم كل خلية مستقبلة قطباً قمياً مهدباً مكلفاً بالتقاط المواد الكيميائية، وقطباً قاعدياً متصلاً بالعصبون الحسي.

نميز أربعة مذاقات أساسية: الحلو، والمر، والحامض، والمالح [1]. وهناك مذاقات أخرى تضاف إلى هذه القائمة: المذاق القابض (مثل العنب البري، والشاي، والعفص)، والمذاق اللاذع (مثل الفلفل الحار، والزنجبيل)، والمذاقات المعدنية (كبريتات الحديدوز المائية)، والمذاق الدهني، ومذاق النشا...

يجب أن تكون المواد الكيميائية قابلة للذوبان في اللعاب حتى تتمكن خلايا التذوق من اكتشافها.

من الشائع أن هناك مناطق محددة على مستوى اللسان لكل مذاق، هذا ليس صحيحاً؛ في الواقع، يمكن استشعار هذه المذاقات المختلفة في كامل سطح اللسان [41].

بمجرد ارتباطها بغشاء الخلية، تقوم المواد الكيميائية بتنشيط سلسلة من التفاعلات الكيميائية الحيوية التي تنتهي بإزالة استقطاب الخلية المستقبلة [41].

2. الإرسال:

بمجرد إزالة استقطابها، تفرز خلية التذوق ناقلات عصبية تؤثر على العصبون الحسي المرتبط بها وتطلق جهد فعل ينتشر على طول الليف العصبي حتى يصل إلى **جذع الدماغ** [5].

تُعصَّب براعم التذوق في الثلثين الأماميين للسان بالعصب الوجهي Facial Nerve[3]. ورغم أن **العصب ثلاثي التوائم** يعصب هذا الجزء أيضاً عبر فرعه اللساني، إلا أن عمله يقتصر على الحساسية الشعورية (Somesthesia). أما العصب **اللساني البلعومي** Glossopharyngeal Nerve، فيؤمن التذوق والحساسية الشعورية للثلث الخلفي للسان [3].

تقع أجسام الخلايا للألياف التابعة لهذين العصبين في **العقدة الركبية** Geniculate Ganglion (VII) **والعقدة الصخرية العلوية** Petrosal Ganglion (IX). تدخل الألياف ما بعد العقدية إلى جذع الدماغ وتنتهي في النوى المقابلة حيث تشكل محطات إرسال مع عصبونات أخرى ستلتحق بالأجزاء **البطنية والخلفية للمهاد**.

عند هذا المستوى، تشكل هذه العصبونات محطات إرسال مع ألياف تتبع **المحفظة الداخلية**Internal capsule لتنتهي في **القشرة الذوقية الأولية** [5] على مستوى الفص الجداري بالقرب من **التلفيف ما بعد المركزي**.

3. الإدراك:

من القشرة الذوقية الأولية، تنطلق ألياف تسقط على **القشرة الذوقية الثانوية** [5] على مستوى **الفص الصدغي**، وأيضاً على تحت المهاد، واللوزة، والجزيرة Insula، مما يعطي مكوناً عاطفياً للمذاق.

أخيراً، تجدر الإشارة إلى أن الألياف العصبية الخاصة بالتذوق **لا تقطع الخط الأوسط**، مما يجعل القشرة الذوقية الأولية اليسرى تستقبل وتحلل المعلومات الذوقية القادمة من الجزء الأيسر للسان والعكس صحيح [38].

الأنظمة الحركية

الأنظمة الحركية - نظرة عامة 94
النظام الهرمي 95
النظام خارج الهرمي 97
دور المخيخ 99
الجهاز العصبي اللاإرادي 101
ردود الأفعال 103

في حين أن الأنظمة الحسية تمدنا بمعلومات حول جسدنا وعن البيئة المحيطة، فإن الأنظمة الحركية تسمح لنا بالتفاعل مع هذه البيئة والتأثير فيها. كل حركة، مهما كانت بسيطة، يتم إنجازها بفضل آليات غالباً ما تكون معقدة للغاية [130].

في كل لحظة، تقوم الأنظمة التي سنتطرق إليها: **النظام الهرمي**، **النظام خارج الهرمي**، **المخيخ**، بتنسيق جهودها لضمان حركة سلسة وسليمة [3].

يقع **النظام الهرمي** Pyramidal system في قلب الأفعال الإرادية، بينما يتكون **النظام خارج الهرمي** Extrapyramidal system من دوائر وحزم تسمح **بأتمتة** Automation الحركات، في حين يضمن **المخيخ** تنسيقها وتصحيحها المحتمل.

الجهاز العصبي الذاتي Autonomic Nervous System (ANS)، كما يوحي اسمه، لا يخضع للتحكم الإرادي. فهو يتولى، من خلال شقيه **الودي** Sympathetic و**نظير الودي** Parasympathetic، مسؤولية التحكم في مختلف الأعضاء الداخلية بهدف تكييف عملها مع مختلف الحالات التي قد يتعرض لها الجسم.

تُعد **المنعكسات** اختصارات حركية تفلت هي الأخرى من سيطرة الإرادة. تسمح لنا بتجنب تهديد ما حتى قبل التعرف عليه، وهو أمر عملي للغاية وغالباً ما يكون حرجا.

يعتبر الجهاز العصبي الذاتي والمنعكسات حالات خاصة نوعاً ما، نظراً لأنها تتطلب وجود مكونات حسية وحركية في آن واحد.

تمر أي حركة إرادية [5]، مهما كانت طبيعتها، عبر عدة مراحل والعديد من الدوائر العصبية قبل تنفيذها [3، 130]. يعد جمع المعلومات الحسية أمراً مهماً قبل وأثناء وحتى بعد إنجاز الحركة [39]. نحن بحاجة مستمرة إلى تقييم آني للحركات التي نقوم بها لنتمكن من تصحيحها طوال فترة تنفيذها [75]، لهذا السبب تقع القشرة الحركية الأولية مباشرة أمام القشرة الحسية الشعورية الأولية. علاوة على ذلك، تربط ألياف عديدة بين عصبونات هاتين المنطقتين [75].

1. الباحات القشرية:

يتم تخطيط الحركة الإرادية بجزء كبير منه على مستوى القشرة **أمام الجبهية** Prefrontal Cortex (الباحة 8) [39]. وتجري برمجة الحركة على مستوى القشرة **أمام الحركية** Premotor Cortex (الباحة 6) [32]، وتضم هذه الأخيرة منطقتين متمايزتين: **الباحة الحركية الإضافية** Supplementary Motor Area [38] **والباحة أمام الحركية** Premotor Area [74، 75].

يتم تأمين تنفيذ الحركات بواسطة **القشرة الحركية الأولية** Primary Motor Cortex (الباحة 4) [4، 39] التي تشغل كامل التلفيف أمام المركزي. وتتميز هذه القشرة، على غرار نظيرتها الحسية الشعورية، بتوزع جسدي (Somatotopic) لمختلف أجزاء الجسم. هذا التوزع غير متناسب؛ حيث تكون المناطق التي تكون عضلاتها مسؤولة عن الحركات الدقيقة ممثلة بشكل أكبر على القشرة مقارنة بالمناطق الأخرى. يتم تمثيل هذا التخطيط بواسطة " **قَزَم بنفيلد**" (Homunculus) [4، 41] الذي يمتلك يدين ووجهاً أكبر حجماً مقارنة بباقي الجسم.

حتى هذه المرحلة، هناك حلقات تحكُّم وتقييم تتدخل فيها **بنيات تحت قشرية أخرى** (النوى الرمادية المركزية بشكل خاص) لضمان حركة جيدة [5].

2. المسار الهرمي:

تشكل الألياف الصادرة عن القشرة الحركية الأولية ما يسمى **بالسبيل الهرمي**. سُمي بهذا الاسم لأن العصبونات التي تشكله تمتلك جسماً خلوياً هرمي الشكل على مستوى القشرة المخية (الطبقة 5) [157]. ثمة تفسير آخر معقول أيضاً وهو أن المسار الرئيسي للسبيل الهرمي **(الحزمة القشرية الشوكية)** يشكل الهرمين على **مستوى البصلة السيسائية** [32]، وهذا التعريف يستثني **الحزمة القشرية النووية**.

يعد السبيل الهرمي [179] المسلك الرئيسي للحركية الإرادية [130، 227]. تجدر الإشارة إلى أن هذا السبيل يضم أيضاً أليافاً قادمة من الباحات أمام الحركية ومن القشرة الحسية الشعورية والترابطية [31]. في الواقع، 40% فقط من ألياف السبيل الهرمي تصدر عن القشرة الحركية الأولية [3]!

يتكون السبيل الهرمي من حزمتين: **القشرية الشوكية** Corticospinal **والركبية** Geniculate **(تسمى أيضاً القشرية النووية** Corticonuclear **أو القشرية** البصلية Corticobulbar**)**.

2 .1. المسار القشري الشوكي:

يمتد **السبيل القشري الشوكي** corticospinal tract [39] انطلاقاً من القشرة، ويعبر **الإكليل المتشعع** Corona Radiata (المادة البيضاء على مستوى نصفي الكرة المخية) ثم **المحفظة الداخلية** Internal Capsule على مستوى **ذراعها الخلفي** Posterior Limb [4]، ثم الجزء الأوسط من **السويقة المخية** والجسر **(الحدبة الحلقية** Pons**)**.

على مستوى **البصلة السيسائية**، تشكل الحزمة القشرية الشوكية **الهرمين البصليين** Medullary Pyramids. عند الحد السفلي للبصلة **(التصالب الهرمي** pyramidal Decussation**)**، تقوم 80% [44، 57، 75] من ألياف هذا السبيل بقطع الخط الناصف لتشكل **السبيل القشري الشوكي الجانبي** Lateral Corticospinal Tract [5]. ينزل هذا الأخير على طول **الحبل الجانبي** Lateral Column للنخاع [38]. أما بقية الألياف فتشكل **الحزمة القشرية الشوكية الأمامية** Anterior Corticospinal Tract [5].

على مستوى **القرن البطني** Ventral Horn للنخاع، ترتبط ألياف السبيل القشري الشوكي الجانبي إما بعصبونات بينية، أو مباشرة بعصبونات حركية خاصة بعضلات الحركات الدقيقة [39].

تكمل ألياف الحزمة القشرية الشوكية الأمامية طريقها مباشرة في العمود البطني للنخاع الشوكي. وتقطع الخط الناصف عند كل قطعة **(شدفة)** على مستوى **الصوار الأمامي** Anterior Commissure لترتبط بالعصبونات البينية الموافقة الموجودة في **القرون الأمامية** للنخاع. تؤمن هذه الألياف تعصيباً للجانب المقابل للعضلات المحورية [41].

وبالتالي تضمن هاتان الحزمتان (الأمامية والجانبية) تحكماً في حركية الجسم بالجانب المقابل.

2 .2. المسار القشري النووي:

تنطلق **الحزمة الركبية** [31، 157] أيضاً من القشرة. تعبر **المحفظة الداخلية** على مستوى **ركبتها** (ومن هنا جاء اسمها)، ثم تعطي أليافاً مختلفة لمختلف نوى **الأعصاب القحفية** على مستوى جذع الدماغ. من هناك، قد تقطع الألياف الخط الناصف أو لا تقطعه وذلك حسب العضلات المستهدفة.

"...على الرغم من الدرجة الكبيرة من الضعف الحركي والعجز، ففي حالة خالصة [من التحلل الكبدي العدسي] تبقى المنعكسات البطنية محفوظة ويتم الحصول على استجابة باسطة مزدوجة... بعبارة أخرى، تعد هذه الإصابة، عندما تحدث في شكل غير مختلط، مرضاً حركياً خارج هرمي..." **كينير ويلسون**، Kinnier Wilson 1912.

إلى جانب السبيل الهرمي، نجد العديد من السبل والدوائر التي تتدخل في الحركية **اللاإرادية** (لاسيما الوضعية والتوازن)، وفي **أتمتة** Automation **الإيماءات** و**تنسيق** الحركات.

تعد هذه السبل معقدة للغاية لأنها تُشرك عدة مكونات من الجهاز العصبي: القشرة المخية، والمخيخ، والنوى الرمادية المركزية، وجذع الدماغ، والنخاع الشوكي. وبالتالي فهي تضم الكثير من المرحلات العصبية التي يصعب دراستها للغاية.

1. تعريف:

يطرح المصطلح "**خارج هرمي**" Extrapyramidal مشكلة ذات طابع اصطلاحي. في الواقع، يجب التمييز بين استخدامين للمصطلح: **النظام خارج الهرمي** الذي يشير غالباً إلى النظام الحركي الذي تحكمه العقد القاعدية (Basal Ganglia) [79]، و**السبل خارج الهرمية** التي تضم السبل الحركية التي تنزل في النخاع الشوكي بشكل مستقل عن السبيل الهرمي.

2. النظام خارج الهرمي:

تم تقديم مفهوم النظام خارج الهرمي [75] في عام 1912 بواسطة **كينير ويلسون** Kinnier Wilson [158]. وقد اعتقد هذا الأخير بوجود كيان قائم بذاته ينظم الحركية إلى جانب السبيل الهرمي.

تبين لاحقاً أن هذا النظام معقد لدرجة أن المفهوم (خارج الهرمي) بحد ذاته بدأ يفقد القليل من أهميته في مجال الفيزيولوجيا العصبية [4] لصالح مفهوم نظام **العقد القاعدية** [158]، لكنه يحتفظ بأهميته في مجال الأمراض العصبية [91]. في الواقع، تؤدي إصابة كل نواة تتدخل في هذا النظام إلى ظهور شذوذات حركية خاصة [41].

يشمل النظام خارج الهرمي **العقد القاعدية** Basal Ganglia [38، 39، 78، 79]. يتعلق الأمر بنظام للتحكم في الحركات الإرادية. عندما تبدأ حركة ما بواسطة النظام الهرمي، تنطلق فروع جانبية نحو العقد القاعدية لإعلام النظام خارج الهرمي بطبيعة الحركة المراد إنجازها [41].

سيقوم هذا النظام بتحليل الحركة المستهدفة وتوفير **سيناريو عصبي** (سلسلة من التنبيهات والتثبيطات للعصبونات الهرمية في القشرة الحركية الأولية) بهدف إنجاز الحركة بالطريقة الأكثر ملاءمة وسلاسة.

لا يملك النظام خارج الهرمي أي امتداد حركي مباشر نحو النخاع الشوكي. إنه نظام يضم عدداً كبيراً من الدوائر التي تستعين بأنواع متعددة من التلقيم الراجع Feedback لكي تعمل، لكن نتيجة هذا التحليل تنتهي دائماً في القشرة الحركية الأولية للأمر بالحركة [41].

3. المسارات خارج الهرمية:

تضم السبل خارج الهرمية أربع حزم رئيسية:

- **الحزمة الحمراوية الشوكية** Rubrospinal Tract [38، 41]، التي تنطلق من **النواة الحمراء** وتتبع مساراً موازياً للحزمة القشرية الشوكية الجانبية. تتدخل هذه الحزمة في حركية وتنسيق العضلات الكبيرة القاصية للأطراف السفلية والعلوية. ترتبط النواة الحمراء بالنظام المخيخي ولا تتلقى أي واردات من نظام العقد القاعدية [31].
- **الحزمة الدهليزية الشوكية** Vestibulospinal Tract [3] وتشارك في التحكم في التوازن.
- **الحزمة الشبكية الشوكية** Reticulospinal Tract [41] وتلعب دوراً في المقوية العضلية، والمشي، والتعديلات الوضعية التلقائية.
- **الحزمة الأكيمية الشوكية** Colliculospinal Tract (أو **السقفية الشوكية** Tectospinal Tract) [38] وتصل سقف **الدماغ المتوسط** بالنخاع الشوكي. وهي تتحكم في حركات الرأس استجابة للمنبهات البصرية والسمعية.

يلعب المخيخ (أو الدماغ الصغير) دوراً مهماً للغاية في حياتنا. فهو يحتوي لوحده على أكثر من نصف عصبونات الدماغ [54] مع أكثر من 50 مليار عصبون [159]!

1. وظائف المخيخ:

يلعب المخيخ دوراً جوهرياً في الحركية الإرادية، في الوضعية، في الحفاظ على التوازن، **في تنسيق الحركات المعقدة**، في تعلمها، والعديد من الأدوار الأخرى التي تم اكتشافها مؤخراً لاسيما الأدوار **الإنباتية** (ضغط الدم، وضربات القلب، والتنفس، وحركة الحدقة لضمان استقرار البيئة الداخلية للجسم...) **والمعرفية-العاطفية** [36، 41].

مهما كانت بساطة الحركات المراد إنجازها، فإن المخيخ حاضر دائماً للتحكم فيها وتنسيقها. بدون المخيخ، سيكون من المستحيل بالنسبة لنا المشي، أو حتى الوقوف. وسيكون من المستحيل علينا القيام بأبسط إيماءات الحياة التي تتطلب درجة معينة من الدقة، وبدون المخيخ سنكون عاجزين عن تعلم أي وظيفة حركية مهما بلغت درجة تعقيدها.

2. القشرة المخيخية:

تختلف القشرة المخيخية عن نظيرتها المخية، فبينما تتكون هذه الأخيرة من طبقات خلوية مختلفة يتباين عددها حسب المناطق القشرية ليصل إلى 6 محددة بذلك باحات برودمان، تحتوي القشرة المخيخية في كل مكان على ثلاث طبقات خلوية فقط [75]، وبالتالي لا توجد باحات برودمان على مستوى المخيخ.

إذا قمنا بفرد القشرة المخيخية، يتبين أن مساحتها تمثل حوالي 75% من مساحة القشرة المخية [4].

3. خلايا بوركينجي:

من بين الـ 50 مليار خلية مخيخية، تقوم خلايا **بوركينجي** Purkinje فقط (والتي يبلغ عددها حوالي 15 مليوناً [3]) بالإسقاط إلى خارج المخيخ [32] (أي 0.03% من جميع العصبونات المخيخية).

يمكن لكل خلية بركنجي أن تمتلك ما يصل إلى 300,000 مشبك مع عصبونات أخرى [57]، وهذا مؤشر على درجة الدمج العصبي الذي يحدث في المخيخ [82].

يُظهر المرضى المصابون بمرض مخيخي أعراضاً سريرية مشابهة لأعراض الشخص المخمور. للإشارة، يعتبر الكحول ساماً جداً لخلايا بوركينجي التي تعد أثمن خلايا المخيخ.

4. المسارات المخيخية:

لضمان وظائفه المتنوعة، يجب أن يتلقى المخيخ معلومات وإشارات ذات طبيعة متنوعة من جميع أجزاء الجهاز العصبي المركزي تقريباً. يتلقى معلومات الحس العميق (Proprioceptive) مباشرة من النخاع الشوكي وإشارات ذات منشأ بصري ودهليزي لضمان توازن الجسم. كما يتلقى حزماً من معظم النوى الرمادية المركزية وكذلك من نوى جذع الدماغ.

يتلقى المخيخ أيضا عبر الجسر مرحلات جانبية قادمة من ألياف السبيل الهرمي [41]، مما يسمح له بأن يكون على دراية مستمرة بالحركات المراد إنجازها ومراقبة تنفيذها تدريجياً عبر مجموعة من التلقيمات الراجعة الحسية، لاسيما البصرية والخاصة بالحس العميق.

بالتالي يمتلك المخيخ كافة المعلومات المتعلقة بظروف إنجاز الحركة. وبذلك، يضمن التحكم في هذه الحركات عبر مرحلات لحلقات تحكم تنتهي في القشرة الحركية الأولية بالجانب المقابل لتلتحق بالسبيل الهرمي [41]. ونظراً لأن هذا السبيل يقطع أيضاً الخط الناصف، يتبين إذن أن لنصفي الكرة المخيخية تحكماً في الحركية **بنفس الجانب** [5].

إلى جانب الجهاز العصبي الجسدي Somatic Nervous System [160] الذي يؤثر على علاقتنا مع العالم الخارجي والذي نعي به بجزء كبير، يوجد نظام آخر لا إرادي تماماً يضمن العمل الداخلي لمختلف أعضاء الجسم. إنه الجهاز العصبي الذاتي Autonomic Nervous System (ANS) [3، 4، 42، 50، 104، 107، 160] المسمى أيضاً **بالجهاز العصبي الإنباتي** Vegetative Nervous System.

ينظم هذا الجهاز عمل القلب، والرئتين، والغدد، والجهاز الهضمي، والأوعية الدموية [133] ... باختصار، الكثير من الأعضاء التي لا نملك سيطرة إرادية عليها.

ينقسم الجهاز العصبي الذاتي إلى نظامين كبيرين لهما تأثيرات غالباً ما تكون متضادة [3، 52، 133] على أهدافهما المختلفة: **الجهاز العصبي الودي** (Sympathetic) **والجهاز العصبي نظير الودي** (Parasympathetic).

1. الجهاز العصبي الودي:

تقع نوى العصبونات الأولى للجهاز العصبي الودي [3] على مستوى **القرن الجانبي** للمادة الرمادية النخاعية [44]. وهي تعطي أليافاً قبل عقدية تنتهي إما في عقدة من **السلسلة الودية** أو في **عقدة محيطية** [160]. من هذه العقد تنطلق ألياف أخرى تسمى **بعد عقدية** تلتحق بالأعضاء المستهدفة [3، 4].

كما هو الحال في الجهاز نظير الودي [133]، تكون العصبونات قبل العقدية **كولينية** (ناقلها العصبي هو الأستيل كولين) [133]. في حين أن العصبونات بعد العقدية غالباً ما تكون **نورأدرينالية** [71] (تفرز النورأدرينالين) أو **أدرينالية** (تفرز الأدرينالين)، هذان الجزيئان يعدان جزءاً من **الكاتيكولامينات** [52].

يلعب الجهاز العصبي الودي دوراً جوهرياً في حالات الإجهاد والتهديد، حيث يُطلب مجهود بدني، وحيث نكون بحاجة إلى الانتباه والطاقة [82].

وهكذا، يقوم هذا الجهاز بتوسيع الحدقات، وتوسيع القصيبات الرئوية وزيادة التردد التنفسي، كما يزيد من التردد والنتاج القلبي، يرفع ضغط الدم ويحفز إفراز الأدرينالين (هرمون الإجهاد) من قبل **لب الكظر** Adrenal Medulla [133]. ويثبط الهضم، يوجه الدم نحو العضلات، يحفز تحرير الجلوكوز من الكبد إلى الدم ويثبط طرح البول من المثانة.

توجد عدة أنواع من المستقبلات الكاتيكولامينية [136] التي نميزها بناءً على استجابتها التفضيلية لكاتيكولامين أو لآخر. لدينا إذن مستقبلات ألفا 1، وألفا 2، وبيتا 1، وبيتا 2، وبيتا 3.

2. الجهاز العصبي نظير الودي:

ينشأ الجهاز العصبي **نظير الودي** [3] من **الأعصاب القحفية**: III (المحرك للعين)، و VII (العصب الوجهي)، و IX (اللساني البلعومي)، و X (العصب المبهم) [38]. يشكل هذا الأخير المسلك الرئيسي للجهاز نظير الودي، بالإضافة إلى الفروع الأمامية للأعصاب العجزية Sacral Nerves الأربعة الأخيرة.

يكون العصبونان قبل وبعد العقديين للجهاز نظير الودي **كولينيين** [107]. يحفز الأستيل كولين مستقبلات **نيكوتينية** Nicotinic Receptors على مستوى العقد الذاتية ومستقبلات **مسكارينية** Muscarinic Receptors على مستوى الأنسجة المستهدفة [3].

يتدخل الجهاز العصبي نظير الودي في حالات الهدوء، والراحة [82]، والحفاظ على الطاقة [136]. ويعاكس فعله الجهاز الودي تقريباً نقطة بنقطة [3، 52، 133].

وهكذا، تكون التأثيرات العامة للتنبيه نظير الودي هي: تباطؤ القلب (العصب المبهم مسؤول عن **التوعك المبهمي** Vasovagal Syncope)، زيادة التمعج Peristalsis المعوي، زيادة المفرزات المعدية، واللعابية، والمعوية، ارتخاء معظم مصرات Sphincters السبيل الهضمي، تقبض الحدقة (تقلص القزحية) ...

يُقصد بالمنعكس Reflex [4] كل سلوك للكائن الحي يحدث كرد فعل على منبه خاص **دون تدخل الوعي**. في أغلب الأحيان، يكون هذا السلوك التفاعلي ذو طبيعة حركية (عضلية)، لكنه قد يكون أيضاً من طبيعة مختلفة: غدية على سبيل المثال.

1. أدوار المنعكسات

تعتبر المنعكسات سلوكيات أساسية للكائن الحي نظراً لأنها في معظم الحالات **سريعة** للغاية ونمطية.

فهي تسمح لنا بالتكيف مع مختلف المواقف، لاسيما تلك التي تكون فيها **السلامة الجسدية** للكائن الحي مهددة. وهذا هو الحال خاصة عندما نسحب اليد فوراً وبشكل لا إرادي قبل حتى أن ندرك أنها مهددة بالإحتراق [82].

2. طبيعة ردود الفعل:

قد تكون المنعكسات **فطرية** أو **مكتسبة** عبر تجارب الحياة المختلفة [1].

المنعكسات التي نمتلكها عديدة ومتنوعة جداً، لكنها تخضع لنفس المبدأ: **قلة المرحلات المشبكية**، مما يضمن سرعة رد الفعل.

يتطلب المنعكس مستقبلاً حسياً يلتقط الإشارة، وليفاً وارداً ينقل الإشارة نحو الجهاز العصبي المركزي (غالباً النخاع الشوكي أو جذع الدماغ). من هناك، تنشأ سيالة حركية تسير على طول عصبون حركي لتحفيز عضو منفذ (غالباً عضلة) يقوم برد الفعل. تسمى هذه السلسلة من الأحداث: **القوس الانعكاسية** Reflex Arc [1، 54].

3. قوس الانعكاس:

لا يوجد تحكم إرادي في القوس الانعكاسية. مع ذلك، توجد أحياناً ألياف تصعد حتى القشرة المخية لتطلعنا على ما تم إنجازه.

