

[U]

HAL BIBLIO

Estimation non-invasive de la pression intracrânienne

Analyse bibliométrique multi-axes par intelligence artificielle

Co-citation network · Consensus clustering · Synthèse Claude Sonnet 4.5 · Méta-analyse Claude Opus 4.6

3

AXES DE RECHERCHE

870

ARTICLES-SOURCES

6 405

RÉFÉRENCES CO-CITÉES

13

CLUSTERS

AXE 1

Contexte clinique hypertension intracrânienne

262 articles-sources · 12 clusters · PubMed 2026 · Synthèse Claude Opus 4.6 · 262 articles · 4 clusters

AXE 2

Techniques d'imagerie non-invasives

126 articles-sources · 6 clusters · PubMed 2026 · Synthèse Claude Opus 4.6 · 126 articles · 4 clusters

AXE 3

Intelligence artificielle et prédiction

482 articles-sources · 23 clusters · PubMed 2026 · Synthèse Claude Opus 4.6 · 482 articles · 5 clusters

Sommaire

PRÉAMBULE

–	Méthodologie	2
–	Synthèse des connaissances	2
–	Synthèse croisée multi-axes	2

AXE 1 – CONTEXTE CLINIQUE HYPERTENSION INTRACRÂNIENNE

1.1	Analyse bibliométrique · 262 articles · 4 clusters	10
1.2	Bibliographie détaillée · Top 30 par cluster	?

AXE 2 – TECHNIQUES D'IMAGERIE NON-INVASIVES

2.1	Analyse bibliométrique · 126 articles · 4 clusters	9
2.2	Bibliographie détaillée · Top 30 par cluster	?

AXE 3 – INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET PRÉDICTION

3.1	Analyse bibliométrique · 482 articles · 5 clusters	9
3.2	Bibliographie détaillée · Top 30 par cluster	?

HAL Biblio — UMAN[ia] 2026 · Estimation non-invasive de la pression intracrânienne

Méthodologie

SOURCE

OpenAlex + PubMed — base ouverte de ~250M de publications (OpenAlex) complétée par PubMed (NCBI) pour les articles récents non encore indexés.

CLUSTERING

Double algorithme Leiden + Louvain avec détection de consensus pour identifier les noyaux thématiques stables. Réseau cappé à 5 000 articles.

MÉTA-ANALYSE

Claude Opus 4.6 (Anthropic) — synthèse croisée multi-axes, gaps structurels, convergences transversales.

RÉSEAU

Graphes de co-citation (articles cités ensemble ≥ 2 fois), enrichis par similarité sémantique via embeddings SPECTER (Allen AI).

SYNTHÈSE CLUSTERS

Claude Sonnet 4.5 (Anthropic) — analyse structurée de chaque cluster avec références aux 30 articles les plus cités.

DATE D'ANALYSE

16 mars 2026

Synthèse des connaissances

{n_arts} articles-sources · 20 articles-sources clés cités · Claude Opus 4.6

Synthèse croisée multi-axes : Estimation non-invasive de la pression intracrânienne

L'estimation non-invasive de la pression intracrânienne (PIC) représente un enjeu majeur en neuro-réanimation, où la surveillance de ce paramètre physiologique est cruciale pour la prise en charge des traumatismes crâniens sévères, des accidents vasculaires cérébraux hémorragiques, de l'hydrocéphalie et de l'hypertension intracrânienne idiopathique. Cette synthèse croise trois axes d'analyse couvrant le contexte clinique des pathologies avec hypertension intracrânienne, les techniques d'imagerie et ultrasonographiques non-invasives, ainsi que les perspectives d'intelligence artificielle pour la prédiction. Le corpus analysé révèle une convergence remarquable autour de la nécessité de développer des alternatives aux méthodes invasives de référence (drainage ventriculaire externe, capteurs intraparenchymateux), dont les risques infectieux et hémorragiques limitent l'utilisation généralisée.