عندما يقرع الطبيب **الرباط الرضفي** Patellar Ligament [57] (أثناء فحص بدني)، يسبب هذا القرع تطاولاً مفاجئا في العضلة **مربعة الرؤوس** Quadriceps Muscle. تتمدد **المغازل العصبية العضلية** Neuromuscular Spindles [3، 38، 109] الموجودة فيها وترسل إشارة نحو النخاع بواسطة الألياف العصبية الخاصة بالحس العميق (من النوع A alpha الأكبر سمكا).

تنتهي هذه الألياف عند مستوى **القرن الأمامي** للنخاع الشوكي [1] على التغصنات الشجرية للعصبونات الحركية التي تسبب **تقلص العضلة** مربعة الرؤوس.

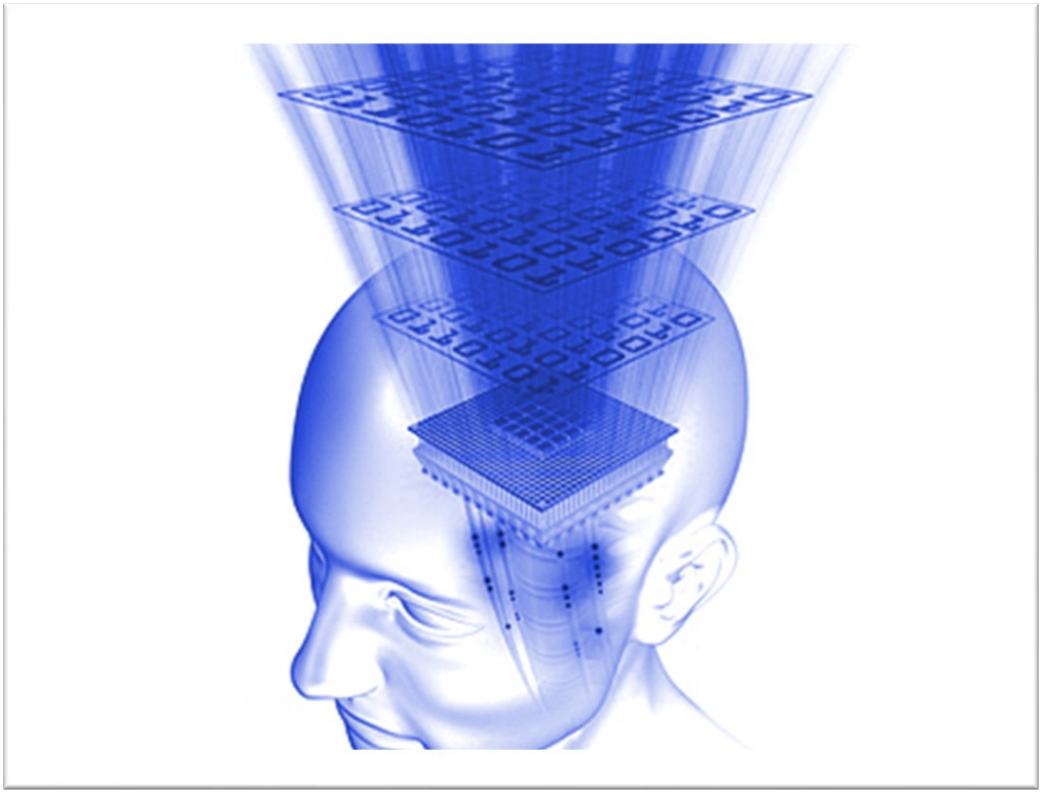
تقوم ألياف الحس العميق أيضاً بتنشيط عصبونات بينية تعمل على تثبيط العصبونات الحركية للعضلة المناهضة (Antagoniste) [130، 133]. نشهد حينها رد فعل يتمثل في بسط الركبة.

4. ردود الفعل في الطب:

يتم استغلال المنعكسات بشكل كبير في الممارسة السريرية، فهي تخبرنا غالباً عن طبيعة وموقع الإصابة العصبية.

فمثلا، إذا كان المنعكس الرضفي (Patellar Reflex) معدوماً، نعلم إذن أن الأمر يتعلق بخلل محيطي. أما إذا كان مفرطاً وحاداً، نستنتج حينها أن الأمر يتعلق باختفاء التحكم المركزي في القوس الانعكاسية، وبالتالي تكون الإصابة مركزية [67].

الوظائف العليا



الوظائف العليا - نظرة عامة..... 106
الذاكرة والتعلم..... 107
الوعي 111
النوم..... 114
اللغة..... 119
الجهاز الحوفي..... 122

إلى جانب الوظائف الواردة (الحسية) والصادرة (الحركية) التي درسناها أعلاه، فإن الجهاز العصبي المركزي (والدماغ بشكل خاص) مسؤول عن إعداد وظائف عالية التعقيد وأكثر صعوبة في الدراسة تسمى عموماً: الوظائف العليا [42].

تضم هذه الوظائف عمليات واعية ومعقدة للغاية مثل الذاكرة والتعلم، واللغة، والوعي، والحكم، ووظائف أخرى للعقل.

في هذا الفصل، سنناقش **الوعي**، ماهيته، ومن أين ينشأ.

الحديث عن الوعي يقودنا تلقائياً إلى وصف **النوم**، لماذا ننام؟ وماذا يفعل الدماغ في حالة **اليقظة**؟

سنتطرق إلى **الكلام والتواصل اللغوي**، إحدى أكثر الوظائف روعة لدى الجنس البشري، لولا هذه الملكة لما كان بالإمكان نقل المعرفة من جيل إلى جيل، وبالتالي لما كان من الممكن تحقيق أي تقدم.

سنناقش أيضاً **الذاكرة والتعلم**، وهما وظيفتان مرتبطتان تماماً، مترابطتان، وحيويتان.

سنتطرق أيضاً إلى **الجهاز الحوفي** ودوره في وظائف متطورة مثل الذاكرة، والعواطف، والوظائف التنفيذية [161، 162].

تلعب الذاكرة دوراً جوهريا في حياتنا [3]. بدون ذاكرة لن يكون للحياة أي معنى. الذاكرة هي وسيلة التموضع في الزمن، إنها النسيج الذي يشكل تاريخ كل فرد.

1. تعريفات:

تُعرَّف الذاكرة بأنها القدرة على التقاط، وترميز، وحفظ، واستعادة المعلومات [4].

غالباً ما يتم الخلط بين **الذاكرة** Memory و**التعلم** Learning. ورغم أن هاتين العمليتين مرتبطتان غالباً، فمن المفيد التذكير بأن التعلم [1] لا ينطبق بشكل أساسي إلا على مرحلة اكتساب وتخزين الذكريات.

يتضمن **الاستدعاء** (Recall) استعادة نشطة للمعلومة، في حين أن **التَّعرُّف** (Recognition) يتطلب فقط تقرير ما إذا كان شيء ما من بين أشياء أخرى قد تمت مصادفته مسبقاً [119].

2. تصنيفات:

مفهوم الذاكرة، الشائع جداً، هو في الواقع أكثر تعقيداً مما يبدو عليه. تقنيا، نميز عدة أنواع من الذاكرة [38، 135]:

2 .1. حسب الزمن:

أ) الذاكرة الحسية:

هذه الذاكرة Sensory memory [145] ذات مدة قصيرة للغاية، وهي ليست سوى إدراكنا للأشياء وللأحداث. إنها الصدى والرنين الداخلي للمعلومات الحسية التي تستمر لبضعة أجزاء من الثانية في وعينا.

ب) الذاكرة قصيرة المدى:

وتسمى Short-term memory [161] أيضاً (ذاكرة العمل Working Memory [163])، وتشكل مستوى من الترشيح الانتقائي للمعلومات Selective Filtering التي تجمعها حواسنا لمدة تصل إلى دقيقة تقريبا [164]. تسمح لنا بالاحتفاظ ببعض العناصر، في المتوسط 7 بيانات: رقم هاتف على سبيل المثال [42]، وهي بيانات نعمل بها (ومن هنا جاء اسمها). ويمكن لهذه البيانات، حسب أهميتها، أن تنتقل أو لا إلى مستوى آخر للتخزين الطويل الأمد.

ت) الذاكرة طويلة المدى:

تضمن الذاكرة الطويلة المدى Long-term memory [165] حفظ الذكريات لمدة طويلة، أشهر، أو سنوات، أو حتى مدى الحياة.

2 .2. حسب نوع المعلومات المخزنة:

حسب نوع البيانات المراد حفظها [39]، قد يتعلق الأمر بـ:

أ) ذاكرة صريحة:

تسمى Explicit Memory [165] أيضاً **الذاكرة التقريرية** (Declarative Memory) [167]، تتعلق بالبيانات التي يمكننا التعبير عنها بالكلمات. ونميز منها:

- الذاكرة **الدلالية** (Semantic Memory) [164] التي تتعلق بحفظ الأشياء والأمور المحددة بدقة.
- الذاكرة **العرضية** (Episodic Memory) [145] التي تتعلق بأحداث محددة الموقع جيداً في الزمن.

ب) الذاكرة الضمنية :

تسمى (Implicit Memory) [166] أيضاً **الذاكرة الإجرائية** (Procedural Memory) [165]، وهي ذاكرة حركية بالأساس تتعلق بالمهارات. تتكون من أتمتة حسية-حركية مدمجة بشكل جيد لدرجة أننا لا نعي بها. على سبيل المثال، بالنسبة لشخص يعرف كيفية إجراء خياطة الجروح، سيجد صعوبة في شرح الطريقة باستخدام الكلمات فقط. جزء كبير من تكييفنا العاطفي ومن منعكساتنا الشرطية يشكل أيضاً جزءاً من الذاكرة الضمنية.

3. كفاءة الذاكرة:

3 .1. طبيعة الذاكرة:

ذاكرتنا **ترابطية** (Associative) [119]، هذا يعني أنها تكون أكثر فعالية كلما قمنا بربط البيانات المراد حفظها بعناصر مسجلة مسبقاً في أذهاننا؛ فشيء ما يذكرنا بآخر، والذي يذكرنا بغيره، وهكذا دواليك.

الذاكرة هي ثمرة إعادة بناء لعناصر مختلفة. نحن لا نسجل مشاهد كاملة في أدمغتنا. علاوة على ذلك، لا توجد أي ذكرى مطابقة تماماً لأصلها مثل الصورة الفوتوغرافية، ذلك سيشكل الكثير من المعلومات للحفظ وجماجمنا غير قابلة للتمدد للأسف.

ذاكرتنا لا تحتفظ إلا ببعض قطع الأحجية، بعض فتات الخبز التي ستساعدنا لاحقاً على إعادة بناء واستعادة الذكريات انطلاقاً من عناصر مفتاحية مختلفة.

3 .2. العوامل المؤثرة في الذاكرة:

تؤثر عدة عوامل في كفاءة الذاكرة [168]:

- درجة **اليقظة**، والصحو، والانتباه، والتركيز في لحظة الحفظ.

- **الاهتمام**، والدافع، والحاجة، أو ضرورة العناصر المراد تذكرها.
- **التكرار**.
- المكان، والإضاءة، والرائحة، والضوضاء... باختصار، يتم تسجيل كل **السياق** الموجود أثناء الحفظ مع البيانات المراد حفظها.
- **جهد الحفظ**، ومن هنا جاء التعبير (ذاكرة العمل). إن تشغيل الذاكرة يعني إعطاء معنى للعناصر المراد حفظها وإجراء روابط منطقية مع ما اكتسبناه مسبقاً. كلما كانت الذكرى مرمزة، ومعدة، ومنظمة، ومهيكلة، كان استرجاعها أسهل.

4. آليات الذاكرة:

تلعب عدة بنيات عصبية دوراً جوهرياً في الذاكرة:

يلعب **الحصين** (Hippocampus) [54] دوراً مفتاحياً في الذاكرة العرضية. فهو يسمح بجمع البيانات باستمرار من مختلف الباحات الحسية (البصرية، والسمعية، والحسية الجسدية...)، واختيار أكثرها تأثيراً، وربطها في حلقة واحدة من الأحداث بدلاً من أن تظل مجموعة من الذكريات المنفصلة، وإعادة توزيعها على الباحات المناسبة.

فمثلا كدليل على ذلك، ليس بإمكان الأشخاص الذين خضعوا لاستئصال كلا الحصينين تسجيل ذكريات جديدة في ذاكرتهم طويلة المدى [167]، لكنهم يحتفظون بقدرتهم على تذكر المعطيات القديمة التي سبقت التدخل الجراحي.

تضم بعض الذكريات الشخصية الشديدة جداً ما يسمى **بالذاكرة العاطفية** (Emotional Memory) [169]. وتستلزم هذه الأخيرة، بالإضافة إلى الحصين، بنية أخرى من **الجهاز الحوفي**: **اللوزة** (Amygdala) [39]، وهي منطقة معروفة بإدارة ردود أفعال الخوف لدينا. تساهم عدة بنيات أخرى من الجهاز الحوفي في ترميز ذكرياتنا بشكل دائم.

يتبع مسار معلومة مراد حفظها على المدى الطويل **دائرة بابيز** (Papez Circuit) [38، 50]، وتربط هذه الدائرة بين **الحصين**، **والقبو** (Fornix)، **والأجسام الحلمية** (Mammillary Bodies)، **والمهاد الأمامي**، **والتلفيف الحزامي** (Cingulate Gyrus).

لا تستدعي الذاكرة الإجرائية الحصين على الإطلاق. بل ترتبط بتعديلات في المخيخ [1]، والعقد القاعدية، والقشرة الحركية.

تلعب **القشرة أمام الجبهية** دوراً جوهرياً في ذاكرة العمل [1].

لا يحتوي أي عصبون معزول في حد ذاته على المعلومة اللازمة لاستعادة ذكرى ما. يحتفظ الدماغ بالبيانات بفضل تشكيل **شبكات جديدة**. هذه الشبكات قابلة للتعديل بفضل تشكيل مشابك جديدة أو تعزيز أخرى. ربما

كانت هذه المشابك موجودة من قبل، لكن عملها كان غير فعال.

يلعب **التعزيز طويل الأمد** (Long Term Potentiation - LTP) [3، 38، 39]، وهو الآلية الرئيسية للمرونة العصبية (Neuroplasticity)، دوراً أساسياً في تشكيل وفعالية هذه المشابك.

"الوعي بالنسبة لعالم النفس هو ما تمثله الجاذبية بالنسبة لعالم الفيزياء: أمر لا مفر منه." (Baars).

1. إشكاليات الوعي:

يعد **الوعي** Consciousness [73، 119، 133] موضوعاً شديد الصعوبة للدراسة لعدة أسباب [119]. أولاً، لوجود تعريفات متعددة للوعي، حيث نستخدم كلمة الوعي في سياقات وتفسيرات متباينة [164]. ثانياً، لأنه يشمل تدخل العديد من البنى الدماغية (Encephalic Structures) [166] ووظائف عليا أخرى مثل **الذاكرة** [73] و**اللغة** [170].

وينضاف عنصر آخر إلى تعقيد هذا الموضوع، وهو أن الوعي **تجربة ذاتية بحتة** [166]، وبالتالي لا يمكن الوصول إليه إلا من خلال الشخص الذي يختبره؛ لذا يجب أن تتم دراسته عبر أشخاص، ولا يساهم النموذج الحيواني إلا بقدر ضئيل جداً لأننا لا نعرف حتى الآن على وجه اليقين شكل الوعي الذي يمكن نسبته إليها [41].

2. عموميات:

2 .1. تعريف:

يمكن للوعي أن يحدد عدة أشياء:

- القدرة على **تركيز انتباه** المرء؛
- حالة **اليقظة**؛
- ملكة **التجريد** (Abstraction)؛
- ملكة **التعبير اللفظي**، أي التعبير عن الأحداث من خلال الكلمات؛
- القدرة على **التخطيط** وصياغة المشاريع وإنشاء علاقات ذهنية جديدة انطلاقاً من التجارب الماضية؛
- الوعي **بالذات**؛
- ملكة وضع **القيم**...

2 .2. اللاوعي:

إن الحديث عن الدماغ والوعي يقودنا للحديث عن **اللاوعي**. يمتلك الدماغ في الواقع عدداً كبيراً من الدوائر المتخصصة التي تعالج في كل لحظة حوالي **مليار** معلومة في الثانية تقريبا حول جوانب مختلفة من بيئتنا [142]. لايتجلى في وعينا سوى كمية ضئيلة للغاية من هذه البيانات.

3. 2. النوم:

ليست كل حالة انقطاع للوعي حالة مرضية. فعلى عكس حالات **الغيبوبة** [57]، أو **الإغماء** (Syncope)، أو الغشيان (Lipothymia) التي لها بالتأكيد أصول مرضية، يشكل النوم حالة انقطاع فسيولوجي للوعي، وهو أمر مثير جداً للاهتمام في دراسته [91، 119].

3. التصنيف:

نميز بين شكلين من الوعي: ما يسمى **بالوعي الأولي** [170] المسؤول عن اليقظة أو حالة التنبه، والذي يُعرف أساساً بنقيضه (فقدان الوعي)، والوعي من **مرتبة أعلى** [171] مثل تعريف الذات وتمييزها، وهو أمر يصعب دراسته وتفسيره.

لقد كان تناول مفهوم الذات دائماً من نتاج عمل الفلاسفة وعلماء النفس، وهو موضوع لعدة دراسات منذ مدة ليست بالقصيرة، والتي لم تجمع بعد على استنتاجات موحدة.

لذلك، من الضروري تحديد مستوى الوعي الذي نتحدث عنه بدقة عندما نحاول ربطه بأي بنى دماغية.

4. الآليات:

يُفعل الوعي **الذاكرة قصيرة المدى**، فالعمليات التي تتطور في الذاكرة طويلة المدى لا تصل إلى الوعي إلا بعد مرورها عبر الذاكرة قصيرة المدى [133].

العديد من البنى الدماغية التي تتحكم في الوعي بمعناه المرتبط **باليقظة** معروفة جيداً.

أولاً، **التشكيل الشبكي** Reticular Formation [38، 42، 57]، الذي يؤثر مستوى نشاطه على حالة التيقظ واليقظة والنوم لدينا. فكون المرء مستيقظاً يتطلب تفاعلاً بين التشكيل الشبكي وبنى دماغية أخرى، لا سيما القشرة المخية. لهذا السبب، تُسمى المسارات الصاعدة للتشكيل الشبكي: **الجهاز الشبكي المنشط الصاعد** (ARAS) Ascending Reticular Activating System [45].

ثم **المهاد** (Thalamus)، وهو محطة الفرز لجميع الإشارات القادمة من الجسم [38]. وأخيراً **القشرة المخية** [44]، التي تكتسي أهمية بالغة لجميع أشكال الإدراك والتحكم في الحركات الإرادية [73].

كما تعد **القنطرة** (Pons) [166]، و**نوى الرفاء** (Raphe Nuclei)، و**الموضع الأزرق** (Locus Coeruleus) بنىً مشاركة أيضاً في الحفاظ على الوعي الأولي [41].

لكي يكون هناك وعي، يبدو أنه يجب أن يكون هناك تبادل أو رنين بين مناطق مختلفة من الدماغ. وبفضل تقنيات **التصوير الدماغي الوظيفي** Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)، يمكننا رؤية المراحل التي تؤدي إلى ظهور صورة ذهنية واعية.

5. متلازمة الانفصال الثفني:

مما لا شك فيه أن التجربة الأكثر تأثيراً في تاريخ دراسة الوعي هي دراسة متلازمة الانفصال الثفني (Callosal Disconnection Syndrome) [133].

في حالات الصرع المستعصية على أي علاج دوائي والتي تنتشر في كلا نصفي الكرة المخية، يتم أحياناً إجراء قطع **للجسم الثفني** (Corpus Callosum).

على الرغم من أن الأمر يتعلق بحوالي 200 مليون ليف عصبي [39، 80] مقطوع، إلا أن المرضى لا يشعرون بعد العملية بأي عجز ملحوظ. لكن التجارب المعقدة تلاحظ شيئاً مذهلاً؛ حيث يطور كل نصف كرة مخية **وعياً خاصاً** ومستقلاً عن نصف الكرة الآخر [73]!

إذا وضعنا جسماً في اليد اليسرى للشخص المعني مع عصب عينيه، فإنه لا يتعرف لفظيا على الجسم لأن منطقة اللغة، الموجودة في نصف الكرة الأيسر، لا يمكنها الوصول إلى المعلومات الحسية التي تنتهي في حالة اليد اليسرى في نصف الكرة الأيمن، ومع ذلك ينجح الشخص في رسم الجسم بيده اليسرى [39، 166]!

تفسير هذه الظاهرة في أن الوعي ليس كتلة واحدة صماء، بل هو نتاج تنسيق مستمر بين نصفي الكرة المخية؛ فحين انقطع الاتصال بينهما، تكشّف أن نصف الكرة الأيسر يعمل كـ «**مُفسر**» لغوي ومنطقي، يمتلك القدرة على التحدث وتسمية الأشياء، بينما بالرغم من إدراك نصف الدماغ الأيمن لشكل الجسم، فإنه يظل «صامتاً» لغوياً لأنه لا يمتلك باحة لغوية.

في هذه الحالة، عندما شعرت اليد اليسرى (المرتبطة بالنصف الأيمن) الجسم، استوعبه الدماغ الأيمن واستطاعت اليد اليسرى رسمه، لكن «المتحدث» في النصف الأيسر ظل معزولاً عن هذه الخبرة، فأنكر معرفته بها.

تضعنا هذه النتائج أمام حقيقة مذهلة: وهي أن شعورنا بوجود «**أنا**» واحدة موحدة قد يكون في جوهره وهماً ناتجاً عن سرعة تدفق المعلومات عبر الجسم الثفني، والتي تدمج خبرات كيانين واعيين في سردية واحدة متصلة.

يعتبر النوم [91، 119] فقداناً فسيولوجياً للوعي يتميز عن **الغيبوبة** (Coma) بخاصية العكوسية (Reversibility). وبالفعل، فإنه حتى في أعمق مراحل النوم، يمكن للدماغ إدراك منبه قوي بما يكفي وإيقاظ النائم [1]. يتوافق التناوب بين اليقظة والنوم مع إحدى الدورات الأساسية لدى الإنسان ولدى جميع الحيوانات تقريباً: وهو **النظم اليوماوي** (Circadian Rhythm) [38، 119].

1. مدة النوم:

يقضي الإنسان ثلث حياته على الأقل في النوم [41]، هذا يكفي لإثبات أهميته.

بالنسبة لشخص بالغ طبيعي، يبلغ متوسط مدة النوم من 7 إلى 8 ساعات يومياً [42]. وقد يحتاج الأشخاص الذين ينامون لفترات طويلة إلى 10 ساعات، بينما قد يكتفي الذين ينامون لفترات قصيرة بـ 5 ساعات [168].

لا توجد مدة مثالية حقيقية للنوم، فالمعيار الوحيد للقدر الكافي من النوم هو الشعور بالنشاط خلال اليوم التالي.

تختلف مدة النوم باختلاف العمر [145]، فهي بشكل عام تتناقص من الولادة وحتى الوفاة.

2. مراحل النوم:

بعيداً عن كونه حالة موحدة، يتقلب نومنا بين **مراحل** (أو أطوار) مختلفة [38، 41، 57] تحدث بترتيب مميز خلال الليل.

يعد **مخطط كهربية الدماغ** Electroencephalogram (EEG) [41] الفحص الأكثر استخداماً لدراسة النوم. ويسمح **مخطط النوم** (Hypnogram) [5، 136] بتسجيل نشاط العصبونات القشرية باستخدام أقطاب كهربائية موضوعة في أماكن محددة من فروة الرأس.

سمح مخطط كهربية الدماغ بالتمييز بين مرحلتين أساسيتين من النوم [80]: **النوم البطيء** (Slow-wave Sleep) و**النوم المتناقض** (Paradoxical Sleep) [166].

تسمح موجات مخطط كهربية الدماغ، حسب ترددها وسعتها، بتمييز **4 مراحل** من النوم البطيء [1، 72]: المرحلة الأولى **(I)** تقابل الاستغراق في النوم أو النعاس، المرحلة الثانية **(II)** تقابل النوم الخفيف، والمرحلتان الثالثة **(III)** والرابعة **(IV)** تقابلان النوم العميق.

خلال النوم المتناقض، يشبه رسم مخطط كهربية الدماغ [4] إلى حد كبير رسم حالة اليقظة بإيقاعه السريع وسعته المنخفضة. ولهذا السبب، أطلق عليه عالم الأحياء العصبية ميشيل جوفيه اسم "النوم المتناقض" في عام

1959 [119]. ويطلق عليه الأنجلوسكسونيون اسم **حركات العين السريعة** Rapid Eye Movement (REM) [32] لأن هذا النوع من النوم يتميز بحركات عينية سريعة عديدة تحت الأجفان المغلقة.

تجري مراحل النوم المختلفة على النحو التالي: 1-2-3-4-3-2-1-حركات العين السريعة-1-2-3-4-3-2-1-حركات العين السريعة-1-2... إلخ. كل هبوط في النوم العميق يتبعه صعود يؤدي إلى فترة من حركات العين السريعة [5].

على الرغم من تماثل مدتها، إلا أن الدورات تتطور خلال الليل. ففي الثلث الأول، يهيمن النوم البطيء [39]. تشتمل الدورتان الأوليان بشكل أساسي على النوم البطيء العميق [57]، وهذا ما يفسر الفائدة الكبيرة للراحة البدنية المرتبطة بالساعات الأولى من النوم.

في المقابل، يكون النوم البطيء الخفيف وحركات العين السريعة أكثر أهمية نسبياً في نهاية الليل [57].

3. النوم والنشاط:

النوم بعيد كل البعد عن كونه مجرد توقف مؤقت لنشاطنا البدني والذهني. إنه حالة أخرى متنوعة ومعقدة مثل حالة اليقظة [57] تصاحبها تغيرات فسيولوجية مهمة (درجة الحرارة، إفرازات هرمونية، النبض القلبي والتنفسي، إلخ) [41].

3 .1. أثناء النوم البطيء:

تكون العضلات أكثر استرخاءً، ولا تعمل الحركات النادرة إلا على ضبط وضعية الجسم. ينخفض **التمثيل الغذائي** (Metabolism) العام للجسم: درجة الحرارة، استهلاك الطاقة، معدل ضربات القلب، التنفس، وظائف الكلى، كل هذا يتباطأ وفقاً لسيادة الجهاز العصبي اللاودي (Parasympathetic Nervous System) خلال هذه المرحلة من النوم.

وتشير الإيقاعات البطيئة في مخطط كهربية الدماغ أثناء النوم البطيء إلى أن الدماغ يبدو أيضاً في حالة راحة.

3 .2. أثناء النوم المتناقض:

يكون استهلاك الدماغ للأكسجين (الذي يعكس استهلاكه للطاقة) **مرتفعاً** جداً، بل وأعلى من استهلاك دماغ مستيقظ يفكر في مسألة معرفية معقدة.

يحدث فقدان شبه كامل **للمقوية العضلية** (Muscle Tone)، مما يجعلنا مشلولين حرفياً، وهو ما يمنع الجسم من تجسيد الأحلام فعلياً!

ومع ذلك، تؤمن العضلات التنفسية والقلبية الخدمات الحيوية. وتظل عضلات العين نشطة وتنتج حركات

العين السريعة الشهيرة، ويزداد معدل ضربات القلب والتنفس بشكل غير منتظم تحت تأثير الجهاز العصبي الودي (Sympathetic Nervous System).

4. دور النوم:

لا يوجد سوى القليل جداً من اليقين بشأن دور النوم [1]. فللنوم البطيء وللنوم المتناقض أدوار مختلفة تماماً.

بينما يرتاح الجسم خلال النوم البطيء (وهو السبب في تسمية النوم العميق بالنوم **المرمم** Restorative Sleep)، فإن دور النوم المتناقض أكثر إثارة للجدل؛ حيث يبدو أنه يعمل على ترسيخ عمليات **الذاكرة والتعلم** [163]، كما يلعب دوراً في العواطف وسمات الشخصية، وأخيراً فهو الركيزة الأساسية للأحلام.

دور **الأحلام** هو الآخر مثير للجدل [5]: حيث يصف فرويد الأحلام بأنها (الطريق الملكي للاوعي) [76]. يُفترض أن السيناريو الخاص بها يُصنع من انطباعات عشناها خلال اليوم ومن ذكريات قديمة يتم تحويلها أو تمويهها من أجل الهروب من رقابة الوعي.

ينسب علماء آخرون إليها طابعاً عشوائياً ناتجاً عن سوء تفسير الدماغ للإشارات القادمة من الخارج نظراً لحالة الوعي المضطربة بسبب النوم.. لا تحدث الأحلام فقط أثناء حركات العين السريعة، ولكن في هذه المرحلة نعيش المشاهد والصور الأكثر وضوحاً والأحداث الأكثر تماسكاً [57]، أما النوم العميق فهو التربة الخصبة للكوابيس والذعر الليلي [166].

5. آليات النوم:

تعتبر آليات اليقظة والنوم معقدة للغاية [5، 95]، فهي تشمل عدة بنى تشريحية وعدة جزيئات كيميائية.

5 .1. البنى التشريحية المشاركة:

بشكل عام، يمكن تجميع مكونات الأنظمة المنسقة لدورة اليقظة والنوم في مسارين كبيرين ينشأ كلاهما من جزء من **النواة الشبكية** Reticular Nucleus **للبصلة السيسائية** (Medulla Oblongata).

- **المسار البطني** (Ventral Pathway) [172] الذي يمتد نحو **الوطاء الخلفي** (Posterior Hypothalamus) و**نواة مايرنت القاعدية** (Nucleus basalis of Meynert) [119، 172] (عصبونات أسيتيل كولينية). وهو **المسار الشبكي الوطائي القشري** Reticulo-Hypothalamo-Cortical Pathway. وتؤدي استثارة الوطاء الخلفي إلى حالة يقظة قابلة للمقارنة بتلك التي نحصل عليها من خلال استثارة التشكيل الشبكي للجذع الدماغي.

- **المسار الظهري** (Dorsal Pathway) [172] الذي ينشط **النوى الجسرية المتوسطة** (Mesopontine Nuclei) الكولينية [119]، **والتشكيل الشبكي للدماغ المتوسط** Mesencephalic Reticular Formation **(عصبونات الأسبرتات/غلوتامات)** والمهاد. وهو **المسار الشبكي المهادي القشري** Reticulo-Thalamo-Cortical Pathway.

هناك بنية رئيسية في دورة النوم واليقظة هي **النواة فوق التصالبية** Suprachiasmatic Nucleus (SCN) [57]، وتنتمي إلى **الوطاء** حيث تقع مباشرة فوق **التصالب البصري** [119]. يزداد نشاط عصبونات هذه النواة وينخفض على مدى فترة تبلغ حوالي 24 ساعة، لذا تبدو هذه النواة عنصراً رئيسياً في تنظيم **النظم اليوماوي**.

تتلقى النواة فوق التصالبية إشارات قادمة من الأعصاب البصرية التي تسمح بمعايرة **الساعة البيولوجية** [1، 39، 119] انطلاقاً من دورات النهار والليل. وهي تمتد إلى مجموعة من المناطق الدماغية: الوطاء، وجذع الدماغ، والدماغ المتوسط. كما تؤثر أيضاً على إفراز **الميلاتونين** (الهرمون الرئيسي لدورة الليل والنهار) عن طريق **الغدة الصنوبرية** (Pineal Gland) [57].

يلعب **الموضع الأزرق** (Locus Coeruleus) [38] (وهي نواة تقع على مستوى **القنطرة**) دوراً رئيسياً أيضاً في دورة النوم واليقظة بفضل ارتباطاته مع **نوى الرفاء** Raphe Nuclei [38] (المشاركة في الاستغراق في النوم والتي تمتد إلى النواة فوق التصالبية)، **والنوى المجاورة للبطينات** في الوطاء، والقشرة المخية الحديثة (Neocortex). وهذه الإسقاطات ذات طبيعة أدرينالينية، مما يجعل من الموضع الأزرق نواة حقيقية للتوتر والتحفيز واليقظة. يؤدي التدمير الكامل لهذه النواة إلى إلغاء الأحلام وحركات العين السريعة.

2. 5. بيولوجيا النوم:

يجب أن تتراكب عملتيان بشكل صحيح في الجسم حتى نتمكن من النوم:

- **النظم اليوماوي**، الذي تضبطه ساعتنا البيولوجية، والذي ينظم الإفراز الدوري لعدة هرمونات منها الميلاتونين [1]، المشارك في النوم.
- **تراكم المواد المحدثة للنوم** (Hypnogenic Substances) خلال النهار، وهي مواد تحفز الرغبة في النوم ولا تختفي إلا بالنوم، مثل السيروتونين (Serotonin) الذي يفرزه الوطاء الأمامي ويثبط الوطاء الخلفي [136].

أحد أكثر العوامل المحدثة للنوم دراسة هو **الأدينوزين** (Adenosine) [136]، وهو جزيء صغير ناتج عن تحلل **أدينوزين ثلاثي الفوسفات** Adenosine Triphosphate (ATP) **(الركيزة الطاقية الرئيسية للخلايا)**. يعمل الأدينوزين كمنظم عصبي على مستوى العديد من المشابك في الدماغ. وتعد مضادات مستقبلات الأدينوزين الطبيعية مثل **الكافيين** في القهوة أو **الثيوفيلين** في الشاي مواد معروفة بتأثيرها المنشط.

ينخفض نشاط الوطاء الخلفي بشكل طبيعي أثناء النوم، مما يؤدي إلى إفراز كمية أقل من **الهستامين**

(Histamine) [41]. من ناحية أخرى، تسبب **مضادات** الهستامين التي يتم تناولها ضد مظاهر الحساسية نوعاً من النعاس عن طريق تقليل نشاط الهستامين [74].

"بالاقتصار على الدراسة الفسيولوجية البحتة للغة، فإننا نغامر بألا نتمكن أبداً من النفاذ إلى تلك الملكة الداخلية التي تعد اللغة مظهرها أو علامتها الخارجية" (Müller، 1861).

تعد اللغة [3، 4، 57] الوظيفة التي تسمح لنا بالتواصل مع الآخر. وسواء كانت منطوقة أو مكتوبة أو لغة إشارة، فإن التواصل يلعب دوراً محوريا في حياتنا. بفضل اللغة يمكننا التعبير عن أفكارنا واحتياجاتنا ورغباتنا، كما يمكننا إخبار الآخر وإعلام أنفسنا بالتهديدات أو الأخطار المحتملة.

لولا اللغة، لما كان لا تاريخ ولا تقدّم... باختصار، تقع اللغة في قلب، بل وعلى قمة الوظائف المعرفية (Cognitive Functions) الأكثر أهمية للإنسان [5].

1. اللغة واللغات:

اللغة هي ملكتنا في ترميز العناصر المجردة أو الملموسة من خلال تسلسل من الإشارات والرموز المفهومة من قبل الآخرين. تتم برمجة هذه الإشارات بطريقة دقيقة من أجل تشكيل تعبيرات ذات معنى.

تشكل مجموع هذه الإشارات وقواعد هيكلتها ما يعرف بـ "لغة". يوجد اليوم أكثر من 6.000 لغة عبر الكوكب [173]، منها 1.000 لغة في غينيا الجديدة وحدها [174]!

عدد الرموز والكلمات في لغة معينة ليس لانهائياً، ومع ذلك، وبفضل تركيباتها المختلفة في جمل، يمكننا تشكيل **عدد لا نهائي** من التعبيرات. هذا يشهد على القوة الهائلة للغة.

قدرة الدماغ على التعرف على كلمات محددة في التدفق اللفظي لشخص ما هي أمر لافت للنظر للغاية. يكفي الاستماع إلى لغة أجنبية بالنسبة لنا لإدراك مدى صعوبة عزل عناصرها المكونة. فالشخص الذي يتحدث بلغته لا يعزل الكلمات بين فترات صمت، مثل المسافات التي تفصل بين الكلمات المكتوبة، ومع ذلك، فإن دماغنا يتعرف عليها بشكل فردي ويمنحها معنى.

2. الجهاز الصوتي:

لكي نتمكن من الكلام، نمتلك جهازاً صوتياً (Phonatory Apparatus) متطوراً للغاية [175]. يمكن تشبيه الجهاز الصوتي البشري **بآلة موسيقية نفخية ووترية** في آن واحد [175]. فهو يشتمل على **انبعاث الهواء**: الرئتان (المولد)، و**بنية تهتز**: الحبال الصوتية في الحنجرة (الهزاز)، وسلسلة من **صناديق الرنين** التي يشكلها البلعوم والفم والفجوات الأنفية (الرنان أو المضخم). ثم يكتمل تحول الصوت الحنجري إلى كلام من خلال وضعية شراع الحنك (Soft Palate)، واللسان، والشفاه، والأسنان التي تعمل كـ **(معدلات)** للصوت المنبعث.

3. الباحات الدماغية للغة:

توجد منطقتان دماغيتان مشاركتان بقوة في اللغة: باحة **فيرنيكه** وباحة **بروكا** [41، 74].

3 .1. باحة فيرنيكه:

تقع هذه الباحة (Wernicke's Area) في الفص الصدغي بجوار القشرة السمعية (Auditory Cortex) الأولية والثانوية مباشرة. وهي تضمن فهم عناصر اللغة. تستقبل باحة فيرنيكه المعلومات من الباحة السمعية الخاصة باللغة المنطوقة، وتقوم بتحليلها وإرسال سيالات نحو باحة بروكا عن طريق **الحزمة المقوسة**.

3 .2. الحزمة المقوسة:

أظهرت دراسات حديثة أن الحزمة المقوسة (Arcuate Fasciculus) تربط باحة فيرنيكه **بمنطقة القشرة المحركة الأولية** [198] الواقعة خلف باحة بروكا بدلاً من أن تنتهي فيها مباشرة. إن الجزء الجانبي من **الحزمة الطولانية العلوية** (Superior Longitudinal Fasciculus) هو الذي يربط باحة فيرنيكه بباحة بروكا عبر **التلفيف فوق الهامشي** (Supramarginal Gyrus) [198].

3 .3. باحة بروكا:

تقع باحة بروكا (Broca's Area) في الفص الجبهي، وهي مسؤولة عن التعبير اللغوي. وهي مرتبطة بالباحة المحركة الرئيسية التي تتحكم في انقباضات مختلف عضلات الجسم، لا سيما عضلات الحنجرة المشاركة في الكلام.

4. الجانبية الدماغية:

تكون اللغة في أغلب الأحيان تحت سيطرة واحد فقط من نصفي الكرة المخية [41]، والذي يوصف بنصف الكرة **المهيمن** [50]. وتعد هذه الظاهرة أحد جوانب عدم التماثل العام في الأداء الدماغي والتي تسمى: **الجانبية الدماغية** (Cerebral Lateralization) [166].

نصف الكرة المهيمن هو الأيسر دائماً تقريباً (في 90% من الحالات [96]) لدى الأشخاص الذين يستخدمون اليد اليمنى. أما لدى العُسر (مستخدمي اليد اليسرى)، فإن الفسيولوجيا الدماغية تكون أكثر تغيراً وأقل معرفة حسب الأفراد: فغالباً ما يكون نصف الكرة المهيمن هو الأيسر، ولكن أحياناً يكون الأيمن، وفي حالات أخرى، يبدو أن الجانبية تكون أقل وضوحاً وأن نصفي الكرة المخية يكونان أكثر توازناً [4].

ومع ذلك، فإن هذه الرؤية القاطعة لوجود نصف كرة مهيمن للغة بعيدة كل البعد عن كونها مطلقة. فقد أثبتت دراسات حديثة الدور المهم لنصف الكرة الأيمن في **النبرة الكلامية** أو **العروض** (Prosody) [41]، وهي الملكة

التي يمكننا من خلالها صياغة الجملة نفسها بطرق متنوعة ليكون لها معانٍ مختلفة تماماً؛ فهي تسمح بتحويل التقرير إلى أمر أو أمنية أو سؤال.

"هل العاطفة نتاج سحري، أم أنها عملية فسيولوجية تعتمد على آلية تشريحية؟" James Papez

1. الخلفية التاريخية:

تم إدخال مصطلح "**الحوفي**" (Limbus وتعني حافة باللغة اللاتينية [39]) لأول مرة من قبل الطبيب وعالم التشريح الفرنسي **بول بيير بروكا** Paul Pierre Broca في عام 1878 [74]. وكان الأخير يقصد بـ "**الفص الحوفي الكبير**" فصاً إضافياً مشاركاً بشكل خاص في **العاطفة**، ويتكون من **البصلة الشمية** Olfactory Bulb و**السبيل الشمي** Olfactory Tract ، و**الحصين**، و**التلفيف الحزامي** (Cingulum وتعني حزام باللاتينية) [75]. بطبيعة الحال، لا يُعترف حالياً بالجهاز الحوفي [32، 41] كفص حقيقي [38].

في عام 1937، نشر عالم التشريح العصبي الأمريكي **جيمس بابيز** أبحاثه [80] حول دائرة للعواطف تُسمى اليوم **دائرة بابيز** Papez circuit [38، 50]. وتشتمل هذه الدائرة على **الحصين**، و**التلفيف الحزامي** Cingulate Gyrus [41]، والمهاد، والوطاء وبعض ترابطاتهم البينية.

بعد بضع سنوات، في عام 1949، استعاد **بول ماكلين** Paul MacLean [39] أفكار بابيز ودمجها مع مفهوم الفص الحوفي الكبير الذي اقترحه بول بروكا، للوصول إلى مفهوم **الجهاز الحوفي** [80].

ومنذ ذلك الحين، أضيفت بنى تشريحية أخرى تدريجياً إلى هذا النظام مثل **القشرة أمام الجبهية** و**المنطقة الحجاجية الجبهية** (Orbitofrontal Region) [71].

2. وظائف الجهاز الحوفي:

يَعُدُّ الجهاز الحوفي مجموعة من البنى الدماغية التي تلعب دوراً مهماً جداً [39] في السلوك، لا سيما في العواطف، والذاكرة، والتعلم، و**الوظائف التنفيذية** Executive Functions [161، 162].

"**العاطفة**" في مجال الفسيولوجيا العصبية لا تعني "**الشعور**" (Sentiment)، الذي هو التجربة الداخلية والذاتية البحتة التي يحس بها الشخص تجاه موقف معين. بل إن العواطف هي التفاعلات الفسيولوجية التي تصاحب هذه المشاعر، وهي تغيرات في السلوك أو في أداء الأعضاء [176].

غالباً ما يُطلق على الجهاز الحوفي اسم **الدماغ الحشوي** Visceral Brain أو **الدماغ العاطفي** Emotional Brain [119] لأنه يلعب دوراً مهماً في سلسلة كاملة من العواطف بما في ذلك الألم، واللذة، والانصياع، والمودة، والغضب، والعدوانية، والخوف، والبهجة...

وفي تعريف أوسع، يضم الجهاز الحوفي جزءًا مهما من الوظائف التنفيذية (Executive Functions)، خاصة

العاطفي منها.

تشتمل الوظائف التنفيذية على قدرات تتعلق بالتخطيط، وذاكرة العمل، والاستباق، والمبادرة، والتنظيم، وحل المشكلات، والاستدلال المنطقي، والتحكم المعرفي، والتفكير المجرد، وتعلم القواعد، والانتباه الانتقائي، واختيار الاستجابات الحركية، والتحفيز...

وترتبط الوظائف التنفيذية بشكل أساسي بعمل **القشرة أمام الجبهية** Prefrontal Cortex و**المنطقة الحجاجية الجبهية** Orbitofrontal Region [177]. كما يؤثر الجهاز الحوفي أيضاً على جهاز الغدد الصماء والجهاز العصبي الذاتي Autonomic Nervous System (ANS) [166].

3. تشريح الجهاز الحوفي:

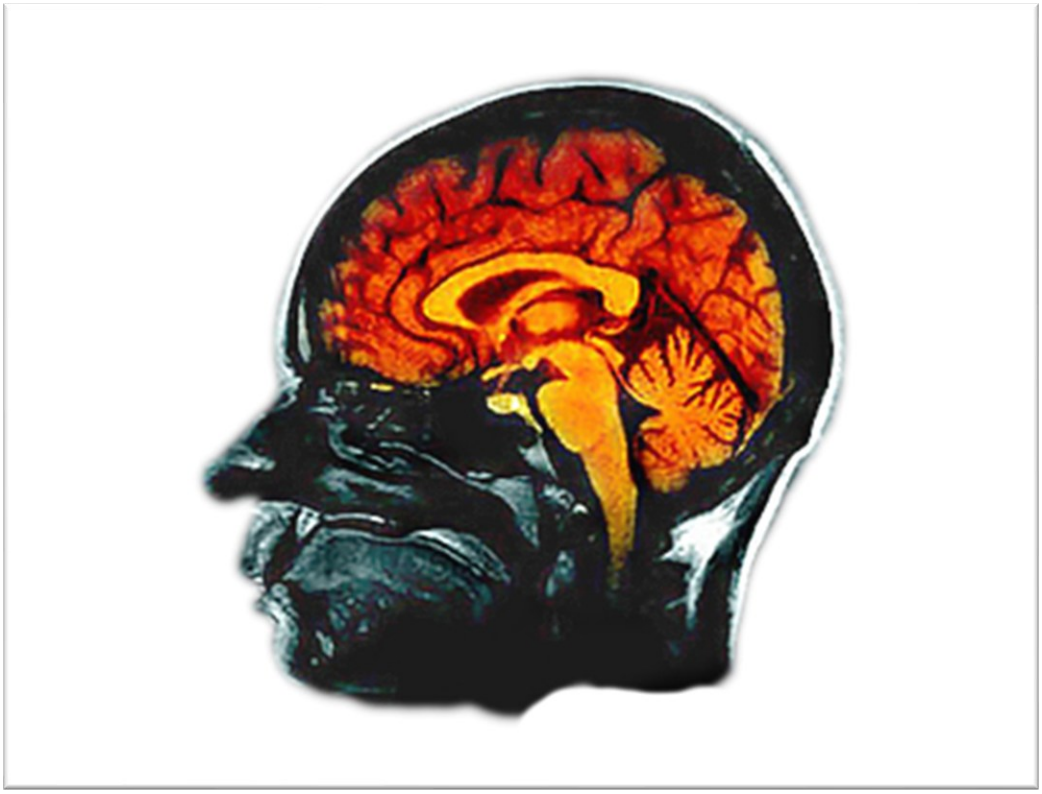
يشتمل الجهاز الحوفي على عدة **بنى قشرية** و**تحت قشرية** تقع حول المهاد [80]. وتُشكل كل هذه البنى نظاماً مدمجاً عصبيًا يضمن بقاء الفرد من خلال تنفيذ استجابات حشوية وسلوكيات متكيفة.

منذ الخمسينيات، لم تتوقف قائمة البنى الدماغية المحددة للجهاز الحوفي عن الاتساع، ومن بين هذه البنى الأساسية نجد: **تلفيف الجسم الثفني** [32] أو **التلفيف الحزامي** Cingulate Gyrus، و**الوطاء**، و**النوى الأمامية للمهاد**، و**الجهاز الشمي**، و**الحصين**، و**النوى اللوزية** Amygdaloid Nuclei ...

وفي قلب هذا النظام توجد **دائرة بابيز** التي تعد مهمة جداً للذاكرة. في هذه الدائرة، تتدفق المعلومات في حلقة من الحصين نحو الأجسام الحلمية (Mamillary Bodies) للوطاء (عن طريق **القبو** Fornix) ثم تمر إلى **النوى الأمامية للمهاد** ثم إلى **القشرة الحزامية الأمامية** لتعود إلى **الحصين**.

يلعب **المجمع اللوزي** (Amygdala) [38] عدة أدوار، حيث يشارك في **الشم**، وفي **العواطف**، وخاصة في صياغة الاستجابات المتكيفة لمواجهة **الأخطار** [96]. وتظهر التجربة الكلاسيكية لفأر دُمِّرت لوزتاه أنه لا يميل إلى الهروب من مفترس محتمل.

الاضطرابات العصبية



الاضطرابات العصبية - عموميات 125
السكتة الدماغية 126
الصرع 129
مرض باركنسون 133
مرض الزهايمر 136
الألم 139
الوهن العضلي الوبيل 143
التصلب المتعدد 145
الحبسات الكلامية 148

إن دراسة الفسيولوجيا العصبية لن تكون ذات فائدة عملية إلا إذا سمحت بحل مشكلات الحياة الواقعية. فالجهاز العصبي، على الرغم من سمو وظائفه والحماية التي يحظى بها، يمكن أن يكون عرضة لمجموعة متنوعة من الأمراض والاعتلالات.

المعرفة المسبقة بالبنى التشريحية المصابة وكيفية عملها لا تسمح فقط بتفسير "الأعطال"، بل تفضي أيضاً وبشكل أساسي لاقتراح وتصور استراتيجيات علاجية وتدابير وقائية فعالة وناجحة لإصلاحها أو على الأقل لتجنبها.

سنرى في هذا الفصل كيف يؤدي انقطاع تدفق الدم في شريان دماغي إلى عواقب وخيمة، ليس فقط على المنطقة المعنية ولكن أيضاً على المناطق المجاورة.

سنتحدث عن **الألم** ونشرح كيف يشعر الفرد بالألم في مكان آخر عندما يعاني من مشكلة قلبية.

سنتحدث عن **الوهن العضلي** (Myasthenia) ونصف كيف تعمل الوسائل العلاجية الرئيسية لتعويض الخلل في مستقبلات الأسيتيل كولين على مستوى الصفيحة المحركة.

سنتحدث عن **الركيزة الفسيولوجية المرضية** (Physiopathological Substratum) لحالات **الصرع**، و**التصلب المتعدد** Multiple Sclerosis (MS)، و**الحبسة الكلامية** (Aphasia). بالإضافة إلى **مرضين تنكسيين** (Degenerative Diseases) عواقبهما مروعة ومدمرة: مرض **باركنسون** ومرض **ألزهايمر**.

1. عموميات:

يمثل الدماغ أقل من 2% [137] من وزن جسم الإنسان. ومع ذلك، فإنه يتلقى وحده أكثر من 16% [5] من إجمالي الإمداد الدموي للجسم. الدماغ عضو ذو نشاط أيضي (Metabolic) مرتفع للغاية، حيث يتطلب أكثر من 20% [138] من الإمداد الطاقي للجسم بأكمله.

لا يمتلك الدماغ إلا احتياطيات ضئيلة جداً من الطاقة (الأكسجين والغلوكوز) [109]. ما يزيد الأمر سوءاً هو أن العصبونات تموت في غضون بضع دقائق في حالة انقطاع الإمداد الطاقي [105]. وإذا ماتت العصبونة، فإن فرص تعويضها تكون ضئيلة جداً. لهذا السبب، فإن الحفاظ على الإمداد الوعائي الدماغي يكتسي أهمية قصوى.

تُعرف **السكتة الدماغية** (Stroke)[4، 178] (أو **الحادث الوعائي الدماغي**) بأنها انقطاع مفاجئ لتدفق الدم في منطقة من الدماغ، ينتج عنه ظهور اضطرابات عصبية [179].

وفقاً لطبيعتها، نميز بين نوعين من الحوادث الوعائية: **السكتة الدماغية الإقفارية** (Ischemic Stroke) (80% من إجمالي الحالات)، الناتجة عن انسداد وعاء دموي، و**السكتة الدماغية النزفية** (Hemorrhagic Stroke) (20% من الحالات) التي تسبب نزيفاً داخل الدماغ [180].

2. السكتة الدماغية الإقفارية:

2 .1. الأسباب:

تنتج **السكتة الدماغية الإقفارية** [69] عن انسداد شريان يغذي الدماغ (**الشريان المخي، الشريان السباتي الباطن**، أو **النظام الفقري القاعدي**). ويؤدي ذلك إلى حدوث **احتشاء دماغي** (Cerebral Infarction) (أو **تليّن دماغي** [181]).