1. Fondements physiopathologiques et évaluation clinique standardisée

PREUVES SOLIDES

Preuves. L'échelle de coma de Glasgow [1] constitue depuis 1974 l'outil universel d'évaluation de la conscience altérée, validé dans l'ensemble des pathologies neurovasculaires et traumatiques. La compréhension des dynamiques du liquide cébrospinal et du débit sanguin cérébral [2] fournit le cadre conceptuel pour interpréter les mesures de PIC. La corrélation entre pression lombaire et PIC tissulaire dans les systèmes communicants [3] valide les approches de mesure indirecte. Les mécanismes de dysfonction de la barrière hémato-encéphalique et de couplage neurovasculaire unifient les différentes étiologies d'hypertension intracrânienne [4].

Contradictions. La relation entre les paramètres hémodynamiques mesurés (indice de pulsatilité, vitesses sanguines) et la PIC réelle est influencée par de multiples facteurs confondants. L'essai BEST:TRIP [5] a remis en question la valeur ajoutée du monitoring invasif systématique de la PIC par rapport à une prise en charge basée sur l'imagerie et l'examen clinique.

Limites. Les critères diagnostiques varient selon les pathologies (critères révisés du pseudotumor cerebri [6], ICH Score [7]), rendant difficile une approche unifiée de l'estimation non-invasive applicable à toutes les situations cliniques.

2. Échographie du diamètre de la gaine du nerf optique (ONSD)

PREUVES SOLIDES

Preuves. L'échographie ONSD s'est imposée comme la méthode non-invasive la plus fiable et reproductible au chevet du patient pour détecter l'hypertension intracrânienne [8]. Une étude prospective multimodale a confirmé que l'ONSD constitue le meilleur estimateur ultrasonographique de la PIC parmi les paramètres disponibles [9]. La technique est simple, rapide, non invasive et disponible dans la majorité des unités de soins intensifs.

Contradictions. Les seuils diagnostiques optimaux varient selon les études (généralement entre 5,0 et 5,9 mm), et la sensibilité/spécificité dépendent de la population étudiée et de la définition de l'hypertension intracrânienne

retenue. La technique détecte une élévation de PIC mais ne fournit pas une valeur quantitative précise.

Limites. Opérateur-dépendante, l'échographie ONSD nécessite une formation spécifique. Les pathologies orbitaires préexistantes peuvent fausser les mesures. La relation ONSD-PIC n'est pas linéaire sur l'ensemble du spectre des valeurs de PIC.

3. Doppler transcrânien et modélisation hémodynamique

PREUVES MODÉRÉES

Preuves. Le Doppler transcrânien (DTC) permet d'estimer la PIC à partir des vitesses sanguines cérébrales [10]. Des modèles mathématiques combinant DTC et pression artérielle ont été développés pour prédire les courbes de PIC de manière continue et adaptative [11]. La modélisation de l'interaction PIC-hémodynamique fournit un cadre théorique pour comprendre les ondes plateau et la dynamique pulsatile [12].

Contradictions. L'indice de pulsatilité, longtemps proposé comme marqueur indirect de la PIC, présente une relation complexe avec celle-ci, influencée par la compliance artérielle, la fréquence cardiaque et les résistances vasculaires cérébrales [13]. Les valeurs prédictives varient considérablement selon les populations.

Limites. Absence de fenêtre acoustique temporelle chez 10-15% des patients. Mesures discontinues limitant le suivi continu. Nécessité d'une expertise technique importante pour des mesures fiables.

4. IRM et techniques avancées d'imagerie

PREUVES MODÉRÉES

Preuves. L'IRM permet une estimation non-invasive de l'élastance intracrânienne corrélée à la PIC [14]. La spectroscopie de corrélation diffuse et la spectroscopie proche infrarouge (NIRS) offrent un suivi continu de la réactivité cérébrovasculaire [15]. Les standards de neuroimagerie des maladies des petits vaisseaux [16] permettent d'identifier les patients à risque.

Contradictions. L'IRM fournit des mesures ponctuelles incompatibles avec une surveillance continue. Les corrélations entre paramètres IRM et PIC directe restent modestes dans certaines populations.

Limites. Accessibilité limitée de l'IRM en contexte aigu. Contre-indications fréquentes en réanimation (matériel ferromagnétique, instabilité hémodynamique). Coût et complexité logistique élevés.

5. Perspectives de l'intelligence artificielle et aide à la décision

ÉMERGENT

Preuves. Les approches de machine learning appliquées à la neuroimagerie et aux données multiparamétriques de monitoring ouvrent des perspectives pour la prédiction de l'évolution de la PIC [17]. L'intégration de multiples biomarqueurs non-invasifs dans des algorithmes prédictifs pourrait améliorer la précision diagnostique. Les systèmes d'aide à la décision clinique basés sur les guidelines AHA/ASA [18] structurent déjà la prise en charge.

Contradictions. Les modèles d'IA restent largement en phase de développement et validation. Peu d'études prospectives comparent directement les prédictions algorithmiques aux mesures invasives de référence.

Limites. Risque de surapprentissage sur des cohortes spécifiques. Nécessité de validation externe multicentrique. Questions éthiques et réglementaires sur l'intégration en pratique clinique. Hétérogénéité des populations limitant la généralisabilité.

MÉCANISME/MÉTHODE	EFFET/MESURE	PRINCIPALES PREUVES	NIVEAU DE PREUVE
Échographie ONSD	Détection hypertension IC (seuil ~5mm)	Rajajee et al., études prospectives multimodales	FORT
Doppler transcrânien	Estimation PIC via vitesses cérébrales	Modèles combinés DTC/PA, index de pulsatilité	MODÉRÉ
Indice de pulsatilité	Marqueur indirect de PIC	Relation complexe, multiples confondants	MODÉRÉ
IRM élastance	Estimation compliance intracrânienne	Corrélations avec PIC invasive	MODÉRÉ
NIRS réactivité	Suivi autoregulation cérébrovasculaire	Validation en cours vs méthodes invasives	ÉMERGENT
Modèles mathématiques	Prédiction continue courbes PIC	Algorithmes adaptatifs DTC+PA	MODÉRÉ
Machine learning multimodal	Prédiction évolution PIC	Études rétrospectives, validation limitée	ÉMERGENT
Échelle Glasgow + imagerie	Alternative au monitoring invasif	Essai BEST:TRIP	FORT

LACUNES DE RECHERCHE IDENTIFIÉES

- **Absence de gold standard non-invasif quantitatif:** Aucune méthode non-invasive actuelle ne fournit une valeur numérique précise de PIC comparable aux mesures invasives sur l'ensemble du spectre physiologique.
- **Hétérogénéité des seuils diagnostiques:** Les valeurs seuils pour l'ONSD et l'indice de pulsatilité varient selon les études, populations et définitions de l'hypertension intracrânienne.
- **Validation prospective multicentrique insuffisante:** La plupart des études sont monocentriques avec des effectifs limités, réduisant la généralisabilité des résultats.
- **Intégration multimodale sous-développée:** Les approches combinant plusieurs méthodes non-invasives (ONSD + DTC + NIRS) restent peu évaluées de manière systématique.
- **Monitoring continu non-invasif:** Les techniques actuelles fournissent des mesures ponctuelles alors que la surveillance continue est cliniquement essentielle.
- **Populations pédiatriques et spécifiques:** Peu de données de validation dans les populations pédiatriques, gériatriques ou avec comorbidités spécifiques.

QUESTIONS DE RECHERCHE SUGGÉRÉES

→ Un algorithme combinant ONSD, Doppler transcrânien et paramètres hémodynamiques systémiques peut-il atteindre une précision diagnostique suffisante pour remplacer le monitoring invasif dans des indications sélectionnées ?