يمكن أن يكون لهذا الانسداد عدة أسباب:

- عصيدة شريانية (Atheroma) مسدودة،
- انحشار جلطة (Clot) تشكلت محلياً أو ذات منشأ قلبي،
- تمزق في جدار الشريان (سلخ) Dissection،
- انضغاط بسبب ورم...

2 .2. من الناحية السريرية:

يصيب العجز الناتج **قطاعا** دماغياً محدداً بدقة: ويقال عنه إنه ممنطق (Systématisé) أو موافق للتوزع

الوعائي. وتعتمد المظاهر السريرية [69] على القطاع المصاب.

فمثلاً، إذا أصيب الشريان المخي الخلفي الأيسر، فسوف يصاب المريض **بعَمى شقي متماثل** أيمن (Right Homonymous Hemianopsia). أما إذا أصيب الشريان المخي المتوسط الأيسر، فسيصاب المريض بعجز حسي حركي في نصف الجسم الأيمن، يصاحبه في الغالب حبسة كلامية (Aphasia).

يمكن أن يكون الحادث الإقفاري **عابراً** Transient Ischemic Attack (TIA) [31] مع عودة سريعة للحالة الطبيعية دون عاهات مستديمة. كما يمكن أن يكون العجز دائماً، وهي حالة السكتة الدماغية الإقفارية **المكتملة** Completed Ischemic Stroke (CIS) [184].

2 .3. الفسيولوجيا المرضية:

يؤدي الانقطاع الشديد والمطول لتدفق الدم الدماغي، حتى في منطقة صغيرة من الدماغ، إلى نقص تأكسج الأنسجة (Tissue Hypoxia) مما يؤدي إلى[183، 185]:

- تغيرات أيضية Metabolic changes (تحلل السكر اللاهوائي، وتكون حمض اللاكتيك)،
- التحرير المفرط للغلوتامات (Glutamate)، وهو ناقل عصبي يكون ساماً جداً للخلايا العصبية عند وجوده بتركيزات عالية [41]،
- خلل في عمل مضخات الصوديوم والبوتاسيوم (Na^+/K^+ Pump) [86] مما يؤدي إلى دخول الكالسيوم (Ca^{++}) إلى داخل الخلايا [183] ...

يؤدي مجموع هذه الاضطرابات إلى سلسلة من التنشيطات الإنزيمية وتراكم المستقلبات الحمضية والجذور الحرة (Free Radicals) السامة للخلايا [69]، مما يؤدي إلى آفات خلوية دائمة. لهذا السبب يمكن أن تكون الأعراض الأولية للسكتة الدماغية طفيفة في البداية، ولكن إذا لم يتم التكفل بها مبكراً، فإن الحالة السريرية قد تتفاقم.

تتضاعف الاختلالات الغشائية واضطرابات النفاذية الشعيرية بحدوث **وذمة دماغية** (Cerebral Edema) تُلاحظ على مستوى **المنطقة الإقفارية** Ischemic Zone .

وبالإضافة إلى التأثير المباشر لنقص التروية الدماغية على المنطقة الإقفارية، فإن هذه المضاعفات الأيضية ستمتد إلى المنطقة المجاورة التي تسمى **منطقة الظليل** Penumbra Zone [183].

ويمكن أن يتعقد التلين الدماغي ذو المنشأ الإقفاري ثانوياً بحدوث **نزيف** على مستوى **الآفة**: وعندها نتحدث

عن **تلين نزفي** Hemorrhagic Transformation [182].

3. السكتة الدماغية النزفية:

تحدث السكتة الدماغية النزفية [69] بسبب تمزق وعاء دموي يكون غالباً متضرراً قبل ذلك (**تشوه شرياني وريدي** Arteriovenous Malformation أو **أم** الدم Aneurysm [38]) ومعرضاً لضغط دم مفرط. يعد التبغ والكحول من أكثر العوامل التي تضعف الأوعية الدموية.

أثناء السكتة الدماغية النزفية، يتشكل **ورم دموي** (Hematoma) بسرعة، مما يسبب علامات عصبية بؤرية تظهر بشكل فجائي وتتعلق بالبنى الدماغية المخربة أو المضغوطة.

تؤدي **الوذمة** Edema التي تتشكل حول الورم الدموي إلى تفاقم انضغاط الدماغ داخل العلبة القحفية، وتؤدي إلى أو تزيد من ارتفاع الضغط داخل القحف Intracranial Hypertension (IH). وبما أن العلبة القحفية غير قابلة للتمدد، فإن البنى العصبية الواقعة تحت الضغط قد **تنحشر** (تندحس) تحت **مشط المخ** أو عبر **الثقبة العظمى** (Foramen Magnum)، مما يشكل خطراً وشيكاً على الحياة.

أحياناً أثناء السكتة الدماغية النزفية، يحدث تحرر هائل لأيونات الكالسيوم، مما يؤدي إلى تشنج وعائي (Vasospasm) [69] مفاجئ يمكن أن يكون سبباً في حوادث إقفارية أخرى.

"يتلخص تاريخ الصرع في 4000 عام من الجهل والخرافات والوصم، يتبعها 100 عام من المعرفة والخرافات والوصم" Rajendra Kale ، 1997 [190].

1. نظرة عامة:

يأتي مصطلح الصرع (Epilepsy) من اللغة اليونانية، ويعني: الأخذ على حين غرة [186].

يعد الصرع [41، 69، 179، 185] حالة عصبية تتميز بتكرار النوبات التي تجمع بين:

- **سريرياً**: مظاهر حركية **تونية رمعية** (Tonic-clonic)، واضطرابات حسية ونباتية و/أو اضطراب في الوعي.
- **تخطيط كهربية الدماغ**: رسم بياني مميز لنشاط كهربائي نوبي [187].

يعتبر الصرع الحالة العصبية المزمنة الأكثر شيوعاً بعد **الشقيقة** Migraine [187]. وهو اعتلال حميد نسبياً في معظم الحالات، لكن تداعياته النفسية والعائلية والاجتماعية تفوق بكثير خطورة المرض نفسه.

يجب التأكيد على أن الصرع ليس مرضاً عقلياً [69]، كما هو سائد في المعتقدات الشعبية، حتى وإن كان من الممكن أن يصاحبه في بعض الحالات بعض الاضطرابات المعرفية والسلوكية.

2. الفيزيولوجيا المرضية:

تعد نوبة الصرع نتيجة سريرية **لتفريغات نوبية مفرطة**، مفرطة التزامن، وذاتية الاستمرار لمجموعة موسعة إلى حد ما من العصبونات الدماغية [75].

هذا التفريغ المتزامن Synchronized Discharge هو نتيجة خلل في التوازن بين آليات **التثبيط** Inhibitory و**الاستثارة** Excitatory [188]، مما يفسر انطلاق نشاط عصبي مكثف وغير منظم. هذا النشاط، الذي يكون مصدره أحياناً منطقة قشرية صغيرة (**المنطقة المولدة للصرع** Epileptogenic Zone) [187]، ينتشر تدريجياً عبر القشرة المخية.

تظهر النوبات بشكل مختلف للغاية، وذلك تبعاً لمنطقة الدماغ التي ينطلق منها التفريغ وطريقة انتشاره. فعلى سبيل المثال، نوبة جزئية موطنة في الفص القذالي ستترجم إلى إدراك بصري غير طبيعي، وإذا انتشرت نحو الأمام، فقد تؤدي إلى ظواهر حركية أو حسية. أما إذا انتشرت إلى كامل الدماغ، فقد تتحول إلى **نوبة معممة تونية رمعية** Generalized Tonic-Clonic Seizure [31] (**الداء الكبير** Grand Mal) [75].

تعد نوبة الصرع ظاهرة ديناميكية للغاية تُفعّل بشكل غير طبيعي ومتتابع بنى دماغية متنوعة، وبالتالي وظائفها (اللغة، الظواهر الحركية أو الحسية، حركات العين...).

تمتلك العلامات السريرية الأولى قيمة تحديد موضعية كبيرة. فغالباً ما قد تحدث **"نسمة"** (Aura) [187]، وهي ظاهرة متطابقة دائماً تقريباً لدى الشخص نفسه، تنبئ بقرب حدوث النوبة. وتساهم القدرة على وصفها في تحديد أصل النوبة. عادةً ما يتبع التفريغ المسار نفسه، وبالتالي ستكون العلامات هي نفسها لدى المريض نفسه.

3. التصنيف:

يمكن التمييز بين عدة أنواع من نوبات الصرع. فهناك على سبيل المثال نوبات تشنجية وأخرى صامتة، ويمكن أن تكون جزئية أو معممة، وقد يصاحبها أو لا يصاحبها فقدان للوعي، كما يمكن أن تكون حركية فقط، أو حسية وتحدث بوعي كامل...

3 .1. وفقا للأصل:

- **نوبة صرعية عرضية** Symptomatic [187]: ثانوية لسبب محدد بدقة (رضوض، أورام...) [187].
- **الصرع الأساسي** Essential epilepsy [107]: الشكل الأكثر انتشاراً، وهو مجهول السبب (Idiopathic) بدون سبب عضوي ملحوظ؛ وتتعلق الحالة هنا بـ **"المرض الصرعي"**.
- الصرع **خفي المنشأ** (Cryptogenic): الذي له سبب عضوي بالفعل [145] ولكنه يفلت من الفحوصات [187].

3 .2. وفقا للمظاهر السريرية:

عندما تأخذ النوبات أصلها من منطقة محددة في الدماغ، تسمى **جزئية** (بؤرية) [188]. وعندما تأتي من كامل الدماغ، تسمى **معممة** [67، 187].

أ) النوبات المعممة:

- **النوبة التوترية الرمعية** (الصرع الكبير):

وهي الأكثر شهرة لأنها الأكثر إثارة [107]، وتظهر على شكل سقوط، وفقدان للوعي، وتشنجات تونية رمعية، وعض اللسان، وأحياناً فقدان البول أو البراز... وقد يتعرض صاحبها لإصابات متفاوتة الخطورة، وتتوقف بعد حوالي دقيقة واحدة.

تعد **الحالة الصرعية** Status Epilepticus (SE) [69] تتابعاً لنوبات صرعية معممة دون انقطاع ودون عودة للوعي، حيث تكون **الغيبوبة عميقة** مع اضطرابات نباتية شديدة تهدد حياة المريض على الأمد القصير. وهي تمثل حالة علاجية طارئة.

- **الغياب:**

نوبة الغياب (Absence) [188] هي نوع من النوبات المعممة تتضمن تعليقاً وجيزاً للوعي دون أعراض حركية أو حسية أو نباتية. تكون النظرة فارغة وينقطع التواصل لبضع ثوانٍ بين الشخص ومحيطه. تتكرر نوبات الغياب عادةً خلال اليوم، وتتوافق مع ما كان يسمى سابقاً: **الداء الصغير** [75].

- **أشكال أخرى من النوبات المعممة:**

النوبات **الرمعية** Clonic، **والميوكلونية** (العضلية الرمعية) Myoclonic ، **والتونية** Tonic ، واللاتونية Atonic .

ب) النوبات الجزئية:

- **نوبات جزئية بسيطة:**

في شكلها الحركي، المسمى **برافيه-جاكسون** (Bravais-Jacksonian) [189]، تبدأ النوبة بعلامات حركية موطنة تمتد تدريجياً حسب التقدم على مستوى القشرة المحركة الأولية المقابلة [185].

توجد أنواع أخرى من النوبات الجزئية البسيطة غير الحركية مع اضطرابات حسية، أو نباتية عصبيّة، أو نفسية.

- **النوبات الجزئية المعقدة:**

مع اضطرابات في الوعي يصاحبها أو لا يصاحبها حركات آلية (Automatisms) [187].

- **نوبات جزئية مع تعميم ثانوي:**

تبدأ بتفرغ كهربائي بؤري محدد - غالباً ما يُشعر به كـ 'نسمة' (aura) - قبل أن يتطور سريعاً إلى عاصفة كهربائية شاملة تجتاح كلا نصفي الدماغ [183].

4. التشخيص:

يجب أولاً التأكد من أن الأمر يتعلق بالفعل بالصرع والبحث عن سبب محتمل له. ويجب استبعاد النوبات أو الوعكات التي قد تشبه الصرع [188]: الهستيريا، والوعكات الوعائية المبهمة، وتشنجات حبس النفس، والإغماء، والتكزز، وتشنج العضل (Spasmophilia)... وذلك عبر فحوصات مناسبة.

لإثبات الصرع، يجب غالباً الاعتماد على:

4 .1. التخطيط الكهربائي للدماغ:

يسمح مخطط كهربية الدماغ (EEG) [5، 185] بإظهار التشوهات بين النوبية (بين النوبات) وأحياناً تسجيل

النوبات. والأفضل هو ربط مخطط كهربية الدماغ بتسجيل فيديو [187].

إن وجود مخطط كهربية دماغ طبيعي لا يسمح باستبعاد تشخيص الصرع بشكل قطعي [69]، وعندها يجب تكراره. عندما يكون الصرع شديداً، يجب أحياناً إجراء تسجيل لفترة طويلة مقترن بالفيديو على مدى يوم أو عدة أيام في مركز متخصص.

4 .2. الفحوصات العصبية الإشعاعية:

ليست ضرورية دائماً [188]. إذا كنا نبحث عن آفة، فإن التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI) Magnetic Resonance Imaging يمكن أن يظهر تشوهات لا تستطيع الأشعة العادية أو التصوير المقطعي اكتشافها. ويمكن اقتراح تقنيات تصوير أخرى، إذا كان التفكير في إمكانية جراحية مثلا.

5. العلاج:

يتطلب علاج الصرع غالباً مقاربة متعددة التخصصات (دوائية، ونفسية، واجتماعية، وأحياناً جراحية) [31].

يتمثل المطلبان الأساسيان للعلاج المضاد للصرع في السيطرة الكاملة على النوبات وغياب الآثار الجانبية. تعتمد الاختيارات العلاجية على تقييم دقيق لنوع النوبة، كما تعتمد أيضاً على الملف النفسي والحالة الطبية والاجتماعية للمريض.

تعتمد الرعاية العلاجية أساساً على الأدوية **المضادة للصرع** [31] (أو **مضادات الاختلاج**): الباربيتورات (Barbiturates) (مثل: فينوباربيتال)، والبنزوديازيبينات (Benzodiazepines) (ديازيبام، كلونازيبام)، وفالبوروات الصوديوم، وفينيتوين، وكاربامازيبين...

يكون كل منتج فعالاً بشكل تفضيلي على نوع واحد أو بضعة أنواع من الصرع، وهدفه هو منع حدوث نوبات جديدة، أو تقليل تكرارها.

تعد البنزوديازيبينات الأدوية الإسعافية المرجعية لنوبات الصرع (التشنجات)، أو كذلك للحالة الصرعية.

بالنسبة لبعض أشكال الصرع المقاومة للأدوية، وخاصة الجزئية منها، من الممكن التفكير في تدخل جراحي [188] (استئصال القشرة أو فصم الاتصالات).

وُصف مرض باركنسون [54، 79، 187] لأول مرة في عام 1817 من قبل الطبيب الإنجليزي **جيمس باركنسون** James Parkinson [74] الذي حمل المرضُ اسمَه. وهو اعتلال **تنكسي** في الجهاز العصبي المركزي مسؤول عن اضطرابات حركية بشكل أساسي ذات تطور **تدريجي**. وأسبابه غير معروفة بدقة.

تعد اللوحة السريرية لهذا المرض نتيجة لفقدان عصبونات **الموضع الأسود** (Locus Niger) [38] وإصابة الحزم **السوداوية المخططية** (Nigrostriatal Pathways) [31]. يبدأ المرض عادةً بين سن 45 و70 عاماً [74]. وهو ثاني مرض تنكسي عصبي [79، 91] بعد مرض ألزهايمر.

يتميز مرض باركنسون عن **المتلازمات الباركنسونية** (Parkinsonian Syndromes) [191] التي تكون عادةً ذات أصول متنوعة، وتكون عموماً أكثر خطورة وتستجيب بشكل متفاوت للعلاج.

1. الفيزيولوجيا المرضية:

مرض باركنسون اعتلال تنكسي عصبي يتميز بالموت المبكر للعصبونات، لا سيما عصبونات المادة السوداء (Substantia Nigra - Locus Niger) [187]. يشارك هذا الجزء من الدماغ، الواقع عند ملتقى الدماغ المتوسط والدماغ البيني، في التحكم في الحركة جزئياً بفضل إفراز ناقل عصبي: الدوبامين (Dopamine).

يؤدي فقدان العصبونات الدوبامينرجية إلى عدم توفر الدوبامين بكمية كافية على مستوى الجسم المخطط (Striatum)، ويفسر التطور التدريجي كيفية مرور المرض دون أن يُلاحظ لعدة سنوات. لا تظهر العلامات السريرية الأولى إلا بعد تدمير حوالي 70% على الأقل من عصبونات [192] الموضع الأسود.

مع مرور الوقت، يمكن أن تتأثر بنى عصبية أخرى، مما يشمل ناقلات عصبية أخرى وتكون مسؤولة عن التحكم في ملكات أخرى مثل الذاكرة، والعواطف، والتوازن، وضغط الدم، والمصرات، والقدرة الجنسية [191].

2. التشخيص:

أعراض مرض باركنسون متعددة وليست دائماً محددة للغاية. يمكن أن يبدأ المرض باضطرابات غامضة مثل الآلام حول المفاصل، أو الاكتئاب، أو التعب. في بداية المرض، تتميز الأعراض بجانبها أحادي الجانب [79، 91]. وتشمل هذه الأعراض:

- **الرعاش** [69]: يظهر خاصة عند الراحة، ويستمر حتى أثناء النوم ويتفاقم بسبب الانفعال. يصيب بشكل أساسي الأطراف العلوية، لا سيما اليدين، الرأس لا يرتعش. وغالباً ما يشكل حرجاً اجتماعياً ولكنه نادراً ما يسبب عجزاً كبيراً.

- **اللاحركية** (Akinesia) [185]: هي صعوبة في بدء الحركة أو مواصلتها، وفقدان الحركات التلقائية.
- **الصلابة العضلية** [187]: تترجم زيادة التوتر في العضلات إلى تيبس دائم، وزيادة في مقاومة الحركات، ومشية بخطوات صغيرة، وسقوط، وفقدان للتوازن، وانحناء للعمود الفقري نحو الأمام.
- **اختفاء تعابير الوجه:** يصبح الوجه خالياً من التعبيرات.

3. العلاج:

شهد علاج مرض باركنسون تقدماً ملحوظاً خلال السنوات الأخيرة.

3 .1. الأدوية:

لم يثبت أي دواء فاعليته في وقف تطور مرض باركنسون [193، 194]، حيث لا يوجد علاج شافٍ للمرض. لذلك لا تزال العلاجات الدوائية اليوم عرضية بحتة [96].

يعد **الليفودوبا** أو **إل-دوبا** (L-dopa) [187] طليعة precursor للدوبامين، ويستخدم علاجياً لأن الدوبامين لا يعبر الحاجز الدموي الدماغي Blood Brain Barrier (BBB) [1، 41]. يسمح الإل-دوبا بتخفيف الأعراض لدى العديد من المرضى. ويتحول إلى دوبامين في الدماغ ويغطي الاحتياجات على مستوى المناطق التي تفتقر إليه. ومع ذلك، بعد بضع سنوات من العلاج، يظهر الليفودوبا عدم فاعلية تدريجية [31].

يمكن إعطاء أدوية أخرى بمفردها أو بالتوازي مع الإل-دوبا: المقلدات الدوبامينرجية [79]، أو الإنزيمات التي تثبط تحلل الدوبامين [178]، أو الإنزيمات التي تثبط تحلل الليفودوبا في الدم.

يمكن إعطاء علاجات أخرى لتخفيف الرعاش، وهي أدوية مضادة للكولين (Anticholinergics) [185] تُوصف بمفردها أو بالاشتراك مع الأدوية السابقة.

تستجيب بعض الأعراض مثل فقدان التوازن، أو انخفاض ضغط الدم، أو اضطرابات المزاج، أو ضعف الذاكرة بشكل ضئيل أو سيئ للأدوية المضادة لباركنسون، لأنها ناتجة عن إصابة دوائر دماغية أخرى لا يشترك فيها الدوبامين، وبالتالي تتطلب أنواعاً أخرى من الأدوية.

3 .2. التحفيز الدماغي العميق:

عندما لا تعود الأدوية تقدم الفوائد المرجوة، من الممكن لدى بعض المرضى زرع أقطاب كهربائية في مناطق معينة من الدماغ Deep Brain Stimulation (DBS) متصلة بمحفز (Pacemaker) من أجل تحسين أداء المناطق المتضررة [69].

3. 3. التأهيل البدني:

بالتوازي مع العلاجات الدوائية، يعد التأهيل البدني (العلاج الطبيعي [193]، والعلاج الوظيفي [191]، وتقويم النطق [195]) مكملاً لا غنى عنه. فهو يسمح بالحفاظ على الليونة اللازمة لمواصلة الأنشطة الحركية.

"لقد فقدت نفسي" ,Auguste D. 1901.

1. نظرة عامة:

يعد مرض ألزهايمر [69، 196، 197] اعتلالاً **تنكسياً عصبياً** (Neurodegenerative) [138، 198] يصيب مناطق مختلفة من الدماغ. وهو السبب الرئيسي [140، 199] **للخرف** (Dementia) [197] (تراجع مكتسب، وتدريجي، وعميق، وغير عكسي للوظائف المعرفية) لدى كبار السن.

يستمد هذا المرض اسمه من الدكتور **ألويس ألزهايمر** Dr. Alois Alzheimer الذي وصف لأول مرة في عام 1907 [196] التغيرات التشريحية الملاحظة في دماغ مريضة تبلغ من العمر 51 عاماً، وهي **أوغست د** [201].

في عام 1901 [200]، طلب الدكتور ألزهايمر من المريضة إخباره باسمها، فحاولت أوغست تذكره لكنها لم تنجح، وعندها رفعت عينيها ونظرت إلى الدكتور وقالت: "لقد فقدت نفسي" [202].

2. الفيزيولوجيا المرضية:

تتمثل العملية التنكسية العصبية المسؤولة عن المرض في تشكل **لويحات أميلويدية** (Amyloid Plaques) [113] (لويحات شيخوخية) بين العصبونات، وتجمعات من **بروتينات تاو** (Tau Proteins) داخل العصبونات والتي تشكل **تنكسات ليفية عصبية** (Neurofibrillary Tangles) [196].

يتسبب هذان الأمرين في تدمير عصبي هائل يظهر عيانياً على شكل **ضمور قشري** (Cortical Atrophy) [185، 196]. لدى المرضى المصابين بمرض ألزهايمر، يمكن للدماغ أن يفقد من 8 إلى 10% من وزنه كل عشر سنوات، مقابل 2% لدى الشخص السليم [203]. ويصاحب الضمور القشري توسع في البطينات الدماغية والأثلام القشرية.

يؤثر الفقدان العصبي بشكل خاص على الأنظمة الكولينية (Cholinergic Systems) [80] (القشرة المخية الحديثة، القشرة الشمية الداخلية، اللوزة، الحصين، نواة مايرنت القاعدية [50، 119، 172])، والأنظمة النورأدرينالينية (الموضع الأزرق)، والأنظمة السيروتونينية (نواة الرفاء) [63].

3. العوامل المسببة:

لا تزال الأسباب الدقيقة لمرض ألزهايمر غير معروفة حتى الآن [39]، ولكن يُفترض أن العوامل البيئية (**الألمنيوم** و**المعادن الثقيلة** بما في ذلك الزئبق [204]) والعوامل **الوراثية** [196، 197] تساهم في ذلك. وقد تم تحديد طفرات في أربع جينات على الأقل تؤهب للإصابة بمرض ألزهايمر.

من بين عوامل خطر تطوير مرض ألزهايمر نجد:

- **العمر** وهو أهم عامل خطر [196]؛ فمع التقدم في السن، تصبح آليات الإصلاح الطبيعية في الجسم أقل كفاءة.
- **الأمراض القلبية الوعائية**: جميع عوامل خطر الأمراض القلبية الوعائية [204] (مثل ارتفاع ضغط الدم وفرط كوليسترول الدم) هي أيضاً عوامل خطر لمرض ألزهايمر.
- السوابق العائلية والوراثية [196، 197].
- جين البروتين الشحمي أبوليبو بروتين هـ 4 Apolipoprotein E4 (ApoE4) [197].
- الجنس الأنثوي [196].
- داء السكري [205].
- إصابات **الرأس** [196، 197، 204] ...

4. العرض السريري:

العرض الأول لمرض ألزهايمر هو فقدان ذكريات الأحداث الحديثة (فقدان الذاكرة) (Amnesia) [201]، ويظهر هذا في البداية من خلال تشتتات ذهنية بسيطة تزداد تدريجياً مع تقدم المرض، بينما تظل الذكريات القديمة محفوظة نسبياً.

لاحقاً، تمتد حالات العجز المعرفي إلى مجالات اللغة (الحبسة الكلامية) (Aphasia) [198]، وتنظيم الحركات (العمه الحركي) (Apraxia) [205]، والإدراك البصري (العمه البصري) (Visual Agnosia) [197]، والوظائف التنفيذية (مثل اتخاذ القرار والتخطيط) [206]. وتعكس هذه الأعراض الأخيرة بشكل خاص العملية المرضية للتنكس التي تصيب الفصوص الجبهية للدماغ.

تؤثر هذه التغيرات النفسية على الصفات الإنسانية الأساسية، ولهذا السبب يُوصف مرض ألزهايمر أحياناً بأنه مرض يفقد فيه الضحايا الصفات التي تشكل جوهر الوجود الإنساني.

5. العلاج:

لا يوجد علاج يسمح بالشفاء من مرض ألزهايمر اليوم [206]، ولا حتى إيقاف تطوره. ومع ذلك، هناك بعض الأدوية التي تبطئ تطوره من خلال تخفيف فقدان الذاكرة واللغة والاستدلال.