→ Quels sont les seuils optimaux d'ONSD et d'indice de pulsatilité selon l'étiologie de l'hypertension intracrânienne (traumatique, hémorragique, idiopathique) ?

→ Les modèles de machine learning entraînés sur des données multiparamétriques peuvent-ils prédire la trajectoire de la PIC sur 24-48 heures avec une précision cliniquement utile ?

→ Une stratégie de prise en charge guidée par des méthodes non-invasives combinées produit-elle des outcomes équivalents à celle guidée par monitoring invasif dans les traumatismes crâniens modérés à sévères ?

3/4 axes analysés → 75% de convergence

Les trois axes présentent une convergence élevée autour de plusieurs constats fondamentaux : la nécessité clinique impérieuse d'alternatives non-invasives au monitoring de la PIC, la supériorité actuelle de l'échographie ONSD parmi les techniques ultrasonographiques, et les limites de l'indice de pulsatilité du Doppler transcrânien comme marqueur isolé. La divergence principale concerne le niveau de maturité technologique : l'axe clinique souligne l'essai BEST:TRIP questionnant l'utilité du monitoring invasif systématique, tandis que l'axe techniques non-invasives met en évidence les corrélations imparfaites avec les mesures de référence. L'axe intelligence artificielle reste embryonnaire, avec peu de preuves directement applicables à l'estimation de la PIC. Une convergence forte émerge sur l'intérêt d'approches multimodales intégrant plusieurs paramètres non-invasifs, suggérant que les futures avancées résideront dans l'algorithmique combinatoire plutôt que dans une technique unique.

RÉFÉRENCES DE LA SYNTHÈSE GLOBALE

- Teasdale G, Jennett B (1974). *Assessment of coma and impaired consciousness: a practical scale*. Lancet. Citations: >14000. DOI: 10.1016/S0140-6736(74)91639-0
- Czosnyka M, Pickard JD (2004). *Monitoring and interpretation of intracranial pressure*. Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry. Citations: >1500. DOI: 10.1136/jnnp.2003.033126
- Lenfeldt N et al. (2007). *Cerebrospinal fluid pressure assessed by lumbar puncture agrees with intracranial pressure*. Neurology. Citations: >200. DOI: 10.1212/01.wnl.0000250270.54587.71
- Zlokovic BV (2008). *The blood-brain barrier in health and chronic neurodegenerative disorders*. Neuron. Citations: >3000. DOI: 10.1016/j.neuron.2008.01.003
- Chesnut RM et al. (2012). *A trial of intracranial-pressure monitoring in traumatic brain injury*. New England Journal of Medicine (BEST:TRIP). Citations: >1200. DOI: 10.1056/NEJMoa1207363
- Friedman DI et al. (2013). *Revised diagnostic criteria for the pseudotumor cerebri syndrome in adults and children*. Neurology. Citations: >800. DOI: 10.1212/WNL.0b013e31828799f0
- Hemphill JC et al. (2001). *The ICH Score: a simple, reliable grading scale for intracerebral hemorrhage*. Stroke. Citations: >2500. DOI: 10.1161/01.STR.32.4.891
- Rajajee V et al. (2011). *Optic nerve ultrasound for the detection of raised intracranial pressure*. Neurocritical Care. Citations: >400. DOI: 10.1007/s12028-011-9606-8
- Robba C et al. (2018). *Optic nerve sheath diameter measured sonographically as non-invasive estimator of intracranial pressure: a systematic review and meta-analysis*. Intensive Care Medicine. Citations: >300. DOI: 10.1007/s00134-018-5305-7
- Aaslid R et al. (1982). *Noninvasive transcranial Doppler ultrasound recording of flow velocity in basal cerebral arteries*. Journal of Neurosurgery. Citations: >3000. DOI: 10.3171/jns.1982.57.6.0769
- Schmidt B et al. (2003). *Adaptive noninvasive assessment of intracranial pressure and cerebral autoregulation*. Stroke. Citations: >200. DOI: 10.1161/01.STR.0000065893.43713.06
- Avezaat CJ, van Eijndhoven JH (1984). *The role of the pulsatile pressure variations in intracranial pressure monitoring*. Neurosurgical Review. Citations: >150. DOI: 10.1007/BF01780697

- Bellner J et al. (2004). *Transcranial Doppler sonography pulsatility index (PI) reflects intracranial pressure (ICP)*. Surgical Neurology. Citations: >400. DOI: 10.1016/j.surneu.2003.09.007
- Alperin N et al. (2000). *MRI study of cerebral blood flow and CSF flow dynamics in an upright posture*. Journal of Magnetic Resonance Imaging. Citations: >200. DOI: 10.1002/1522-2586
- Brady K et al. (2010). *Continuous monitoring of cerebrovascular pressure reactivity after traumatic brain injury*. Critical Care Medicine. Citations: >200. DOI: 10.1097/CCM.0b013e3181d16e9f
- Wardlaw JM et al. (2013). *Neuroimaging standards for research into small vessel disease and its contribution to ageing and neurodegeneration*. Lancet Neurology. Citations: >3500. DOI: 10.1016/S1474-4422(13)70124-8
- Güiza F et al. (2017). *Early detection of increased intracranial pressure episodes in traumatic brain injury*. Critical Care Medicine. Citations: >100. DOI: 10.1097/CCM.0000000000002770
- Hemphill JC et al. (2015). *Guidelines for the management of spontaneous intracerebral hemorrhage*. Stroke (AHA/ASA). Citations: >2000. DOI: 10.1161/STR.0000000000000069
- Raboel PH et al. (2012). *Intracranial pressure monitoring: invasive versus non-invasive methods—a review*. Critical Care Research and Practice. Citations: >300. DOI: 10.1155/2012/950393
- Carney N et al. (2017). *Guidelines for the management of severe traumatic brain injury, Fourth Edition*. Neurosurgery. Citations: >2000. DOI: 10.1227/NEU.0000000000001432

Synthèse croisée multi-axes

Ce que la cartographie dit

- 1 Déséquilibre quantitatif** : l'axe Intelligence artificielle et prédiction (482 articles) domine face à Techniques d'imagerie non-invasives (126 articles), révélant une maturité inégale entre les champs de recherche.
- 2 Structuration multi-clusters** : 41 clusters identifiés au total, organisés en 3 axes complémentaires couvrant 870 articles-sources.
- 3 Axe 2 — Contexte clinique hypertension intracrânienne** : 262 articles-sources, 12 clusters. Couverture du champ « contexte clinique hypertension intracrânienne ».
- 4 Axe 3 — Techniques d'imagerie non-invasives** : 126 articles-sources, 6 clusters. Couverture du champ « techniques d'imagerie non-invasives ».
- 5 Axe 4 — Intelligence artificielle et prédiction** : 482 articles-sources, 23 clusters. Couverture du champ « intelligence artificielle et prédiction ».

Analyse bibliométrique explorant les méthodes non-invasives d'estimation de la pression intracrânienne, des biomarqueurs morphologiques du nerf optique aux algorithmes d'intelligence artificielle, en passant par les corrélations cliniques et les applications en soins critiques.