5. 1. العلاجات النوعية:

وهي عبارة عن أدوية تُوصف خصيصاً لمرض ألزهايمر [207]:

• مثبطات كولين استراز Acetylcholinesterase Inhibitors (AChEI): وهي تثبط تحلل الأسيتيل كولين. وبذلك، فهي تهدف إلى تصحيح النقص في الأسيتيل كولين الملاحظ في دماغ الأشخاص المصابين بهذا المرض.

• مضادات مستقبلات ن-مثيل-د-أسبارتات N-Methyl-D-Aspartate (NMDA): تلعب المستقبلات العصبية ن-مثيل-د-أسبارتات دوراً مهماً في عمليات الذاكرة.

2. 5. العلاجات غير المحددة:

وهي تعدل سلوك المريض دون مهاجمة المرض نفسه [206].

• المهدئات النفسية (Psychotropes) تخفف من القلق أو العدوانية أو حالات الهياج لدى المرضى. ويجب تجنب مضادات الكولين (Anticholinergics) لأنها تفاقم المرض.

• أدوية تستهدف عوامل خطر المرض: بعض الستاتينات (Statins)، ومضادات الأكسدة (مثل فيتامين E أو الميلاتونين)، ومضادات الالتهاب.

في جميع الحالات، يعد الأخذ بعين الاعتبار للاضطرابات التي تسببها المشكلات المعرفية في الحياة الشخصية والعلائقية للمرضى أمراً ضرورياً، بالإضافة إلى دعم العائلات. وغالباً ما تكون تقنيات التأهيل المعرفي وبعض العلاجات النفسية مفيدة.

الألم [3، 4، 57] إحساس مزعج ومضني يدركه الكائن الحي كاستجابة لمنبه مؤلم. وعادةً ما يمثل إشارة إنذار للجسم للإبلاغ عن تهديد يمس سلامته البدنية.

يمكن للألم أن يشير أيضاً إلى معاناة ذات طابع عاطفي (على سبيل المثال عقب وفاة). هذا النوع الذي يرتبط بأحاسيس ومشاعر نفسية لن يتم التطرق إليه هنا.

على الرغم من كونه تجربة ضارة شعوريا، إلا أن دوائر الألم تلعب دوراً حيوياً في بقائنا على قيد الحياة [48، 187]، لأن هذا الإحساس هو الذي يجبرنا على التصرف رغم أنفنا من أجل الهروب من أي خطر محتمل.

يعد الألم **العَرَض** الأول في معظم الأمراض [208، 209]. ويكتسي وصفه السريري أهمية كبرى للوصول إلى تشخيص دقيق ومن ثم علاج مناسب. ومع ذلك، يمكن للألم أن يكون **مفرطاً** وغير محتمل إلى درجة أنه يصبح داءً في حد ذاته. ويمكن، بل ويجب وضع العديد من الاستراتيجيات العلاجية لتجنيب المريض شدة المعاناة.

1. الفيزيولوجيا المرضية للألم:

1 .1. من الأطراف إلى الجهاز العصبي المركزي:

تنتج الرسالة الألمية (Nociceptive) [107] عن تحفيز مؤلم على مستوى النهايات العصبية للبنى الجلدية [69]، أو العضلية، أو المفصلية، أو الحشوية Visceral. ثم يتم نقل هذه الرسالة عبر مسارات عصبية واردة نحو الجهاز العصبي المركزي [1، 4].

تلعب **مستقبلات الألم متعددة الوسائط** (التي يتم تنشيطها بواسطة منبهات ميكانيكية وحرارية وكيميائية) و**ألياف C** اللاخاعية دوراً رئيسياً في التقاط وترميز شدة الألم الجلدي وإرسال إشارتها. وتتميز ألياف C هذه بأنها لاخاعية بقطر أصغر من 1 ميكرومتر [3] و**سرعة توصيل بطيئة** أقل من 2 متر/ثانية. وتشارك أنواع أخرى من الألياف أيضاً في توصيل إشارات الألم، مثل ألياف **A دلتا** (قليلة النخاعين) [57].

بعد مسارها في الأعصاب المحيطية، تنضم الألياف الواردة لمستقبلات الألم إلى الجهاز العصبي المركزي [41] على مستوى **الجذور الخلفية** للنخاع الشوكي أو على مستوى جذع الدماغ بالنسبة للأعصاب القحفية. تقوم **المادة P** (الناقل العصبي الرئيسي للألم) والغلوتامات باستثارة عصبونات **القرون الظهرية** للنخاع [1، 38، 107]. ثم تتبع السيالة الألمية **المسار الشوكي المهادي** Spinothalamic Pathway **(خارج الفتيل)** (Extralemniscal) [145] الخاص بالألم والحرارة.

2. 1. تعديل الإشارات الألمية:

بمجرد وصول الرسالة الألمية من المحيط إلى الجهاز العصبي المركزي، يتم تعديلها بواسطة آليات تحكم مختلفة [35].

تقوم الألياف الواردة **(A ألفا وA بيتا)** التي تنقل رسائل اللمس بتثبيط inhibit استقبال الألم على المستوى النخاعي. هذا يفسر سلوكنا المتمثل في لمس المكان الذي تألمنا فيه فور وقوع الحادث. يمكن أن تكون هذه الظواهر المثبطة **قبل مشبكية** أو **بعد مشبكية** (نظام **البوابة** Gate Control[39]).

على مستوى جذع الدماغ، توجد عصبونات تشكل أصل مسارات نازلة مثبطة [38، 107] ، على سبيل المثال تلك الموجودة على مستوى المادة **الرمادية المحيطة بالمسال** [3] Periaqueductal Gray (PAG) . وتؤدي هذه العصبونات، من خلال غلق المسارات الألمية، إلى تسكين الألم على مستوى المنطقة المؤلمة.

2. أنواع الألم المختلفة:

2 .1. حسب آلية الألم:

أ. ألم استقبالي:

ويمثل (Nociceptive Pain) النموذج الكلاسيكي لاستقبال وإرسال وإدراك الألم وفقاً للآليات المذكورة أعلاه [69].

ب.ألم عصبي المنشأ:

يقال (Neurogenic Pain) عن الآلام التي لا تنتج عن آفات نسيجية، بل تعود إلى انقطاع في المسارات الألمية مما يؤدي إلى اضطراب في نظام الإرسال [207].

ت.ألم نفسي المنشأ:

(Psychogenic Pain) يقال عن الآلام التي ليس لها أي تفسير عضوي [207].

ث.آلام الرجيعة:

(Referred Pain) تتلقى ألياف المسار الشوكي المهادي أحياناً واردات متقاربة من الجلد ومن بعض الأحشاء في آن واحد. وفي حالة استقبال سيالة ألمية، ينسب الدماغ مصدر التنبيه إلى الجلد الذي يعد الأكثر تعرضاً للاستثارة فعليا. وهذه هي الحالة، على سبيل المثال، أثناء احتشاء عضلة القلب حيث يشعر المريض بألم في اليد اليسرى والفك السفلي رغم عدم وجود آفة على مستواهما [3، 209].

2 .2. حسب تطور الألم:

- ألم حاد (Acute Pain) [48].
- ألم مزمن (Chronic Pain) [69].

3. تقييم الألم:

3 .1. السلم اللفظي البسيط:

Verbal Rating Scale (VRS) يُطلب من المريض لفظياً تقييم الألم وفقاً لـ 4 إلى 5 فئات ينتج عنها درجة؛ 0: لا يوجد ألم، 1: خفيف، 2: متوسط، 3: شديد، 4: شديد للغاية [210].

3 .2. السلم الرقمي:

يسمح هذا السلم Numerical Rating Scale (NRS) للمريض بتدوين درجة الألم مع العلم أن الدرجة الدنيا هي 0 والدرجة القصوى غير المتحملة هي 10 [208].

3 .3. السلم البصري التناظري:

وهو Visual Analogue Scale (VAS) عبارة عن مسطرة تعرض من جهة خطاً ذاتياً ومن الجهة الأخرى مسطرة مدرجة بـ 100 مم. يقوم المريض برسم خط أو تحريك المؤشر بناءً على شدة الألم من (لا يوجد ألم) إلى (أقصى ألم يمكن تخيله). ويقوم مقدم الرعاية بمطابقة التدوين الموجود في الخلف مع حركة مؤشر المسطرة [91، 179].

3 .4. طرق أخرى تسمى "متعددة الأبعاد":

تضم هذه الفئة عدة أنواع من الاستبيانات ومقاييس السلوك [208].

لا داعي للتأكيد على ذاتية الوسائل المذكورة أعلاه في تقييم الألم، فهي تعد عناصر توجيهية ومتابعة للتطور وليست مقاييس مطلقة.

4. العلاجات المسكنة للألم:

يجب أن تستهدف التدابير العلاجية قبل كل شيء أصل الألم، ولكن يجب أن تهدف أيضاً إلى إراحة المريض [69]. صنفت منظمة الصحة العالمية المواد المسكنة المختلفة إلى ثلاثة مستويات حسب نشاطها. ويُنصح باتباع هذه الاستراتيجية "خطوة بخطوة" في التكفل بالألم [91].

4 .1. المستوى 1:

الباراسيتامول ومضادات الالتهاب غير الستيرويدية Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs (NSAIDs) مثل الأسبرين، والإيبوبروفين، والنوراميدوبيرين... في حالة الألم الذي يعتبره الطبيب خفيفاً أو متوسطاً، يجب وصف هذه الأدوية أولاً.

تعمل هذه الأدوية بشكل أساسي عن طريق تثبيط **إنزيم الأكسدة الحلقية** (Cyclo-oxygenase)، وهو إنزيم مسؤول عن سلسلة من التفاعلات الكيميائية التي تؤدي، من بين أمور أخرى، إلى الألم.

تتمثل الآثار الجانبية الأكثر شيوعاً لهذه الأدوية في اضطرابات المعدة بشكل خاص، ولكن قد تحدث اضطرابات أخرى خطيرة جداً في حالة تجاوز الجرعة.

4 .2. المستوى 2:

المسكنات الأفيونية الضعيفة [211]، وهي مشتقات (مخففة) من الأفيون والمورفين، مثل الكوديين، والديهايدروكوديين، والديكستروبروبوكسيفين، والترامادول...

غالباً ما يتم دمج الكوديين والديكستروبروبوكسيفين مع مسكنات من المستوى 1، لأن أنماط عملها مختلفة ومتكاملة، ويكون فعلها تآزرياً. يعمل هذا النوع من المواد على مستوى الجهاز العصبي المركزي على مستقبلات نوعية مسؤولة عن إلغاء الألم.

تشمل الآثار الجانبية الرئيسية: الإمساك، والنعاس، والغثيان، والقيء، بل وحتى صعوبات تنفسية. ويعرض هذا النوع من المركبات لخطر **الاعتماد البدني** Physical Dependence.

4 .3. المستوى 3:

المسكنات الأفيونية القوية، المورفين [48، 211] ومشتقاته. تمتلك هذه الأدوية نفس الخصائص ونفس آلية العمل كسابقتها، ولكنها أكثر قوة. وهي تُستخدم في حالات الألم الشديد أو المستعصي على مسكنات المستوى 2. ولها نفس الآثار الجانبية للمسكنات الأفيونية الضعيفة ويمكن أن تؤدي إلى نفس مشكلات الاعتماد.

الوهن العضلي الوبيل Myasthenia Gravis (MG) [39، 41، 212]، من اللاتينية [219] **وتعني (ضعف عضلي شديد)**، مرض مناعي ذاتي مزمن نادر نسبياً يصيب النساء بشكل تفضيلي [178].

يرتبط الوهن العضلي الوبيل بخلل في إرسال السيالة العصبية بين النهايات العصبية للعصبونات المحركة والألياف العضلية [219]. ويظهر على شكل ضعف عضلي يتفاقم عند الجهد ويتحسن عند الراحة. وتكمن خطورته في خطر حدوث مضاعفات تنفسية [69] قد تهدد حياة المريض.

1. الفيزيولوجيا المرضية:

ينتج خلل الإرسال العصبي العضلي عن انغلاق مستقبلات الأسيتيل كولين Acetylcholine (AChR) Receptors على مستوى **الصفيحة المحركة** بواسطة أجسام مضادة ذاتية ضد مستقبلات الأسيتيل كولين (AChR-Ab) Anti-Acetylcholine Receptor Antibodies [218].

إلى جانب هذا **العامل الخلطي** (Humoral Factor)، من الثابت أن **الغدة الزعترية** (Thymus) تلعب دوراً مهماً في تبلور الوهن العضلي الوبيل [187]. حيث يحمل حوالي 10% من المصابين بالوهن العضلي **ورماً زعترياً** (Thymoma)، ويعاني مريضان من كل ثلاثة من **فرط تنسج زعتري** (Thymic Hyperplasia) [185].

وقد يكون لهذه الاضطرابات المناعية **ركيزة وراثية** [220]، حيث يبدو أن الوهن العضلي الوبيل مرتبط بنمط ظاهري **لمستضد الكريات البيضاء البشرية** Human Leukocyte Antigen (HLA) يختلف باختلاف ما إذا كان الشكل يصيب النساء الشابات أو شكلاً متأخراً.

2. التشخيص:

في نصف الحالات، تكون العلامات الأولى **عينية**، مع **شفع** (Diplopia) **(رؤية مزدوجة)** أو **إطراق** (Ptosis) **(سقوط الأجفان العلوية)** [107]. وفي الحالات الأخرى، تظهر البداية من خلال صعوبة في التصويت phonation، أو المضغ، أو ضعف في عضلات الأطراف.

في الوهن العضلي الوبيل، يزداد الضعف العضلي عند الجهد [187] ويمكن أن يؤدي إلى شلل جزئي في العضلة المعنية. وتُحَسِّنُ الراحة القوة العضلية [75]. ومع ذلك، في الأشكال الخطيرة من المرض، تنخفض القوة العضلية بشكل دائم ولا تتحسن، حتى بعد الراحة الطويلة.

يجب استكمال الفحص السريري بإجراء اختبار مضادات الكولين استراز **(بروستيجمين)** الذي تشكل إيجابيته حجة تشخيصية مهمة لصالح الوهن العضلي الوبيل، ولكن سلبيته لا تستبعد التشخيص [207].

3. العلاج:

يمكن علاج الوهن العضلي الوبيل بواسطة الأدوية المثبطة للكولين استراز (Cholinesterase Inhibitors). تمنع هذه الأدوية تحلل الأسيتيل كولين، وبالتالي تطيل مدة عمل الأسيتيل كولين على مستقبلات الصفيحة المحركة [212].

في حالة وجود ورم زعتري، يتم إجراء استئصال للغدة الزعترية (Thymectomy). وتُستخدم أحياناً معدلات المناعة (Immunomodulators): مثل حقن الغلوبولينات المناعية الوريدية Intravenous (IVIG) Immunoglobulin والكورتيكوستيرويدات.

التصلب المتعدد Multiple Sclerosis (MS) [41، 69، 86، 187، 212] مرض عصبي التهابي **مناعي** ذاتي مزمن. هو اعتلال متعدد العوامل ترتبط مظاهره السريرية **بزوال النخاعين** (Demyelination) [213] من الألياف العصبية للمادة البيضاء في الجهاز العصبي **المركزي** (الدماغ، والنخاع الشوكي، والعصب البصري، حيث يعد هذا الأخير جزءاً من الجهاز العصبي المركزي [41])

يعد تعريف التصلب المتعدد تشريحياً في المقام الأول، فوصف الآفات هو الذي أكسبه هذا الاسم [74].

1. الفيزيولوجيا المرضية:

التصلب المتعدد اعتلال مزيل للنخاعين ترتبط أعراضه بتدمير النخاعين (Myelin) [107، 185] مع الحفاظ على المحاور العصبية (**الانفصال النخاعيني المحوري** Myelin-Axonal Dissociation [31، 36، 107، 179]).

إنه مرض التهابي [182] كما تشهد على ذلك الآفات الحديثة حيث تصاحب الوذمة Edema والارتشاح الالتهابي Inflammatory Infiltrates التحلل النشط لأغماد النخاعين [31]. وفي الآفات الأقدم، نجد الالتهاب في محيط الآفات، أي في مناطق تقدمها: الخلايا اللمفاوية T من نوع (CD4)، ثم البلعاميات والخلايا اللمفاوية B التي تفرز الأجسام المضادة (IgM ثم IgG) [74].

أما الآفات القديمة، فهي مقر لتكاثر الخلايا النجمية (Astrocytes) الذي يميز تصلب النسيج العصبي (**اللويحات**). وما وصفه شاركو Charcot عام 1868 [214] ليس سوى **المرحلة الندبية** Scarring Phase للآفات.

تكون اللويحات متعددة ومنتشرة في الجهاز العصبي المركزي. ويمكن أن تصيب أي قطاع من المادة البيضاء، ولكن مع وجود **مواقع تفضيلية**: جذع الدماغ والمناطق المحيطة بالبطينات [36].

وتتمثل خصوصية هذا المرض في تطوره المتميز بمراحل من **الإنتكاسات** (Relapses) [178] (عند تشكل منطقة جديدة من زوال النخاعين) و**الهجوع** Remission (عندما تندمل اللويحة) مع **إعادة نخاعنة** (Remyelination) جزئية [107] وتحسن مذهل للأعراض أحياناً.

أثناء هجمة المرض، يتحطم غمد النخاعين. ويؤدي زوال النخاعين هذا إلى اختلال في التوصيل الكهربائي في المحور العصبي، مما يؤدي إلى علامات سريرية متنوعة تظهر في غضون أيام قليلة.

ولسوء الحظ، مع مرور الوقت، تتراجع وتصح الهجمات الجديدة لكن بشكل أقل جودة، وتنتهي الاختلالات العصبية بعدم التراجع، مما يشكل آفات نهائية.

يتغير إيقاع مراحل الإنتكاسات والهجوع من فرد لآخر، مما يجعل المرض لدى البعض يبقى لفترة طويلة جداً دون تأثير كبير خارج فترات الهجمات، بينما يحدث لدى آخرين تدهور سريع في جودة الحياة مرتبط بهجمات

متكررة وقليلة التراجع. كما يوجد شكل تطوري يتمثل في هجمة دائمة.

لدى المرضى الذين يعانون من التصلب المتعدد، تؤدي **الحرارة** إلى اختلال في التوصيل العصبي وبالتالي تفاقم الأعراض أثناء الهجمات **ظاهرة أُتهوف** (Uhthoff's Phenomenon) [512].

2. الأسباب:

يبدو أنه لا يوجد سبب وحيد للتصلب المتعدد، بل يجب التسليم بأنه مرض متعدد العوامل بدأت تظهر أدلة على بعضها: المناعة الذاتية، والعوامل الوراثية، والعوامل البيئية [213] ...

إنه مرض مناعي ذاتي، مرتبط بالنشاط غير الطبيعي لبعض الأجسام المضادة الموجهة ضد غمد النخاعين للألياف العصبية، وينطلق بعد حدث ربما يكون فيروسياً [75]، لدى شخص مهيإ وراثياً للمرض [216].

يتميز التصلب المتعدد بمعدل إصابة مرتفع لدى النساء والبالغين الشباب.

3. التشخيص:

غالباً ما تشمل العلامات الأولى للمرض انخفاضاً مؤقتاً في **حدة الإبصار** و**مذلاً** Paresthesia (**تنميل** أو **وخز**) على مستوى الذراعين. وبعد بضع أيام، تختفي هذه الأعراض، ثم يستقر **شفع** Diplopia واضطرابات في التوازن.

يمكن للمرضى المصابين بالتصلب المتعدد أن يظهروا اضطرابات حركية (ضعف عضلي، وانقباضات وتشنجات عضلية، وشلل في طرف أو أكثر، ورنح Ataxia ، واضطرابات في الكلام أو الكتابة) تصاحبها أحياناً اضطرابات حسية (تنميل، وأحاسيس غير طبيعية في جزء من الجسم، وفي الأطراف، وفي اليدين والقدمين والوجه، وآلام، وصداع منتشر، ودوار، وفقدان توازن).

لا يوجد اختبار نوعي للتصلب المتعدد [212]. وتسمح الفحوصات الحديثة بالتشخيص المبكر ولكن غالباً ما تكون البيانات السريرية كافية بشكل عام: فالتطور عبر هجمات متتابعة يوحي بشدة بالتشخيص. ويلزم مرور مدة 24 ساعة للحديث عن هجمة.

يعد الإنتشار Dissemination In Space المعيار الثاني [212]، حيث يجب إثبات أن المريض يعاني من **آفتين** على الأقل في الجهاز العصبي المركزي. والحالة السريرية المثالية التي تسمح بالتشخيص هي الإصابة المتزامنة للمحور العصبي والعصب البصري. وفي الحالات الأخرى، يلزم اللجوء إلى الفحوصات التكميلية لإثبات هذا **التعدد البؤري**. مع العلم أن الآفات التي يتم إظهارها غالباً ما تكون أكثر تشتتاً مما توحي به الحالة السريرية.

يعد تحليل السائل الدماغي الشوكي [91، 215] ذا فائدة تشخيصية قيمة عندما يظهر وجود **التهاب**.

تسمح **الكمونات المستثارة** Evoked Potentials (EP) [31، 216] البصرية، والسمعية، والحسية، ومؤخراً الكمونات المستثارة الحركية بالكشف عن معاناة تحت سريرية Subclinical للمسارات المحورية المتؤثرة. الهدف هو إظهار

التعدد البؤري للآفات. إذا كانت الحالة السريرية وحدها تسمح بتحقيق هذا الهدف، فلا فائدة من إجرائها.

التصوير بالرنين المغناطيسي [183] هو الفحص المختار الثاني، حيث يسمح بإظهار التعدد البؤري للآفات بشكل مبكر حتى قبل بدء ظهور الأعراض [215].

4. العلاج:

يهدف علاج التصلب المتعدد إلى تحقيق هدفين: إبطاء تقدم المرض وإراحة المريض. ومع ذلك، لا يزال من المستحيل الشفاء من التصلب المتعدد [217].

لذلك فإن العلاج يكون عرضياً [216] على الرغم من أنه يمكن أن يؤثر على تطور المرض: الكورتيكوستيرويدات، ومثبطات المناعة، ومضادات التشنج، ومرخيات العضلات، ومضادات الاكتئاب، والإنترفيرون بيتا...

يصاحب العلاج الدوائي راحة، وجلسات علاج طبيعي، وتدليك علاجي، وإعادة تأهيل (علاج وظيفي، وعلاج طبيعي).

يجب أن نظل موضوعيين تجاه فاعلية العلاجات، لا سيما في بداية المرض، مع مراعاة الطابع التراجعي **التلقائي** للهجمات.

بالنسبة للأشخاص المصابين بالمرض، من الممكن كبح ظهور الأعراض عن طريق الحصول على قسط كافٍ من الراحة [212]، وتجنب مصادر التوتر والتقليل من التعرض للحرارة والشمس، وممارسة التمارين بانتظام والحفاظ على نظام غذائي صحي ومتوازن.

تعد الحبسة الكلامية Aphasia [75، 185، 198، 221] مصطلحاً من أصل يوناني يعني (فقدان الكلام) [222]. وهي تشير إلى فقدان مكتسب، جزئي أو كلي، لملكة التعبير و/أو فهم اللغة، سواء كانت منطوقة أو مكتوبة، رغم السلامة التشريحية والوظيفية لأعضاء التصويت (اللسان، الحنجرة) وبصرف النظر عن أي إصابة عصبية ذات منشأ حسي (دون صعوبات في السمع أو الرؤية) أو حركي (القشرة المحركة الأولية) [185].

1. الفيزيولوجيا المرضية:

تحدث الحبسة الكلامية نتيجة لآفة في نصف الكرة المخية **الأيسر** المهيمن على اللغة. وتظهر هذه الآفة عقب إصابة في الدماغ: ورم، أو رضح قحفي Head Trauma، أو في أغلب الأحيان **سكتة دماغية** (Stroke)[198].

لا يفقد معظم الأشخاص المصابين بالحبسة القدرة على الكلام بشكل كامل. فالحبسة الكلامية هي اضطراب لغوي يمكن أن يقدم تباينات ملحوظة: فبعض المرضى لا يظهرون سوى تردد طفيف في إيجاد كلماتهم، بينما يفقد آخرون بشكل شبه كامل ملكة التعبير، وفهم ما يقال لهم، والقراءة و/أو الكتابة، في حين تظل الملكات الأخرى مثل الذاكرة أو التوجه محفوظة جيداً.

2. التصنيف:

توجد عدة أنواع من الحبسات الكلامية وفقاً للآليات الكامنة والترجمة السريرية للاختلالات الدماغية [50]. يمكن تصنيف الحبسات الكلامية إلى ثلاث فئات رئيسية [212]:

1 .1. الحبسة الكلامية الحسية، أو حبسة فيرنيكه:

يتميز هذا النوع من الحبسة بعجز في فهم اللغة [5، 198]، وصعوبة في تفسير معنى الكلمات والجمل. وهي تتسم باضطرابات شديدة جداً في الفهم وبتعبير لفظي يستخدم كلمات غير ملائمة، مع استخدام مفردات جديدة (الكلمات المحدثة) Neologism [50]. ولا يدرك المريض إصابته [223].

ويُصادف هذا النوع من الحبسة بشكل أساسي عند حدوث آفة على مستوى نصف الكرة المخية الأيسر تصيب باحة فيرنيكه Wernicke's area.

1 .2. الحبسة الكلامية الحركية أو حبسة بروكا:

يتميز هذا النوع من الحبسة بفقدان الكلام [49]، وصعوبة في التعبير عن الأفكار. وتتميز باضطرابات شفهية ومكتوبة في حين يكون **الفهم جيداً** إلى حد ما.

يعاني المريض عموماً من مشكلات في النطق بدرجات متفاوتة، ويستخدم جملاً غير مهيكلة. ويجد صعوبة في إيجاد الكلمات الدقيقة للتعبير عن نفسه، كما أن الكلمات المستخدمة تكون غير ملائمة.

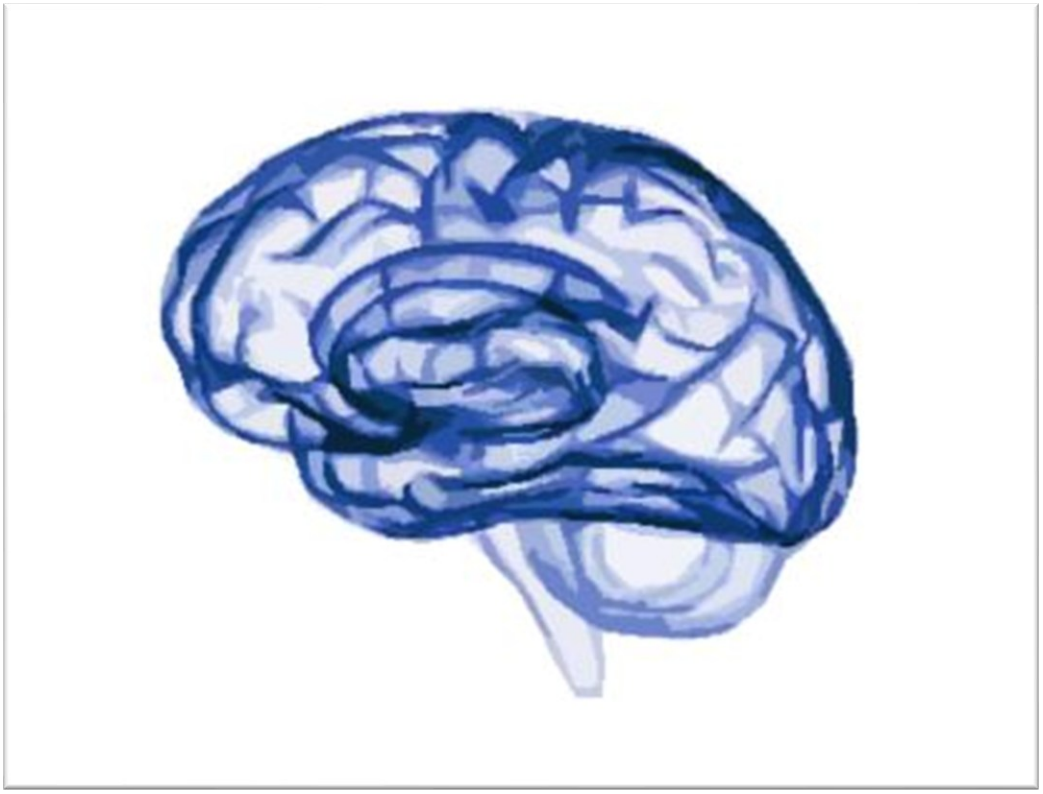
ويُصادف هذا النوع من الحبسة عموماً أثناء حدوث **فالج أيمن** (Right Hemiplegia) (شلل يصيب النصف الأيمن من الجسم)، والذي تكون فيه باحة بروكا مصابة.

1 .3. الحبسة التوصيلية:

يُصادف هذا النوع من الحبسة غالباً عند وجود آفة تتعلق **بالحزمة المقوسة** (Arcuate Fasciculus) [221] التي تربط باحة فيرنيكه بباحة بروكا [198].

وتتميز الحبسة التوصيلية بصعوبات في التعبير عن اللغة واستقبالها. وتكون الرعاية لهذا النوع من الحبسة غالباً صعبة للغاية، خاصة عندما تكون الاضطرابات شديدة.

الخاتمة



الخاتمة 151

الخاتمة

"الفن طويل، والحياة قصيرة، والفرصة عابرة، والتجربة خادعة، والحكم صعب." أبقراط - القول المأثور الأول.

إن الجهاز العصبي مليء بالألغاز والأسرار. في كل مرة نتمكن فيها من تفسير ظاهرة ما، تضعنا مئات الأسئلة الأخرى على المحك.

كيف يمكن، انطلاقاً من هذه الكتلة الخامدة التي تمثل الدماغ، أن تتبلور فكرة، وتُصاغ رؤية، ويُبنى وعي وشعور عميق بالفردية؟

كيف تمنحنا الدوائر الكهربائية هذا الوهم الذاتي الهائل بـ **"الأنا"**؟ وكيف لهذه الكتلة التي تزن 1.3 كجم أن تجعل منا -نحن البشر- كائنات استثنائية وقوية إلى هذا الحد؟ ...

هناك الكثير مما يمكن قوله عن الجهاز العصبي، وما تناولناه في هذا العمل لا يمثل بالتأكيد إلا الشيء القليل، بل لا شيء، مقارنة بما هو معروف اليوم؛

ومن المرجح أن مجموع المعارف البشرية في هذا المجال حتى يومنا هذا ليس سوى جزء يسير مما ينتظرنا اكتشافه.

إن فهم آلية عمل الجهاز العصبي يتطلب مقاربة متعددة التخصصات تشمل كلاً من علم الأحياء، وعلم النفس، وطب الأعصاب، والفلسفة، وعلم الاجتماع، والتاريخ... وحتى العلوم الحاسوبية (Computer Science)، لأن هذه الأخيرة تظهر العديد من أوجه التشابه مع آلية عمل الجهاز العصبي.

الملخص

الملخص

"نورواماتيك" (Neuromatiq)، سند سمعي بصري وتفاعلي حول الفسيولوجيا العصبية واضطراباتها، مشروع أطروحة دكتوراه في الطب موجه لطلبة الطب والتخصصات ذات الصلة، ويهدف إلى تبسيط فهم آلية عمل الجهاز العصبي وعرضها بطريقة جذابة وموجزة.

إن فهم آلية عمل الجهاز العصبي مهمة شاقة. ورغم توفر عدد كبير من المؤلفات المرجعية حول الفسيولوجيا العصبية، إلا أنها نادراً ما تخرج عن القالب التقليدي المكون من نصوص وصور ثابتة.

آمل، من خلال "نورواماتيك" (Neuromatiq)، تقديم الجهاز العصبي من زاوية مختلفة، بالاعتماد على فيديوهات ثلاثية الأبعاد Three-Dimensional (3D) ورسوم متحركة تفاعلية.

يتم في هذه الدعامة تناول الموضوعات بترتيب متزايد التعقيد، بدءاً بمراجعة تشريحية، ثم المفاهيم الأساسية، تليها الأنظمة الحسية والحركية، وصولاً إلى الوظائف العليا التي تمثل الجانب الأكثر صعوبة في الفسيولوجيا العصبية.

سيكون من غير المكتمل تناول الفسيولوجيا العصبية في أطروحة طبية دون الحديث عن تطبيقاتها في الجانب المرضي. لهذا السبب، يعرض فصل مخصص للاضطرابات العصبية مختلف الجوانب الفسيولوجية المرضية (Physiopathological Aspects) للأمراض الأكثر شيوعاً في طب الأعصاب.

لا يمكن لأي مجلد أو كتاب وحده أن يكون كافياً لفهم آلية عمل الجهاز العصبي. ولهذا السبب، تم تعزيز نص الأطروحة بروابط مرجعية تسمح للمستخدم بالتعمق في كل مسألة اخترنا عدم تفصيلها هنا.

ردود الفعل

على الرغم من التعليقات السلبية من حولي من قبيل "... إنك تضيع وقتك..." أو "... لا فائدة من هذا..."؛ فقد قوبلت مقاطع الفيديو الخاصة بهذا البرنامج، والتي نُشرت على شبكة الإنترنت، باهتمام كبير وإعجاب شديد من قبل أساتذة الطب، والمعلمين، والطلاب، والباحثين وغيرهم عبر أنحاء العالم.

لقد تلقيت آلاف الرسائل وآلاف رسائل البريد الإلكتروني التي حفزتني على الاستمرار في هذا المسار، سأكتفي هنا بذكر أكثرها تأثيراً في نفسي، وإلا فإنه من المستحيل إدراج كافة التعليقات.

"Mohammed, Thank you for making these medical videos that are informative yet presented in such a way that allows for people who are not trained in medicine to understand the way the human body functions.

The combination of the audio and visual presentation provided a format that kept the material not only educational, but entertaining and enjoyable as well. By watching your videos I learned about the amazingly complex and precise way the human being functions in a way I never would have had the opportunity to know.

Your work is an inspiration. " *Maureen Conner Tenore*, *États-Unis*.

" Il y a beaucoup d'heures de travail .Ce sont des animations très bien faite avec des explications en français .Ils sont très rare merci pour tout. Je fais mon bac en sciences infirmiers(es) et cela m'a été extrêmement utile je suis visuel. Merci et continue ton implication au niveau de la médecine. "
Jacobine, *Canada*.

" Bonjour Monsieur,

Je suis enseignant dans un centre de formation professionnelle se situant dans la ville de Québec, province de Québec au Canada. J'aimerais savoir si vous me donniez la permission d'utiliser quelques vidéos que vous avez créées sur les cellules nerveuses afin de les présenter à des étudiants qui seront éventuellement infirmiers. Merci de votre réponse. Bonne journée. " *Jean-François Deschênes*, *Canada*.

" Je suis des études de psychologie et ces animations en langue française sont vraiment magnifiques et aident à retenir chaque aire. Il y a déjà beaucoup de choses en anglais et ces vidéos en français sur Youtube sont une rareté vraiment très appréciable. Merci. "
Musiinfsk, *France*.

" Bravo! J'ai suivi moi aussi des études de psychologie il y a 25 ans... Si ces merveilles avaient existé, cela nous aurait vraiment facilités la vie.... C'est un travail fantastique et je suis fière de le regarder en français et de pouvoir le partager avec ma fille de 16 ans, qui pourra comprendre bien plus vite que je n'ai pu le faire. Merci infiniment. "
Mirabilis, *France*.

" J'ai l'impression d'avoir trouvé un trésor. vous ne savez pas à quel point vos animations vont m'aider dans mon travail d'enseignant d'SVT. je suis fier de vous.

PS : SVT (sciences de la vie et de la terre).au Maroc, c'est la nouvelle appellation des sciences naturelles. " *Enseignant de Science de la vie et de la terre*, *Maroc*.

“ Je suis en première année, en Kinésiologie, à l'Université de Montréal. Je tenais simplement à vous féliciter pour tout votre travail, Un gros MERCI! pour ces vidéos éducatives en français… Mon prof a bien aimé cette vidéo aussi parce qu'il nous l'a partagé dans ses notes de cours! ” *Melyssa*, *Canada*.

“ Bonjour ! Passant mon partiel de neurobiologie dans 2 jours, je dois vous remercier pour ce travail qui m'a permis de comprendre les 3/4 de cours et de diapos que je ne saisissais pas ! Merci! ” *Etudiante*, *France*.

“ Bonjour, Merci beaucoup pour ce magnifique travail et pour votre générosité à le partager. Je travaille dans le champ de la psychologie et de la psychothérapie, vos présentations me sont précieuses. ” *Thildeswingout*, *France*.

“ Bonjour Medbenmedben, J'exerce la profession d'orthophoniste depuis 20 ans. Quand j'ai fait mes études, j'ai vraiment galéré pour me représenter tout ce que tu montres en3D... Je salue un travail que je trouve très beau visuellement, ludique, et qui rend les apprentissages beaucoup plus simples. J'ai transmis les liens vers tes vidéos à des personnes étudiant l'orthophonie actuellement. Elles t'en seront certainement reconnaissantes. Quand la passion rend service... Merci mille fois. Vive le Maroc! ” *Orthophoniste*, *France*.

“ C'est vrai que tes vidéos sont super bien faites et agréables à regarder, on comprend beaucoup mieux de la manière dont tu expliques. bravo et merci!!! c'est vraiment génial!! ” *Beehyenneprod*, *France*.

“ Merci beaucoup, ta vidéo m'a beaucoup servis à moi et mon collègue pour nos révisions. Félicitation pour cette synthèse en 12 minutes !

On aurait juste voulu avoir un peu plus de précision concernant les mécanismes induisant l'hyperpolarisation lors d'un PA mais c'est déjà génial! ” *Raitomea*, *France*.

“ C'est un travail excellent... la structure est claire, l'information précise et, en plus, un véritable artiste dans la présentation. J'aimerais pouvoir aussi lire le texte en français pour votre vidéo "transmission neuromusculaire". Merci et respect. ” *ferrc75*, *France*.

“ C'est vraiment super! ça m’aide beaucoup car je n’arrivais pas à bien situer les différentes structures en 3D, maintenant, tout est clair! :). C'est très bien fait! Je pense que vous aidez beaucoup d'étudiants! ” *SnowMarine*, *Belgique*.

“ Mais ce vidéo est simplement incroyable. Merci !!! J'ai un test de bio demain et cela fait une bonne révision. ” *Carlos*, *Canada*.

“ C'est PARFAIT ! je suis élève à l'école d'orthophonie de Paris, et il s'agit exactement de notre programme, en plus synthétique. Les images sont vraiment géniales pour se repérer dans l'espace, bien mieux qu'un schéma illisible à plat ! ” *cstanzie*, *France*.

“ This is an excellent video!! I'm in nursing school and this was very very helpful!! Many thanks! ” *native1910*, *États-Unis*.

“ Thank you so much. I finally understood the process of the Neuromuscular Junction. Thank You. Please post more videos related to Anatomy and Physiology.

Great explanation. ” *Grlena*, *États-Unis*.

“ An exceptional video. 5/5. It's not too simple that it avoids detail, but not so complicated that it’s hard to understand. A well rounded video. ” *Urbanfire*, *Australie*.

" Very nice explanation. Helped me a lot with my studies and visualizing the process. Thank you! " *Pikesbeach*, *États-Unis*.

" Great video (description) Could you please continue download them in English.... truly understand and follow you teaching method. Thank you! " *Paopats*, *États-Unis*.

" This was an absolutely amazing video. I too was looking for something that explained in a 3-dimensional way that was detailed enough that I would walk away with the whole picture but not too difficult to understand. " *Kcj*, *États-Unis*.

" It is one of the best and didactic explanation that define a neuromuscular junction. Thank you very much.
A great and prosperous future is waiting for you. " *Mizrahi*, *Palestine*.

" This is superb. I am taking a course in the brain, and this is the only video I've seen that explains the whole process, and it does so with beautiful visuals and beautiful and patient narration. Also the fact that it describes muscles makes it so much more tangible to me, so I can easily make the leap to neurons. " *Omu*, *États-Unis*.

" Tout simplement GENIAL ! Très bien expliqué et schématisé Je suis à 7h de mon concours et vos vidéos sont en train une par une de me permettre de faire la différence ! Tout est beaucoup plus clair ! Merci beaucoup ! " *Amfibiun*, *France*.

" Merciiiiiii pour ces vidéos !! moi qui ai tant de mal à me représenter ces choses abstraites, là c'est une aide très précieuse.. Continuez, c'est génial !! " *Arsen*, *France*.

" Excellent travail monsieur. Je comprends mieux le système maintenant. "
Rukash, *Sénégal*.

" Super! Merci pour ces explications très utiles à ma formation d'infirmière! "
Huddypowa, *Suisse*.

" Ton travail est excellent, c'est exactement ce dont je rêvais pour bien visualiser mes cours de neuro-anatomie. Merci beaucoup!!! " *Chicatube*, *France*.

" Bonjour, je trouve vos vidéo très intéressant. Je me cherche de la documentation sur différents sujets, car je suis enseignante pour des infirmières, au Canada. Vos vidéos son complets et simples à comprendre. Es-ce possible d'utiliser vos vidéos dans mon cours sur la cellule, la génétique et le système neurosensoriel?
Je vous félicite encore pour votre travail, c'est très intéressant. En espérant une affirmation de votre part bientôt... " *Valérie Perreault*, *Canada*.

" I am proud of you ! You do such good work masha'allah. I am proud to be Moroccan, and I learn great things about medicine by watching your videos. A professor is using your video to show us structures of certain cells. Keep up the good work ! " *Solidus*, *France*.

" Bonsoir, je viens de visionner votre animation sur la description du LCR. Félicitation pour votre création pédagogique, je la proposerai maintenant dans mes cours. Je suis enseignant chercheur sur la dynamique du LCR et son implication dans les pathologies cérébrales. Si cela vous intéresse sachez que je peux vous fournir des animations représentant l'aspect dynamique de ce liquide vital est encore mystérieux. N'hésitez pas.
Respectueusement ! " *Olivier Balédent*, *France*.

“ Juste pour te remercier pour tes vidéos. je prépare le concours de médecine et je galère un peu mais grâce à tes vidéos je comprends mieux. Merci infiniment. ”

Madelinxs, *France*.

“ Bonsoir, je vous remercie énormément d'avoir déposé ces vidéos, c'est vraiment un excellent travail de votre part, et bien évidemment de notre cher professeur Belahsen. C'est comme ça que notre Faculté va rayonner avec le savoir ce ses professeurs et de ses étudiants. Au fait je suis Naidal un étudiant en 2ème année dans la FMPF. Cordialement. ”

Naidal, *Maroc*.

“ Salam, Vos vidéos sont très riches et bien faites. Bravo pour ce travail. Mon épouse souhaite utiliser certains passages à des fins pédagogiques. Existe-t-il une méthode pour copier certains extraits. Merci d'avance et bonne continuation. ”

Hechmi M'NASRI, *France*.

“ Dear Ben Brahim Mohammed, I found your animation and would like to inquire if we can use parts of it in an educational DVD about the human muscular functions, of course with credits? Thank you for a quick answer. ” *BriggiV*, *Allemagne*.

“ Hi , My Name Is Allan and I'm a student of Sport Science, I Saw some Of your Videos And they Are amazing and well explained. I would like to ask your permission to translate them into my Language (Hebrew) so it could help others with the same interest. I would make sure to make comment as to the source of the videos and their origin. Greetings. ”

Allan, *Australie*.

“ En premier lieu je tiens à vous féliciter pour la qualité de votre travail. C'est justement à ce sujet que je me permets de vous solliciter. M'autoriseriez-vous à utiliser votre travail dans le cadre de mon intervention auprès d'élèves infirmiers ?

Je vous remercie par avance de l'attention que vous porterez à ma requête et vous souhaite une excellente continuation. ” *Skarabunta*, *France*.

“ Hello Mohammed, My name is Erez and I am the manager of a non-profitable educational website for teenagers. I would like, with your permission, to post your video - "neuromuscular junction - motor unit" on my website, and to add Hebrew subtitles (translation only). I will give you proper acknowledgment and add a link to your website.

Many thanks. ” *Erez*, *Palestine*.

“ Dear colleague, I was heavily impressed by your marvelous video animation on the neuromuscular junction. I would really be eager to show this video to my medical and neuroscience students. Is there a possibility to get the video for teaching purposes ? Looking forward to your answer, kind regards. ”

Hannsjörg Schröder, MD, Professor of Anatomy / Neuroanatomy, Department of Anatomy, University of Köln, Kerpener Straße 62, 50924 Köln. *Germany*.

“ Bonjour, j'ai vu votre vidéo en ligne et je la trouve très bien. Seriez-vous d’accord pour me la donner ou prêté, je suis formateur dans le sport.

Merci pour une réponse amicalement. ” *Boxingsavate*, *France*.

المراجع

[1], *Physiologie humaine, Auteur : Lauralee Sherwood, Alain Lockhart, Traduction : Alain Lockhart, Edition : 2, Editeur : De Boeck Université, 2006, Pages : 629 pages.*

[2], *Anatomie clinique : Neuro-anatomie, Volume : 4, Neuro-anatomie, Auteur : Jean Bossy, Edition : 2, Editeur : Birkhäuser, 1990, Pages : 475 pages.*

[3], *Physiologie humaine: les fondements de la médecine, Auteur : Gillian Pocock, Christopher D. Richards, Editeur : Elsevier Masson, 2004, Pages : 638 pages.*

[4], *Physiologie médicale, Auteur : William Ganong, Michel Jobin, Traduction : Michel Jobin, Edition : 2, Editeur : De Boeck Université, 2005, Pages : 850 pages.*

[5], *Neurophysiologie: de la physiologie à l'exploration fonctionnelle, Auteur : Jean-François Vibert, Alain Sébille, Marie-Claude Lavallard-Rousseau..., Editeur : Elsevier Masson, 2005, Pages : 219 pages.*

[6], *The Concise Book of Muscles, Auteur : Chris Jarmey, Edition : 2, illustrée, révisée, Editeur : North Atlantic Books, 2008, Pages : 189 pages.*

[7], *Color Atlas and Textbook of Human Anatomy, Volume : 3, Auteur : Werner Kahle, Michael Frotscher, Edition : 5, illustrée, révisée, Editeur : Thieme, 2003, Pages : 420 pages.*

[8], *Biological Psychology, Auteur : James W. Kalat, Edition : 10, illustrée, révisée, Editeur : Cengage Learning, 2009, Pages : 549 pages.*

[9], *Anatomy Coloring Book, Auteur : Stephanie McCann, Eric Wise, Illustration : Stephanie McCann, Edition : 3, illustrée, Editeur : Kaplan Publishing, 2008, Pages : 384 pages.*

[10], *The human central nervous system, Auteur : Rudolf Nieuwenhuys, Jan Voogd, Chr. van Huijzen, Christiaan van Huijzen, Edition : 4, illustrée, Editeur : Springer, 2008, Pages : 967 pages.*

[11], *Grant's dissector, Auteur : Patrick W. Tank, John Charles Boileau Grant, Edition : 14, illustrée, Editeur : Lippincott Williams & Wilkins, 2008, Pages : 269 pages.*

[12], *Fundamentals of physiology:a human perspective, Auteur : Lauralee Sherwood, Edition : 3, illustrée, Editeur : Cengage Learning, 2006, Pages : 736 pages.*

[13], *The spinal cord: a Christopher and Dana Reeve Foundation text and atlas, Auteur : Charles Watson, George Paxinos, Gulgun Kayalioglu, Edition : illustrée, Editeur : Academic Press, 2008, Pages : 387 pages.*

[14], *Intramedullary spinal cord tumors, Auteur : Georges Fischer, Jacques Brotchi, D. Baleriaux, Edition : illustrée, Editeur : Thieme, 1996, Pages : 115 pages.*

[15], *Brain and Spinal Cord; A Manual for the Study of the Morphology and the Fibre-Tracts..., Auteur : Emil Villiger, Edition : illustrée, Editeur : READ BOOKS, 2007, Pages : 300 pages.*

[16], *Spinal cord medicine: principles and practice, Auteur : Vernon W. Lin, Diana D. Cardenas, Edition : illustrée, Editeur : Demos Medical Publishing, 2003, Pages : 1043 pages.*

[17], *Neuroscience nursing: a spectrum of care, Auteur : Ellen M. Barker, Edition : 3, illustrée, Editeur : Elsevier Health Sciences, 2008, Pages : 788 pages.*

[18], *Evoked spinal cord potentials:an illustrated guide to physiology, pharmacology, and recording techniques, Auteur : Koki Shimoji, William D. Willis, Edition : illustrée, Editeur : Springer Japan KK, Pages : 215 pages.*

[19], *Neuroanatomy*, *Auteur : James D. Fix, Edition : 4, illustrée, Editeur : Lippincott Williams & Wilkins, 2007, Pages : 383 pages.*

[20], *Spina Bifida: Management and Outcome*, *Auteur : M. Memet Özek, Giuseppe Cinalli, Wirginia J. Maixner, Edition : Édition : 1 ,décembre 2007, Editeur : Springer, 2008, Pages : 534 pages.*

[21], *Neurological Differential Diagnosis*, *Auteur : John Patten, Edition : 2 ème édition, Editeur : Springer*

[22], *Spinal imaging:diagnostic imaging of the spine and spinal cord*, *Auteur : Johan W. M. van Goethem, Luc van den Hauwe, Paul M. Parizel, Edition : illustrée, Editeur : Springer Japan, 2007, Pages : 602 pages.*

[23], *Clinical Anesthesia*, *Auteur : Paul G. Barash, Bruce F. Cullen, Robert K. Stoelting, Michael Cahalan, Edition : 6, illustrée, Editeur : Lippincott Williams & Wilkins, 2009, Pages : 1640 pages.*

[24], *Flesh and bones of anatomy*, *Auteur : Susie Whiten, Edition : illustrée, Editeur : Elsevier Health Sciences, 2006, Pages : 184 pages.*

[25], *Surgery of the pediatric spine*, *Auteur : Daniel H. Kim, Stephen L. Huhn, Randal R. Betz, Peter O. Newton, Editeur : Thieme, 2008, Pages : 876 pages.*

[26], *Operative anatomy*, *Auteur : Carol E. H. Scott-Conner, David L. Dawson, Edition : 3, illustrée, Editeur : Lippincott Williams & Wilkins, 2008, Pages : 790 pages.*

[27], *Pocket atlas of human anatomy: based on the international nomenclature*, *Auteur : Heinz Feneis, Wolfgang Dauber, Edition : 4, illustrée, Editeur : Thieme, 2000, Pages : 500 pages.*

[28], *Color atlas of neurology*, *Auteur : Reinhard Rohkamm, Edition : illustrée, Editeur : Thieme, 2004, Pages : 440 pages.*

[29], *Anatomy, Volume : III*, *Auteur : Samar Mitra, Edition : 6, Editeur : Academic Publishers*

[30], *Cunningham's textbook of anatomy*, *Auteur : Daniel John Cunningham, Edition : Originale, 1818, Editeur : W. Wood and company, 1818, Pages : 1577 pages.*

[31], *Neurologie*, *Auteur : Nicolas Danziger, Sonia Alamowitch, Edition : 3, Editeur : Estem, 2004, Pages : 448 pages.*

[32], *Neuroanatomie*, *Auteur : Alan-R Crossman, David Neavy, Editeur : Elsevier Masson, 2004, Pages : 174 pages.*

[33], *Pathologie chirurgicale: Chirurgie générale, vasculaire et endocrinienne*, *Volume : Volume 1 de Pathologie chirurgicale, Auteur : Patrick Boissel, Editeur : Elsevier Masson, 1991, Pages : 451 pages.*

[34], *Yogic Exercises*, *Auteur : S Dutta Ray, Edition : 2003 (Reprint), Editeur : Jaypee Brothers Medical Publishers (P) Ltd., Pages : 198.*

[35], *Anatomie clinique du système nerveux central*, *Auteur : Jean-Michel Prades, Bernard Laurent, Marie-Louise Navez, Edition : 1999, Editeur : Elsevier Masson, 1999, Pages : 260 pages.*

[36], *Manuel d'anatomie et de physiologie*, *Auteur : Sy Nguyen, Anne-Claude Allin-Pfister, Redha Bourouina, Edition : 4, Editeur : Editions Lamarre, 2008, Pages : 421 pages.*

[37], *Encéphale et moelle épinière. Anatomie macroscopique et fonctionnelle*, *Auteur : Claude Maillot, Edition : 2, Editeur : Springer, 2002, Pages : 292 pages.*

[38], *Neurosciences médicales: les bases neuroanatomiques et neurophysiologiques*, *Auteur : Thomas C. Pritchard, Kevin D. Alloway, Edition : 2002, Editeur : De Boeck Université, 2002, Pages :*

528 pages.