Axe 1 — Contexte clinique hypertension intracrânienne

262 articles-sources · 12 clusters · PubMed 2026 · Synthèse Claude Opus 4.6 · 262 articles · 4 clusters · Synthèse Claude Sonnet 4.5

Le système a cartographié le champ de recherche « Contexte clinique hypertension intracrânienne ». Les clusters révèlent 12 niveaux d'investigation :

Cluster 0 (706 articles) — Ce cluster réunit des travaux portant sur les pathologies neurovasculaires et neurotraumatiques caractérisées par une élévation de la pression intracrânienne et des lésions cérébrales structurales. Le noyau thématique central est l'hémorragie intracérébrale (HIC), avec des contributions majeures sur l'estimation volumétrique des hématomes par la méthode ABC/2, la stratification pronostique par le ICH Score, la croissance hémorragique précoce, et les mécanismes physiopathologiques de lésion secondaire. Les essais chirurgicaux STICH et STICH II ont défini les limites de l'intervention chirurgicale précoce comparée au traitement conservateur dans les hématomes supratentoriels. **[9,27]**

Cluster 1 (591 articles) — Ce cluster rassemble des travaux centrés sur les mécanismes de circulation et de clairance des fluides dans le système nerveux central, et leurs implications dans les pathologies neurologiques. Le socle conceptuel repose sur la découverte du système glymphatique — une voie paravasculaire facilitant le flux de liquide cébrospinal (LCS) à travers le parenchyme cérébral et permettant l'élimination de solutés interstitiels, dont le peptide amyloïde- β . Ce système est fortement dépendant du sommeil, qui augmente l'espace extracellulaire et accélère la clairance métabolique, tandis que le cycle veille-sommeil module directement la dynamique de l'amyloïde- β . **Dynamique des fluides cérébraux, système glymphatique et clairance des solutés : rôles dans la neurodégénérescence, l'œdème cérébral et le vieillissement.**

Cluster 2 (558 articles) — Ce cluster réunit des travaux centrés sur la prise en charge urgente des pathologies cérébrovasculaires et neuro-critiques, avec un noyau dominant consacré à l'AVC ischémique aigu. Le traitement thrombolytique par alteplase constitue le socle thérapeutique, démontré efficace dans la fenêtre de 3 heures puis étendu à 4,5 heures. Une révolution thérapeutique majeure est survenue avec les essais de thrombectomie mécanique endovasculaire, qui ont prouvé le bénéfice de l'extraction du thrombus par stent-retrieveur dans les occlusions proximales antérieures. **Prise en charge neurovasculaire aiguë : de l'AVC ischémique à la neuroprotection en soins intensifs, avec apports de la neuroimagerie avancée et du monitoring intracrânien.**

Cluster 1 (56 articles) — Ce front de recherche se concentre sur le développement et la validation d'approches non-invasives pour surveiller la pression intracrânienne (PIC). Les approches méthodologiques dominantes incluent l'ultrasonographie du diamètre de la gaine du nerf optique (ONSD), les capteurs sans fil portables basés sur la déformation crânienne, et l'échographie point-of-care (POCUS). Les efforts de standardisation sont prioritaires, avec des consensus internationaux sur les critères de qualité d'imagerie ONSD. **Surveillance Non-Invasive de la Pression Intracrânienne**

Cluster 2 (43 articles) — Ce front de recherche se caractérise par des approches méthodologiques innovantes combinant neuroimagerie avancée et modélisation physiologique. La méthode DTI-ALPS (Diffusion Tensor Image Analysis ALong the Perivascular Space) émerge comme technique non-invasive de référence pour évaluer le système glymphatique, complétée par des approches SPECT dynamiques et l'analyse quantitative des espaces périvasculaires élargis. Les résultats récents révèlent le rôle central des dysfonctions du système glymphatique dans diverses pathologies neurologiques, dépassant le cadre initial de l'hypertension intracrânienne. **Neuroimagerie du système glymphatique et clearance cérébrale**

Cluster 3 (24 articles) — Ce front de recherche se concentre sur l'utilisation d'approches d'imagerie multimodale sophistiquées pour le diagnostic et la prise en charge des pathologies neurovasculaires aiguës chez l'enfant. Les méthodes dominantes incluent l'imagerie par susceptibilité magnétique (SWI), l'IRM avec marquage de spin artériel (ASL), et l'imagerie de contraste de phase pour évaluer la perfusion cérébrale et détecter les microhémorragies. Les résultats récents révèlent l'importance cruciale de la détection précoce des complications comme l'hyperperfusion post-opératoire dans la maladie de moyamoya, l'amélioration du diagnostic des thromboses veineuses cérébrales, et l'identification des biomarqueurs d'imagerie prédictifs d'évolution défavorable. **Neuroimagerie Avancée en Urgences Neurovasculaires Pédiatriques**

6 micro-clusters complètent le panorama : Mécanismes Moléculaires et Imagerie dans l'Hydrocéphalie (12 articles), : Probablement un article fondateur sur la physiopathologie de l'HTIC post-traumatique, servant de référence dans les études sur l'œdème cérébral. - (11 articles), Congrès Neurologique Canadien: Évolution Disciplinaire (5 articles), Neuroimaging Evolution in CSF Pressure Disorders (2 articles), Neuroimagerie Quantitative Vétérinaire pour Lésions Cérébrales (2 articles).



CE QUE HAL A TROUVÉ

Gap temporel critique : Malgré la découverte du système glymphatique en 2012-2013 et la caractérisation de la méthode DTI-ALPS depuis 2017, aucune étude prospective longitudinale n'a corrélé dynamiquement les variations de la fonction glymphatique avec l'évolution de la pression intracrânienne chez les patients en soins intensifs neurologiques, créant un fossé de 10+ ans entre mécanismes fondamentaux et monitoring clinique temps-réel.

Tension mécanistique non résolue : Les clusters révèlent une contradiction apparente : l'aquaporine-4 astrocytaire est présentée simultanément comme protectrice (réduction de l'œdème) et délétère (contribution au déclin glymphatique lors du vieillissement), sans modèle intégratif expliquant cette dualité fonctionnelle selon le contexte pathologique aigu versus chronique.

Signal faible émergent : L'apparition du syndrome neuro-oculaire associé aux vols spatiaux (SANS) comme modèle d'étude de l'hypertension intracrânienne chronique suggère une convergence inattendue entre médecine spatiale et neuro-réanimation terrestre, avec des implications pour le monitoring non-invasif prolongé inexploitées dans les contextes de soins intensifs traditionnels.

CLUSTERS DÉTAILLÉS — 262 ARTICLES SOURCES · 4 CLUSTERS

CLUSTER 0 706 articles dans le réseau

Pathologies neurologiques aiguës avec hypertension intracrânienne : diagnostic, neuroimagerie et prise en charge des accidents vasculaires cérébraux hémorragiques, des traumatismes crâniens et des syndromes d'hypertension intracrânienne.

Analyse Bibliométrique du Cluster

Pathologies neurologiques aiguës avec hypertension intracrânienne : diagnostic, neuroimagerie et prise en charge des accidents vasculaires cérébraux hémorragiques, des traumatismes crâniens et des syndromes d'hypertension intracrânienne.

Ce cluster réunit des travaux portant sur les pathologies neurovasculaires et neurotraumatiques caractérisées par une élévation de la pression intracrânienne et des lésions cérébrales structurales. Le noyau thématique central est l'hémorragie intracérébrale (HIC), avec des contributions majeures sur l'estimation volumétrique des hématomes par la méthode ABC/2 [15], la stratification pronostique par le ICH Score [16], la croissance hémorragique précoce [24], et les mécanismes physiopathologiques de lésion secondaire [29]. Les essais chirurgicaux STICH [23] et STICH II [26] ont défini les limites de l'intervention chirurgicale précoce comparée au traitement conservateur dans les hématomes supratentoriels. Les recommandations cliniques successives pour la prise en charge de l'HIC [9,27] structurent la pratique actuelle.

L'AVC ischémique constitue un second axe, avec les lignes directrices de 2013 et 2018 [4,7], la méta-analyse démontrant l'efficacité de la thrombectomie endovasculaire [5], et la craniectomie décompressive dans l'infarctus malin sylvien [20]. La charge mondiale de l'AVC a été quantifiée par l'étude GBD 2019 [6]. La maladie des petits vaisseaux cérébraux est abordée sous l'angle de ses mécanismes et de sa neuroimagerie [12,21,22].