[39], *Cerveau et comportement, Auteur : Bryan Kolb, Ian Q. Whishaw, Editeur : De Boeck Université, 2002, Pages : 672 pages.*

[40], *Principes d'anatomie et de physiologie, Auteur : Gerard J. Tortora, Sandra R. Grabowski, Traduction : France Boudreault, Marie-Claude Désorcy, Edition : 3, Editeur : De Boeck Université, 2002, Pages : 1256 pages.*

[41], *Neurosciences, Auteur : Dale Purves, George J. Augustine, David Fitzpatrick, Jean-Marie Coquery, Traduction : Jean-Marie Coquery, Edition : 2, Editeur : De Boeck Université, 2004, Pages : 752 pages.*

[42], *Le corps humain: étude, structure et fonction : le rôle infirmier dans la pratique clinique, Auteur : Christine Brooker, Isabelle Langlois-Wils, Élisabeth Lepresle, Traduction : Isabelle Langlois-Wils, Élisabeth Lepresle, Edition : 2, Editeur : De Boeck Université, 2001, Pages : 562 pages.*

[43], *Anatomie topographique, descriptive et fonctionnelle, Volume : 1, Auteur : Alain Bouchet, Jacques Cuilleret, Edition : 2, Editeur : Elsevier Masson, 1991, Pages : 598 pages.*

[44], *Physiologie générale, Auteur : Jean-Louis Ader, François Carré, Edition : 2, Editeur : Elsevier Masson, 2006, Pages : 433 pages.*

[45], *Application pratique de l'anatomie humaine, Volume : 2, Auteur : Ahmed Mellal, Editeur : Editions Publibook.*

[46], *Neurologie périnatale, Auteur : Claudine Amiel-Tison, Edition : 3, Editeur : Elsevier Masson, 2005, Pages : 298 pages.*

[47], *Guide de la douleur: Le syndrome douloureux chronique, Auteur : Jean Vibes, Editeur : Estem, 2001, Pages : 518 pages.*

[48], *Anesthésie locorégionale et traitement de la douleur, Auteur : André Muller, Pierre Gauthier-Lafaye, Editeur : Elsevier Masson, 2009, Pages : 685 pages.*

[49], *Neurosciences cognitives: la biologie de l'esprit, Auteur : Michael S. Gazzaniga, Richard B. Ivry, George R. Mangun, Editeur : De Boeck Université, 2000, Pages : 585 pages.*

[50], *Neuro-anatomie, Auteur : James D. Fix, Antoine Dhem, Traduction : Antoine Dhem, Edition : 3, Editeur : De Boeck Université, 2006, Pages : 224 pages.*

[51], *Diagnostic neurologique: Les bases anatomiques, Auteur : Peter Duus, J.-P. Braun, G. Rodesch, Traduction : J.-P. Braun, Editeur : De Boeck Université, 1998, Pages : 502 pages.*

[52], *Physiologie animale: mécanismes et adaptations, Auteur : Roger Eckert, David Randall, François Math, Traduction : François Math, Editeur : De Boeck Université, 1999, Pages : 822 pages.*

[53], *Les psychotropes : pharmacologie et toxicomanie, Auteur : Mohamed Ben Amar, Louis Léonard, Edition : 3, illustrée, Editeur : PUM, 2002, Pages : 894 pages.*

[54], *Bases neurophysiologiques du mouvement, Auteur : Mark L. Latash, Paul Delamarche, Arlette Delamarche, Traduction : Paul Delamarche, Arlette Delamarche, Editeur : De Boeck Université, 2002, Pages : 296 pages.*

[55], *Déficiences intellectuelles et intégration sociale, Volume : Volume 263 de Psychologie et sciences humaines, Auteur : Michèle Carlier, Catherine Ayoun, Editeur : Editions Mardaga, 2007, Pages : 221 pages.*

[56], *Mouvements & cerveau: neurophysiologie des activités physiques et sportives, Auteur : Christian Collet, Jacques Paillard, Editeur : De Boeck Université, 2001, Pages : 232 pages.*

[57], *Physiologie humaine, Auteur : Hervé Guénard, Edition : 3, Editeur : Editions Pradel, 2001, Pages : 606 pages.*

[58], *L'anatomie en orthophonie: Parole, déglutition et audition, Auteur : David H. McFarland, Edition : 2, Editeur : Elsevier Masson, 2009, Pages : 268 pages.*

[59], *Evolve Your Brain: The Science of Changing Your Mind, Auteur : Joe Dispenza, Edition : illustrée, Editeur : HCI, 2007, Pages : 510 pages.*

[60], *COLOR ATLAS OF THE BRAIN AND SPINAL CORD..., Auteur : MARJORIE A. ENGLAND, JENNIFER WAKELEY, Editeur : Elsevier Health Sciences, 2005, Pages : 359 pages.*

[61], *Handbook of Neuropsychology: section 1. Introduction, Volume : Volume 1, Auteur : François Boller, Jordan Grafman, Edition : 2, Editeur : Elsevier Health Sciences, 2000, Pages : 544 pages.*

[62], *On the Fabric of the Human Body, Volume : 6-7, Auteur : Andreas Vesalius, William Frank Richardson, John Burd Carman, Editeur : Norman Publishing, 2009, Pages : 413 pages.*

[63], *Neuropsychologie, Abrégés(Paris. 1971), Auteur : Roger Gil, Edition : 4, Editeur : Elsevier Masson, 2006, Pages : 414 pages.*

[64], *Anatomie humaine: descriptive, topographique et fonctionnelle, Volume : 4, Système nerveux central, voies et centres nerveux, Auteur : Henri Rouvière, André Delmas, Edition : 15, Editeur : Elsevier Masson, 2002, Pages : 411 pages.*

[65], *Atlas interactif de neuroanatomie clinique, Auteur : Laurent Thines, Frédéric Lemarchand, Jean-Paul Francke, Edition : Elsevier Masson, 2008, Pages : 127 pages.*

[66], *Atlas aide-mémoire d'anatomie, Auteur : Henri Rouvière, André Delmas, Edition : 5, Editeur : Elsevier Masson, 1996, Pages : 364 pages.*

[67], *Abord clinique en neurologie, Auteur : Jean-Claude Turpin, Editeur : Springer, 2010, Pages : 211 pages.*

[68], *Rachianesthésie, Auteur : Kamran Samii, Marc Gentili, Editeur : Elsevier Masson, 2003, Pages : 270 pages.*

[69], *Soins infirmiers en médecine et en chirurgie, Volume : 6- Fonctions sensorielle, neurologique et musculosquelettique, Auteur : Lillian Sholtis Brunner, Suzanne C. Smeltzer, Brenda Bare, Doris Smith Suddarth, Edition : 2, Editeur : De Boeck Université, 2006, Pages : 512 pages.*

[70], *Anatomie clinique du système nerveux central, Auteur : A. Goffinet, Editeur : Presses universitaires de Namur, 1994, Pages : 302 pages.*

[71], *Atlas de neurosciences humaines de Netter, Auteur : David Felten, Ralph Jozefowicz, Traduction : Nathalie Kubis, Illustration : Frank Henry Netter, Editeur : Elsevier Masson, 2006, Pages : 306 pages.*

[72], *Anatomie, physiologie: Pharmacologie générale, Auteur : François Pebret, Edition : 6, Editeur : Heures de France, 2003, Pages : 621 pages.*

[73], *À la recherche de la conscience: une enquête neurobiologique, Auteur : Christof Koch, Christophe Pallier, Traduction : Christophe Pallier, Editeur : Odile Jacob, 2006, Pages : 460 pages.*

[74], *Encyclopédie historique des neurosciences: Du neurone à l'émergence de la pensée, Auteur : François Clarac, Pierre Buser, Jean-Pierre Ternaux, Dominique Wolton, Illustration : Jean-Pierre Ternaux, Editeur : De Boeck Université, 2008, Pages : 1009 pages.*

[75], *Motricité humaine : fondements et applications pédagogiques, Volume : 1, Auteur : Robert Rigal, Edition : 3, illustrée, Editeur : PUQ, 2002, Pages : 661 pages.*

[76], *Psychopathologie*, *Auteur : Jeffrey Nevid, Collectif, Traduction : Michèle Bertrand, Marie-Christine Gély-Nargeot, Maryse Siksou, Edition : 7, Editeur : Pearson Education France, 2009, Pages : 448 pages.*

[77], *Handbook of the autonomic nervous system in health and disease*, *Volume : Volume 55, Auteur : Liana Bolis, J. Licinio, Stefano Govoni, Edition : illustrée, Editeur : CRC Press, 2003, Pages : 677 pages.*

[78], *La marche humaine, la course et le saut*, *Volume : Volume 9 de Le Point en rééducation, Auteur : Éric Viel, Editeur : Elsevier Masson, 2000, Pages : 267 pages.*

[79], *La maladie de Parkinson*, *Auteur : Luc Defebvre, Marc Vérin, Editeur : Elsevier Masson, 2006, Pages : 220 pages.*

[80], *Traité de neuropsychologie clinique*, *Auteur : Bernard Lechevalier, Francis Eustache, Fausto Viader, Editeur : De Boeck Université, 2008, Pages : 1040 pages.*

[81], *Ultrastructure cellulaire et tissulaire: Approche fonctionnelle*, *Auteur : P.C. Cross, R. Mercer, K. Lynne Mercer, Traduction : J.-F. Denef, S. Haumont, Editeur : De Boeck Université, 1995, Pages : 436 pages.*

[82], *Physiologie du sport et de l'exercice*, *Auteur : David L. Costill, Jack H. Wilmore, Traduction : Arlette Delamarche, Paul Delamarche, Carole Groussard, Edition : 4, Editeur : De Boeck Université, 2006, Pages : 630 pages.*

[83], *Examen clinique: éléments de sémiologie médicale*, *Auteur : Owen Epstein, David P. de Bono, G. David Perkin, Bernard Devulder..., Traduction : Bernard Devulder, Edition : 2, Editeur : De Boeck Université, 1999, Pages : 432 pages.*

[84], *Le crâne humain: ostéologie, anatomie radiologique*, *Auteur : Jacques Bories, Editeur : Springer, 1996, Pages : 273 pages.*

[85], *Gray's Anatomie pour les étudiants*, *Auteur : Richard-L Drake, Wayne Vogl, Adam-W-M Mitchell, Illustration : , Editeur : Elsevier Masson, 2006, Pages : 1111 pages.*

[86], *Interprétation des examens complémentaires en neurologie*, *Auteur : Jean-Marc Léger, Editeur : Editions Doin, 2000, Pages : 185 pages.*

[87], *L'écho-doppler couleur en pratique viscérale et périphérique*, *Auteur : Marie-Christine Plainfossé, Edition : 3, Editeur : Elsevier Masson, 1997, Pages : 246 pages.*

[88], *Posture, équilibration et médecine de rééducation*, *Volume : Volume 26 de Problèmes en médecine de rééducation, Auteur : Jacques Pélissier, Médecin J.P Blayac, J. P. Blayac, Edition : Elsevier Masson, 1993, Editeur : , Pages : 290 pages.*

[89], *Mémo-guide infirmier: les 100 fiches essentielles*, *Auteur : Pascal Hallouët, Editeur : Elsevier Masson, 2007, Pages : 395 pages.*

[90], *Manuel pratique d'anesthésie*, *Auteur : Éric Albrecht, Jean-Pierre Haberer, Éric Buchser, Editeur : Elsevier Masson, 2006, Pages : 600 pages.*

[91], *Neurologie et neurochirurgie*, *Auteur : Gilda Bernard, Catherine Novel, Rolande Vergnes, Editeur : Estem, 2007, Pages : 260 pages.*

[92], *Medical assisting: administrative and clinical competencies*, *Volume : 1, Auteur : Lucille Keir, Barbara A. Wise, Connie Krebs, Edition : 4, révisée, Editeur : Cengage Learning, 1998, Pages : 824 pages.*

[93], *Anatomie microscopique: atlas de microscopie optique et électronique*, *Auteur : Pietro Motta, Traduction : Jean-Claude Czyba, Editeur : PICCIN, 1988, Pages : 266 pages.*

[94], *Histologie humaine*, *Auteur : Alan Stevens, James Lowe, Editeur : De Boeck Université, 1997, Pages : 416 pages.*

[95], *Abrégé d'anatomie et de physiologie humaines*, *Auteur : Michel Lacombe, Edition : 6, Editeur : De Boeck Education, 2006, Pages : 229 pages.*

[96], *Traité du cerveau*, *Auteur : Michel Imbert, Editeur : Odile Jacob, 2006, Pages : 532 pages.*

[97], *La plasticité de la fonction motrice*, *Auteur : Jean-Pierre Didier, Editeur : Springer, 2004, Pages : 476 pages.*

[98], *La conscience dans tous ses états*, *Auteur : Sébastien Baud, Nancy Midol, Editeur : Elsevier Masson, 2009, Pages : 164 pages.*

[99], *Histologie et biologie cellulaire*, *Auteur : Abraham L. Kierszenbaum, Traduction : Patricia Validire-Charpy, Pierre Validire, Editeur : De Boeck Université, 2006, Pages : 619 pages.*

[100], *Physiologie du neurone*, *Auteur : Danièle Tritsch, Dominique Chesnoy-Marchais, Anne Feltz, Edition : 2, Editeur : Editions Doin, 1999, Pages : 715 pages.*

[101], *Biologie*, *Auteur : Stephen D. Bresnick, Traduction : Pierre Delorme, Editeur : De Boeck Université, 2004, Pages : 320 pages.*

[102], *Soins infirmiers aux personnes atteintes d'affections neurologiques*, *Auteur : Estem Editions, Editeur : Estem, 2006, Pages : 150 pages.*

[103], *Dendritic Spines*, *Auteur : Rafael Yuste, Edition : illustrée, Editeur : MIT Press, 2009, Pages : 264 pages.*

[104], *Histologie*, *Auteur : Renate Lüllmann-Rauch, Traduction : Pierre Sprumont, Editeur : De Boeck Université, 2008, Pages : 704 pages.*

[105], *Biologie et physiologie animales*, *Auteur : Rüdiger Wehner, Walter Gehring, Traduction : Christiane Elisabeth Meyer, Editeur : De Boeck Université, 1999, Pages : 844 pages.*

[106], *Biologie fondamentale UE 2.1 et UE 2.2*, *Auteur : Catherine Desassis, Hélène Labousset-Piquet, Editeur : Elsevier Masson, 2009, Pages : 138 pages.*

[107], *Neurologie*, *Auteur : Jean Cambier, Maurice Masson, Henri Dehen, Catherine Masson, Edition : 12, Editeur : Elsevier Masson, 2008, Pages : 540 pages.*

[108], *Essential neuroscience*, *Auteur : Allan Siegel, Hreday N. Sapru, Edition : illustrée, Editeur : Lippincott Williams & Wilkins, 2005, Pages : 576 pages.*

[109], *Précis de physiologie de l'exercice musculaire*, *Auteur : Per-Olof Åstrand, Kaare Rodahl, Edition : 3, Editeur : Elsevier Masson, 1994, Pages : 530 pages.*

[110], *Biologie moléculaire. Biochimie des communications cellulaires*, *Auteur : Christian Moussard, Christiane Mougin, Pierre Oudet, Editeur : De Boeck Université, 2005, Pages : 328 pages.*

[111], *Neuropsychologie humaine*, *Auteur : Xavier Seron, Jean-Claude Baron, Marc Jeannerod, Edition : 2, Editeur : Editions Mardaga, 1998, Pages : 615 pages.*

[112], *Programmation génétique, comportements et cognition en psychiatrie*, *Auteur : Dominique Campion, Editeur : Editions Doin, 2006, Pages : 264 pages.*

[113], *Biologie moléculaire de la cellule*, *Auteur : Harvey Lodish, Arnold Berk, Paul Matsudaira, James Darnell, Chris A. Kaiser, Pierre L. Masson, Traduction : Pierre L. Masson, Edition : 3, Editeur : De Boeck Université, 2005, Pages : 1096 pages.*

[114], *Glial neurobiology: a textbook*, *Auteur : Alexei Verkhratsky, Arthur Butt, Edition : illustrée, Editeur : John Wiley and Sons, 2007, Pages : 215 pages.*

[115], *Introducing neuropsychology*, *Auteur : John D. Stirling, Edition : illustrée, Editeur : Psychology Press, 2002, Pages : 291 pages.*

[116], *Manipulations des nerfs crâniens*, *Auteur : Jean-Pierre Barral, Alain Croibier, Editeur : Elsevier Masson, 2006, Pages : 375 pages.*

[117], *Glial neuronal signaling*, *Volume : Volume 1, Auteur : Glenn I. Hatton, Vladimir Parpura, Edition : illustrée, Editeur : Springer, 2004, Pages : 441 pages.*

[118], *Diététique du cerveau: la nouvelle donne*, *Auteur : Jean-Marie Bourre, Editeur : Odile Jacob, 2003, Pages : 302 pages.*

[119], *Psychologie: Science humaine et science cognitive*, *Auteur : Jo Godefroid, Edition : 2, illustrée, Editeur : De Boeck Université, 2008, Pages : 1120 pages.*

[120], *The human nervous system: structure and function*, *Auteur : Charles Robert Noback, Edition : 6, illustrée, Editeur : Humana Press, 2005, Pages : 477 pages.*

[121], *Techniques en neurosciences*, *Auteur : Jean-Marie Meunier, Alexandre Shvaloff, Editeur : Elsevier Masson, 1996, Pages : 267 pages.*

[122], *Histologie fonctionnelle*, *Auteur : Paul Richard Wheater, Barbara Young, John W. Heath, Edition : 4, Editeur : De Boeck Université, 2004, Pages : 424 pages.*

[123], *The Biology of Oligodendrocytes*, *Auteur : Patricia Armati, Emily Mathey, Edition : illustrée, Editeur : Cambridge University Press, 2010, Pages : 304 pages.*

[124], *Neuropathies périphériques*, *Volume : Volume 1 de Neuropathies périphériques, Auteur : Pierre Bouche, Jean-Marc Léger, Jean-Michel Vallat, Jean-Louis Mas, Edition : 2, Editeur : Editions Doin, 2003, Pages : 402 pages.*

[125], *Manipulations des nerfs périphériques*, *Auteur : Jean-Pierre Barral, Alain Croibier, Editeur : Elsevier Masson, 2004, Pages : 351 pages.*

[126], *Histologie*, *Auteur : Hervé Prugnolle, Frédéric Thoreau, Editeur : Estem, 1996, Pages : 128 pages.*

[127], *The biology of Schwann cells*, *Auteur : Patricia J. Armati, Edition : illustrée, Editeur : Cambridge University Press, 2007, Pages : 249 pages.*

[128], *Barr's the human nervous system*, *Auteur : John Alan Kiernan, Murray Llewellyn Barr, Edition : 9, illustrée, révisée, Editeur : Lippincott Williams & Wilkins, 2008, Pages : 424 pages.*

[129], *Dellmann's textbook of veterinary histology*, *Auteur : Jo Ann Coers Eurell, Jo Ann Eurell, Brian L. Frappier, Horst-Dieter Dellmann, Edition : 6, illustrée, Editeur : Wiley-Blackwell, 2006, Pages : 405 pages.*

[130], *Le Lacombe: précis d'anatomie & de physiologie humaines*, *Volume : Volume 1, Auteur : Michel Lacombe, Edition : 29, Editeur : Editions Lamarre, 2007, Pages : 415 pages.*

[131], *Histologie: Les tissus*, *Auteur : Jacques Poirier, Martin Catala, Edition : 3, Editeur : Elsevier Masson, 2006, Pages : 224 pages.*

[132], *Multiple sclerosis: a comprehensive text*, *Auteur : Cedric S. Raine, Henry F. McFarland, Reinhard Hohlfeld, Edition : illustrée, Editeur : Elsevier Health Sciences, 2008, Pages : 474 pages.*

[133], *Physiologie*, *Auteur : Robert F. Schmidt, Étienne Savin, Traduction : Hubert Karmann,*

Nathalie Flacke, Editeur : De Boeck Université, 1999, Pages : 320 pages.

[134], *La cellule: une approche moléculaire, Auteur : Geoffrey M. Cooper, Traduction : Camille François, Editeur : De Boeck Université, 1999, Pages : 706 pages.*

[135], *Physiologie animale, Auteur : Raymond Gilles, Michel Anctil, Editeur : De Boeck Université, 2006, Pages : 675 pages.*

[136], *Physiologie humaine appliquée, Auteur : Claude Martin, Bruno Riou, Benoît Vallet, Editeur : Editions Arnette, 2006, Pages : 1098 pages.*

[137], *The human brain, Auteur : Paul Glees, Edition : illustrée, Editeur : Cambridge University Press, 1988, Pages : 204 pages.*

[138], *Comprendre Le Cerveau: Naissance D'une Science De L'apprentissage, Auteur : OECD Publishing, Editeur : OECD Publishing, 2007, Pages : 277 pages.*

[139], *Visions: how science will revolutionize the twenty-first century, Auteur : Michio Kaku, Traduction : , Edition : illustrée, réimprimée, Editeur : Oxford University Press, 1999, Pages : 403 pages.*

[140], *Brave new brain: vaincre les maladies mentales à l'ère du génome, Auteur : Nancy C. Andreasen, Raphaël Goubet, Traduction : Raphaël Goubet, Editeur : De Boeck Université, 2004, Pages : 442 pages.*

[141], *Perception et réalité: une introduction à la psychologie des perceptions, Auteur : André Delorme, Michelangelo Flückiger, Editeur : De Boeck Université, 2003, Pages : 516 pages.*

[142], *Color atlas of physiology, Auteur : Stefan Silbernagl, Agamemnon Despopoulos, Edition : 6, illustrée, Editeur : Thieme, 2009, Pages : 441 pages.*

[143], *La Main, Auteur : Augusto Bonola, Alessandro Caroli, Luigi Celli, Traduction : Jean-Luc Mériaux, Editeur : PICCIN, 1988, Pages : 454 pages.*

[144], *Douleurs, soins palliatifs, deuils, Volume : Volume 6 de Abrégés. Modules transversaux, Auteur : Alain de Broca, Edition : 2, Editeur : Elsevier Masson, 2005, Pages : 173 pages.*

[145], *Neurosciences cliniques: De la perception aux troubles du comportement, Auteur : François Math, Jean-Pierre Kahn, Jean-Pierre Vignal, Editeur : De Boeck Université, 2008, Pages : 452 pages.*

[146], *Tête et cou, Volume : Volume 3 de Anatomie clinique, , Auteur : Jean-Paul Chevrel, C Fontaine, Editeur : Birkhäuser, 1996, Pages : 490 pages.*

[147], *Anatomie et réfraction, Auteur : Morton-E Smith, Marilyn-C Kincaid, Constance-E West, Traduction : Charlotte Rohart, Minh-Huyên Nghiêm-Buffet, Editeur : Elsevier Masson, 2004, Pages : 187 pages.*

[148], *Atlas d'ophtalmologie clinique, Auteur : David-J Spalton, Roger-A Hitchings, Paul-A Hunter, Traduction : Gilles Chaine, Edition : 3, Editeur : Elsevier Masson, 2005, Pages : 720 pages.*

[149], *Ophtalmologie, Auteur : Mark Batterbury, Brad Bowling, Antoine Catier, Traduction : Antoine Catier, Editeur : Elsevier Masson, 2005, Pages : 122 pages.*

[150], *Ophtalmologie: pathologie du système visuel, Auteur : Jacques Flament, Editeur : Elsevier Masson, 2002, Pages : 358 pages.*

[151], *Biologie-Microbiologie-Nutrition-Alimentation BEP Carrières sanitaires, Auteur : Jacqueline Gassier, Catherine Morel-Haziza, Pages : 310 pages.*

[152], *La papille optique, Auteur : Alain Bron, Jean-François Rouland, Editeur : Elsevier Masson,*

2006, Pages : 298 pages.

[153], *La vision, Auteur : Robert W. Rodieck, Traduction : Françoise Koenig, Editeur : De Boeck Université, 2003, Pages : 576 pages.*

[154], *Rétine, choroïde, vitré, Auteur : Jose-S Pulido, Traduction : Valérie Krivosic, Ramin Tadayoni, Editeur : Elsevier Masson, 2005, Pages : 214 pages.*

[155], *COLOR ATLAS OF GENETICS, Auteur : EBERHARD PASSARGE, M.D., Editeur : Thieme, 2006, Pages : 486 pages.*

[156], *Les nerfs crâniens, Auteur : Dominique Doyon, Edition : 2, Editeur : Elsevier Masson, 2006, Pages : 273 pages.*

[157], *Le système nerveux central: à l'usage des étudiants en médecine, Auteur : Georges Braillon, Editeur : Editions Doin, 2002, Pages : 123 pages.*

[158], *Dopamine, Volume : Volume 21 de Handbook of chemical neuroanatomy, Auteur : Stephen B. Dunnett, Edition : illustrée, Editeur : Elsevier, 2005, Pages : 588 pages.*

[159], *Galilée et la photodiode: cerveau, complexité et conscience, Auteur : Giulio Tononi, Traduction : Hélène Dayan, Editeur : Odile Jacob, 2006, Pages : 190 pages.*

[160], *Anatomie médicale: Aspects fondamentaux et applications cliniques, Auteur : Keith L. Moore, Arthur F. Dalley, Editeur : De Boeck Université, 2006, Pages : 1216 pages.*

[161], *Bilan neuropsychologique de l'enfant, Auteur : Marie-Pascale Noël, Editeur : Editions Mardaga, 2007, Pages : 320 pages.*

[162], *Rééducations neuropsychologiques: historique, développements actuels et évaluation, Auteur : Francis Eustache, Jany Lambert, Fausto Viader, Editeur : De Boeck Université, 1997, Pages : 345 pages.*

[163], *Neurophysiologie des mémoires, Auteur : Bernard Guéguen, Patrick Chauvel, Jacques Touchon, Editeur : Elsevier Masson, 2005, Pages : 240 pages.*

[164], *La cognition: une introduction à la psychologie cognitive, Auteur : Margaret W. Matlin, Alain Brossard, Traduction : Alain Brossard, Editeur : De Boeck Université, 2001, Pages : 790 pages.*

[165], *Mémoire et langage: surdité, dysphasie, dyslexie, Volume : Volume 3 de Collection d'orthophonie, Auteur : Annie Dumont, Edition : 2, Editeur : Elsevier Masson, 2001, Pages : 124 pages.*

[166], *Psychologie: Pensée, cerveau et culture, Auteur : Drew Westen, Catherine Garitte, Traduction : Catherine Garitte, Editeur : De Boeck Université, 2000, Pages : 1280 pages.*

[167], *La mémoire de l'enfant: développement normal et pathologique, Auteur : Ana María Soprano, Juan Narbona, Traduction : Léonard Vannetzel, Isa-Laure Lemaine, Editeur : Elsevier Masson, 2009, Pages : 200 pages.*

[168], *Psychiatrie de l'adulte, Auteur : Thérèse Lempérière, Edition : 2, Editeur : Elsevier Masson, 2006, Pages : 555 pages.*

[169], *Mémoire totale: Les nouvelles clés de la mémoire, Auteur : Danielle Vautrin, Editeur : Alpen Editions s.a.m., 2005, Pages : 96 pages.*

[170], *Biologie de la conscience, Auteur : Gerald M. Edelman, Traduction : Ana Gerschenfeld, Editeur : Odile Jacob, 2008, Pages : 368 pages.*

[171], *Comment la matière devient conscience, Auteur : Gerald M. Edelman, Giulio Tononi, Editeur : Odile Jacob, 2000, Pages : 316 pages.*

[172], *Les troubles du sommeil*, *Auteur : Michel Billiard, Yves Dauvilliers, Editeur : Elsevier Masson, 2006, Pages : 395 pages.*

[173], *La diversité culturelle: vers une convention internationale effective*, *Auteur : Gilbert Gagné, Editeur : Les Editions Fides, 2005, Pages : 212 pages.*

[174], *New Perspectives on Endangered Languages*, *Editeur : John Benjamins Publishing Company, 2010, Pages : 168 pages.*

[175], *Et dedans et dehors, la voix*, *Auteur : Bernadette Bailleux, Editeur : Presses univ. de Louvain, 2001, Pages : 358 pages.*

[176], *Émotion et psychothérapie*, *Auteur : Pierre Philippot, Editeur : Editions Mardaga, 2007, Pages : 250 pages.*

[177], *La schizophrénie de l'adulte: des causes aux traitements*, *Auteur : Mohamed Saoud, Thierry d' Amato, Editeur : Elsevier Masson, 2006, Pages : 234 pages.*

[178], *Neurologie*, *Auteur : I.M.S. Wilkinson, Editeur : De Boeck Université, 2002, Pages : 288 pages.*

[179], *Neurologie, neurochirurgie et soins infirmiers*, *Volume : Volume 10 de Étudiants IFSI. Module, Auteur : Marie-Claire Guillemin, Edition : 2, Editeur : De Boeck Education, 2005, Pages : 163 pages.*

[180], *Neurologie*, *Auteur : Kiyoka Kinugawa, Emmanuel Roze, Editeur : Elsevier Masson, 2008, Pages : 190 pages.*

[181], *Sémiologie médicale*, *Auteur : Maurice Bariéty, Robert Bonniot, Edition : 7, Editeur : Elsevier Masson, 2003, Pages : 564 pages.*

[182], *Imagerie médicale*, *Auteur : Peter Renton, Peter Renton Paul Butler, Traduction : Sophie Chagnon, Editeur : Elsevier Masson, 2005, Pages : 143 pages.*

[183], *Neuro-imagerie diagnostique*, *Auteur : Jean-Louis Dietemann, Edition : Elsevier Masson, 2007, Editeur : Elsevier Masson, 2007, Pages : 699 pages.*

[184], *Imagerie du vieillissement: les limites du normal*, *Auteur : Alain Dana, Mickaël Suissa, Didier Godefroy, Editeur : Elsevier Masson, 2008, Pages : 291 pages.*

[185], *Neurologie: Manuel et atlas*, *Auteur : G. David Perkin, Editeur : De Boeck Université, 2002, Pages : 320 pages.*

[186], *Comprendre l'épilepsie: notions élémentaires sur l'épilepsie et les épilepsies*, *Auteur : Charlotte Dravet, Editeur : John Libbey Eurotext, 2005, Pages : 59 pages.*

[187], *Neurologie*, *Auteur : College des enseignants neuro,, Edition : 2, Editeur : Elsevier Masson, 2009, Pages : 526 pages.*

[188], *Épilepsies*, *Auteur : Julien Bogousslavsky, Pierre Jallon, Jean-Marc Léger, Jean-Louis Mas, Editeur : Editions Doin, 2007, Pages : 430 pages.*

[189], *L'épilepsie du sujet*, *Auteur : André Polard, Editeur : Editions L'Harmattan, 2004, Pages : 364 pages.*

[190], *Handbook of cross-cultural neuropsychology*, *Auteur : Elaine Fletcher-Janzen, Tony L. Strickland, Cecil R. Reynolds, Edition : illustrée, Editeur : Springer, 2000, Pages : 375 pages.*

[191], *Les syndromes Parkinsoniens*, *Auteur : François Tison, Editeur : Elsevier Masson, 2006, Pages : 305 pages.*

[192], *Human aging and chronic disease*, *Auteur : Cary Steven Kart, Eileen K. Metress, Seamus P. Metress, Edition : illustrée, Editeur : Jones & Bartlett Learning, 1992, Pages : 335 pages.*

[193], *La maladie de Parkinson au jour le jour*, *Auteur : Anne-Marie Bonnet, Thierry Hergueta, Editeur : John Libbey Eurotext, 2007, Pages : 185 pages.*

[194], *Guide de thérapeutique 2010*, *Auteur : Léon Perlemuter, Gabriel Perlemuter, Editeur : Elsevier Masson, 2010, Pages : 2218 pages.*

[195], *Rééducation neurologique: guide pratique de rééducation des affections neurologiques*, *Auteur : Alex Chantraine, Edition : 2, Editeur : Editions Arnette, 1999, Pages : 403 pages.*

[196], *La maladie d'Alzheimer*, *Auteur : Jacques Touchon, Florence Portet, Traduction : , Edition : 3, Editeur : Elsevier Masson, 2004, Pages : 177 pages.*

[197], *Démences*, *Auteur : Charles Duyckaerts, Editeur : Editions Doin, 2002, Pages : 512 pages.*

[198], *Les aphasies: Evaluation et rééducation, Volume : , Auteur : Sophie Chomel-Guillaume, Gilles Leloup, Illustration : , Editeur : Elsevier Masson, 2010, Pages : 288 pages.*

[199], *Psychopathologie: Une perspective multidimensionnelle*, *Auteur : Vincent Mark Durand, David H. Barlow, Michel Gottschalk, Traduction : Michel Gottschalk, Editeur : De Boeck Université, 2004, Pages : 936 pages.*

[200], *La maladie d'Alzheimer: de l'étiologie à la thérapeutique*, *Auteur : Albert Louis, Editeur : Kluwer, 2001, Pages : 138 pages.*

[201], *Tout sur la mémoire*, *Auteur : Bernard Croisile, Editeur : Odile Jacob, 2009, Pages : 510 pages.*

[202], *Concepts of Alzheimer disease: biological, clinical, and cultural perspectives*, *Auteur : Peter J. Whitehouse, Konrad Maurer, Jesse F. Ballenger, Edition : illustrée, Editeur : JHU Press, 2000, Pages : 321 pages.*

[203], *Gérontologie et gérontopsychiatrie: soins infirmiers*, *Volume : Volume 20, Auteur : Marie-Pierre Hervy, Valérie Béguin, Edition : 4, Editeur : Elsevier Masson, 2005, Pages : 192 pages.*

[204], *Du vieillissement cérébral à la maladie d'Alzheimer*, *Auteur : Françoise Schenk, Geneviève Leuba, Christophe Büla, Editeur : De Boeck Université, 2004, Pages : 360 pages.*

[205], *La maladie d'Alzheimer et la prise en charge infirmière*, *Auteur : Margot Phaneuf, Edition : 2, Editeur : Elsevier Masson, 2007, Pages : 416 pages.*

[206], *La maladie d'Alzheimer: comportement et humeur*, *Volume : Volume 2 de Guides pratiques de l'aidant, Auteur : Christian Derouesné, Jacques Selmès, Editeur : John Libbey Eurotext, 2005, Pages : 232 pages.*

[207], *Gériatrie*, *Auteur : Joël Belmin, Edition : 2, Editeur : Joël Belmin, Pages : 835 pages.*

[208], *Douleurs aiguës*, *Auteur : Dominique Fletcher, Marcel Chauvin, Editeur : Editions Arnette, 2006, Pages : 243 pages.*

[209], *Sémiologie médicale: Apprentissage pratique de l'examen clinique*, *Auteur : Baptiste Coustet, Editeur : Estem, 2008, Pages : 456 pages.*

[210], *Congrès national d'anesthésie et de réanimation 2008*, *Auteur : SFAR, Editeur : Elsevier Masson, 2008, Pages : 849 pages.*

[211], *La douleur en pratique quotidienne: diagnostic et traitements*, *Auteur : Alain Serrie, Claude Thurel, Edition : 2, Editeur : Editions Arnette, 2002, Pages : 655 pages.*

[212], *Neurologie, Auteur : Anne Bertrand, Stéphane Epelbaum, Edition : 2, Editeur : Elsevier Masson, 2009, Pages : 446 pages.*

[213], *La sclérose en plaques: aujourd'hui et demain, Auteur : Ayman Tourbah, Edition : John Libbey Eurotext, 2003, Editeur : John Libbey Eurotext, 2003, Pages : 56 pages.*

[214], *Multiple sclerosis: the history of a disease, Auteur : T. J. Murray, Edition : illustrée, Editeur : Demos Medical Publishing, 2005, Pages : 580 pages.*

[215], *La sclérose en plaques débutante, Auteur : Patrick Vermersch, Editeur : John Libbey Eurotext, 2008, Pages : 91 pages.*

[216], *Immunopathologie et réactions inflammatoires, Auteur : Bernard Weill, Frédéric Batteux, Editeur : De Boeck Université, 2003, Pages : 312 pages.*

[217], *Molinier: pathologie médicale et pratique infirmière, Volume : Volume 3, Auteur : Armand Molinier, Jacques Massol, Editeur : Editions Lamarre, 2008, Pages : 601 pages.*

[218], *Immunologie clinique: De la théorie à la pratique, avec cas cliniques, Auteur : Helen Chapel, Mansel Haeney, Siraj Misbah, Neil Snowden, Traduction : Pierre L. Masson, Edition : 4, Editeur : De Boeck Université, 2004, Pages : 372 pages.*

[219], *Le système immunitaire, Auteur : Peter Parham, Editeur : De Boeck Université, 2003, Pages : 424 pages.*

[220], *Principes de réanimation chirurgicale, Auteur : Jean-Louis Pourriat, Claude Martin, Edition : 2, Editeur : Editions Arnette, 2005, Pages : 1430 pages.*

[221], *Cerveau gauche cerveau droit: à la lumière des neurosciences, Auteur : Sally P. Springer, Georg Deutsch, Editeur : De Boeck Université, 2000, Pages : 416 pages.*

[222], *Sémiologie clinique, Auteur : Jean Bariéty, Jean Bariéty, Gilles Grateau, Loïc Capron, Loïc Capron, Gilles Grateau, Edition : 8, Editeur : Elsevier Masson, 2009, Pages : 503 pages.*

[223], *Le langage, qu'est-ce que c'est?, Auteur : Bénédicte de Boysson-Bardies, Editeur : Odile Jacob, 2003, Pages : 239 pages.*

[224], *Anatomie et physiologie normales et pathologiques, Auteur : Janet S Ross, Anne Waugh, Allison Grant, Kathleen J. W. Wilson, Graeme Chambers, Illustration : Graeme Chambers, Editeur : Elsevier Masson, 2007, Pages : 530 pages.*

[225], *Anatomie et physiologie, Auteur : Alain Ramé, Sylvie Thérond, Editeur : Elsevier Masson, 2007, Pages : 318 pages.*

[226], *Anatomie fonctionnelle appliquée à l'ostéopathie crânienne, Auteur : Nicette Sergueef, Editeur : Elsevier Masson, 2009, Pages : 353 pages.*

[227], *Neurologie, Auteur : Zahoua Thorin-Benarab, Edition : 2, Editeur : Estem, 2008, Pages : 192 pages.*

[228], *Les réseaux du sens: de l'informatique aux neurosciences, Auteur : Gérard Chazal, Editeur : Editions Champ Vallon, 2000, Pages : 279 pages.*

[229], *Le miroir automate: introduction à une philosophie de l'informatique, Auteur : Gérard Chazal, Editeur : Editions Champ Vallon, 1995, Pages : 252 pages.*

[230], *Cytologie du liquide céphalorachidien, Auteur : Jacqueline Mikol, Homa Adle-Biassette, Dominique Hénin, Marc Polivka, Editeur : Elsevier Masson, 2004, Pages : 101 pages.*

. ***"Understanding the brain"***, Comprendre le cerveau, *professeur: Jeanette Norden, Ph.D., Vanderbilt University School of Medicine, Vanderbilt University. Cette série de 36 conférences, 30 minutes chacune constitue un véritable trésor destiné au grand public. Le professeur Jeanette Nordon y explique de façon élégante et simple le fonctionnement du cerveau.*

"Understanding the human body", Comprendre le corps humain, *professeur: Anthony A. Goodman, M.D. Cornell Medical College, Montana State University. Une série de 32 conférences de 45 minutes chacune, un véritable voyage à travers lequel Anthony Goodman explique le fonctionnement du corps humain. 7 épisodes sont consacrés au système nerveux et les organes de sens.*

"Biology: The Science of Life", Biologie: La science de la vie, *Professeur Stephen Nowicki, Ph.D. Cornell University, Duke University. Une série de 72 conférences de 30 minutes chacune, Le professeur Stephen Nowicki y présente les principes fondamentaux de la biologie générale, 3 chapitres sont consacrés à la neurophysiologie.*

"Biology and Human Behavior: The Neurological Origins of Individuality, 2nd Edition", Biologie du comportement humain: Les origines neurologiques de l'individualité, 2ème édition, *Professeur : Robert Sapolsky, Ph.D., Rockefeller University, Stanford University. Une série de 24 épisodes, 30 min chacun sur la neurobiologie du comportement humain.*

"Origins of the Human Mind", Origines de l'esprit humain, *Professeur Stephen P. Hinshaw, Ph.D., University of California, Los Angeles, University of California, Berkeley. Une série de 24 conférences de 30 minutes chacune, qui explique la relation entre le cerveau en tant que structure anatomo-biologique et l'émergence de l'esprit.*

"Brain rules", Les règles du cerveau. *John J. Medina, Developmental molecular biologist and research consultant. Un site internet qui explique en vidéos d'une façon très simplifiée le fonctionnement cérébral.*

"BBC Brain Story: Unlocking Our Inner World of Emotions, Memories, Ideas and Desires", BBS L'histoire du cerveau, *Professeur: Susan Greenfield, Professor of Synaptic Pharmacology at Lincoln College, Oxford. Une série télévisée faite de 6 épisodes traitant les aspects fascinants du fonctionnement cérébral.*

"Brain Fitness Program and Neuroplasticity", "le programme d'entraînement cérébral", *Peter Coyote, Acteur. Une émission télévisée qui traite du pouvoir de la neuroplasticité.*

"Neuroanatomy, 3D-Stereoscopic Atlas of the Human Brain"*. Un programme visuel interactif qui présente les différents constituants de l'encéphale en 3D interactive et stéréoscopique.*

"Le cerveau à tous les niveaux"*. Un site internet bilingue anglais/Français qui présente chaque aspect du fonctionnement neurologique selon 3 niveaux de complexité croissante, chaque niveau traité de 5 manières (Sociales, Psychologiques, Cérébrales, Cellulaires et Moléculaires).*

"Futura Sciences"*. Un forum internet de partage de connaissances scientifiques qui regroupe professionnels et étudiants.*

"The Brain Explorer"*. Un site internet bilingue qui traite d'une façon simplifiée différents aspects du système nerveux.*

"Interactive physiology"*. Un support audiovisuel et interactif sur la physiologie générale.*

"Médecine et santé - anatomie". Un site internet vulgarisé destiné au grand publique qui traite de l'anatomie et de la santé en général.

"Neuranat". *Professeur : Dominique Hasboun, MD, Ph.D, CHU Pitié-Salpêtrière, Paris, France. Un site internet destiné aux étudiants de médecine qui présente différents vidéos de dissection ainsi que plusieurs cours de neurophysiologie.*

"Neuroanatomie fonctionnelle"*, Dr. Bertrand Boutillier et Pr. Gérard Outrequin. Un site internet destiné aux étudiants de médecine où les auteurs expliquent le fonctionnement du système nerveux par des articles et des schémas.*

"Digital Anatomist: Interactive Brain Atlas"*, John W. Sundsten. Un site internet qui offre plusieurs vidéos des reconstitutions 3D des constitutions du système nerveux central.*

"The whole brain atlas"*. Un site internet qui offre une grande collection de coupes IRM du système nerveux.*

"Mediaphys 3.0"*. Un support audiovisuel et interactif sur la physiologie général.*

"Sylvius 4: An Interactive Atlas and Visual Glossary of Human Neuroanatomy"*. Un support audiovisuel et interactif sur la neuro-anatomie.*

"Neuroanatomy Tutorial". *Un site internet qui offre plusieurs vues et coupes anatomique des organes du système nerveux.*

المحتويات

رسوم توضيحية

صورة 1: الجهاز العصبي المركزي 17
صورة 2: الحبل الشوكي محمي داخل القناة الشوكية. 18
صورة 3: الحبل الشوكي محاط بثلاث طبقات سحائية. 18
صورة 4: بزل قطني. 19
صورة 5: أعمدة الحبل الشوكي 20
صورة 6: ظهور جذور الأعصاب الشوكية. 20
صورة 7: الأجزاء الثلاثة من جذع الدماغ. 21
صورة 8: البطين الرابع. 21
صورة 9: النخاع المستطيل. 22
صورة 10: موقع المخيخ داخل الجمجمة. 23
صورة 11: المخيخ. 23
صورة 12: فصوص المخيخ. 23
صورة 13: السويقات المخيخية. 24
صورة 14: مقارنة بين الدماغ والمخيخ. 24
صورة 15: مقارنة بين سطح قشرة المخيخ والقشرة الدماغية. 24
صورة 16: المخ. 25
صورة 17: الدماغ الانتهائي والدماغ البيني. 25
صورة 18: مقطع جبهي من الدماغ. 26
صورة 19: منظر جانبي للدماغ. 26
صورة 20: السائل الدماغي الشوكي. 27
صورة 21: الحجرة خارج الدماغ. 27
صورة 22: الحجرة داخل الدماغ. 27
صورة 23: الجهاز البطيني. 28
صورة 24: مسال سيلفيوس. 28
صورة 25: امتصاص السائل الدماغي الشوكي. 28
صورة 26: الدماغ الداخلي. 29
صورة 27: المهاد. 29

صورة 28: الثالامي، الرؤية العليا..... 30
صورة 29: نوى المهاد. 30
صورة 30: موقع الوِطاء 30
صورة 31: نوى منطقة تحت المهاد..... 30
صورة 32: المخطط المخطط (المخطط الهوائي). 31
صورة 33: الكرة الشاحبة. 32
صورة 34: التروية الشريانية لـلدماغ..... 34
صورة 35: دائرة ويليس. 34
صورة 36: الشرايين الدماغية..... 35
صورة 37: الجهاز الفقري القاعدي. 35
صورة 38: نسيج عصبي. 38
صورة 39: تشريح الخلية العصبية النموذجية. 38
صورة 40: الميتوكوندريا. 39
صورة 41: جسم الخلية في الخلية العصبون..... 39
صورة 42: مشبك محوري- محوري. 40
صورة 43: الهيكل الخلوي للخلايا العصبية. 40
صورة 44: عصبون أحادي القطب. 40
صورة 45: عصبون ثنائي القطب. 41
صورة 46: عصبون متعدد الأقطاب. 41
صورة 47: المسارات داخل الجهاز العصبي المركزي. 42
صورة 48: الخلايا الدبقية. 43
صورة 49: الخلايا الدبقية المركزية. 43
صورة 50: الخلايا النجمية من النوع الأول، المحيطة بشعيرات الدم. 44
صورة 51: خلية نجمية من النوع الثاني تحيط بمشبك عصبي. 44
صورة 52: خلية الدبق قليلة التغصن. 45
صورة 53: البطانة العصبية. 45
صورة 54: غمد الميالين. 45
صورة **55**: الخلايا الدبقية العصبية المحيطية 46
صورة 56: الألياف العصبية داخل الجهاز العصبي المحيطي..... 47

صورة 57: قنوات ومضخات في غشاء البلازما للخلايا العصبية. 49
صورة 58: الانتشار القفزي والمستمر للسيالات العصبية. 50
صورة 59: مشبك كيميائي. 51
صورة 60: مشبك كيميائي. 52
صورة 61: أجزاء المشبك الكيميائي. 52
صورة 62: ألياف عصبية في الجهاز العصبي المحيطي. 55
صورة 63: وصلة عصبية عضلية. 55
صورة 64: الحويصلات المشبكية. 56
صورة 65: جزيئات الأستيل كولين. 56
صورة 66: مستقبلات ACh عند لوحة نهاية المحرك. 57
صورة 67: اندماج الحويصلات مع الغشاء. 57
صورة 68: تحليل جزيئات ACh بواسطة أستيل كولينستيراز. 57
صورة 69: الناقلات العصبية الرئيسية. 60
صورة 70: مستقبلات الجسم. 69
صورة 71: ألياف عصبية شعورية. 70
صورة 72: سلسلة من ثلاثة خلايا عصبية للانتقال الحسي الجسدي. 71
صورة 73: القطاعات الجلدية. 71
صورة 74: قطاع جلدي. 72
صورة 75: مقطع طولي لكرة العين. 74
صورة 76: طبقات العين الثلاث. 75
صورة 77: مخروط. 76
صورة 78: شبكية الأنف والشبكية الصدغية. 77
صورة 79: عصا. 78
صورة 80: مسارات الإرسال البصري. 79
صورة 81: الجهاز السمعي. 80
صورة 82: السلسلة العظمية. 81
صورة 83: جزء من القوقعة. 81
صورة 84: القناة الدهليزية. 82
صورة 85: القناة الطبلية. 82

صورة 86: عضو كورتي. 83
صورة 87: القوقعة والعقدة الحلزونية. 84
صورة 88: العصب القوقعي. 85
صورة 89: المتاهة العظمية. 86
صورة 90: المتاهة الغشائية. 87

جدول المحتويات

إهداءات 1
أهدي هذه الأطروحة: 2
شكر وتقدير 3
أود أن أشكر: 4
تقديم 6
نوروماتيك Neuromatiq 7
إختصارات 10
إختصارات Abbreviations 11
مقدمة 13
مقدمة 14
نظرة تشريحية عامة 16
التشريح العصبي - مفاهيم عامة 17
الحبل الشوكي 18
جذع الدماغ 21
المخيخ 23
المخ 25
السائل الدماغي الشوكي 27
المهاد والوطاء 29
العقد القاعدية 31
الغدة النخامية والصنوبرية 33
التروية الشريانية 34
المبادئ الأساسية 36
المبادئ الأساسية - مفاهيم عامة 37
الخلايا العصبية 38
الخلايا الدبقية 43
السيالة العصبية 48
المشابك 51
الوصلة العصبية العضلية 55

الناقلات العصبية 58
الحاجز الدموي الدماغي..... 61
اللدونة العصبية 63
الأنظمة الحسية 67
الأنظمة الحسية - عموميات 68
الحساسية الشعورية 69
الرؤية 74
السمع 80
التوازن..... 86
الشم 89
التذوق 91
الأنظمة الحركية..... 93
الأنظمة الحركية - نظرة عامة 94
النظام الهرمي..... 95
النظام خارج الهرمي..... 97
دور المخيخ..... 99
الجهاز العصبي اللاإرادي 101
ردود الأفعال 103
الوظائف العليا 105
الوظائف العليا - نظرة عامة..... 106
الذاكرة والتعلم..... 107
الوعي 111
النوم 114
اللغة..... 119
الجهاز الحوفي 122
الاضطرابات العصبية..... 124
الاضطرابات العصبية - عموميات..... 125
السكتة الدماغية 126
الصرع..... 129
مرض باركنسون..... 133
مرض الزهايمر 136

الألم 139
الوهن العضلي الوبيل 143
التصلب المتعدد 145
الحبسات الكلامية 148
الخاتمة 150
الخاتمة 151
الملخص 152
الملخص 153
ردود الفعل 154
التعليقات و ردود الفعل 155
المراجع 159
المراجع المكتوبة 160
مراجع تبسيط العلوم 172
المحتويات 174
رسوم توضيحية 175
جدول المحتويات 179