L'hémorragie sous-arachnoïdienne anévrismale est représentée par les recommandations de prise en charge [10], l'échelle de Hunt-Hess [11] et l'épidémiologie des anévrismes non rompus [18]. La thrombose veineuse cérébrale fait l'objet de recommandations diagnostiques et thérapeutiques spécifiques [19].

Le traumatisme crânien est couvert par la revue fondatrice de Ghajar [13], l'échelle de Glasgow [2] et l'essai BEST:TRIP sur le monitoring de la pression intracrânienne [28]. L'hypertension intracrânienne idiopathique est définie par les critères révisés du syndrome de pseudotumor cerebri [25]. L'ensemble est unifié par les mécanismes physiopathologiques communs : dysfonction de la barrière hémato-encéphalique [8], couplage neurovasculaire [14], et l'hydrocéphalie à pression normale [30]. La méthodologie de revue systématique encadre ces travaux [1].

- [2] Teasdale & Jennett (1974) : Article fondateur introduisant le Glasgow Coma Scale, devenu l'outil universel d'évaluation de la conscience altérée dans toutes les pathologies neurovasculaires et traumatiques du cluster.

- [9,27] Guidelines AHA/ASA pour l'HIC (2015 et 2022) : Ces recommandations définissent le cadre normatif complet de prise en charge de l'hémorragie intracérébrale spontanée, depuis le diagnostic jusqu'au traitement, et structurent la recherche clinique dans ce domaine.

- [15,16] Kothari et al. (1996) et Hemphill et al. (2001) : L'estimation volumétrique ABC/2 et le ICH Score constituent les deux outils cliniques les plus utilisés pour l'évaluation initiale et la stratification pronostique dans l'HIC.

- [28] Chesnut et al. (2012) : Essai randomisé BEST:TRIP démontrant que le monitoring de la pression intracrânienne dans le traumatisme crânien sévère n'est pas supérieur à une prise en charge guidée par l'imagerie et l'examen clinique, remettant en question un paradigme établi.

- [25] Friedman et al. (2013) : Critères diagnostiques révisés du syndrome de pseudotumor cerebri, essentiels pour distinguer l'hypertension intracrânienne idiopathique des causes secondaires, intégrant les anomalies neuroradiologiques caractéristiques.

- [30] Hakim & Adams (1965) : Description princeps de l'hydrocéphalie à pression normale, texte fondateur identifiant cette entité

clinique traitable comme cause de démence réversible.

- [8] Abbott et al. (2009) : Revue de référence sur la structure et la fonction de la barrière hémato-encéphalique, mécanisme physiopathologique transversal à l'œdème cérébral, au traumatisme et à l'AVC.

L'évolution chronologique révèle trois phases distinctes. La **période fondatrice (1965-1997)** a vu émerger les outils cliniques essentiels : l'hydrocéphalie à pression normale [30], le Glasgow Coma Scale [2], l'échelle de Hunt-Hess [11], la méthode ABC/2 [15] et la description de la croissance hémorragique précoce [24].

La **période de consolidation (2000-2013)** est marquée par les essais chirurgicaux dans l'HIC [23,26], les premières grandes recommandations systématisées [4,10], et les avancées dans la compréhension de la maladie des petits vaisseaux [12,21]. L'essai BEST:TRIP [28] a constitué un tournant dans le monitoring du traumatisme crânien.

La **période récente (2015-2022)** témoigne d'un virage vers la médecine endovasculaire avec la thrombectomie [5], les mises à jour des recommandations intégrant les nouvelles données probantes [7,9,27], et un approfondissement mécanistique avec le couplage neurovasculaire [14] et la maladie des petits vaisseaux [22]. L'élastographie par résonance magnétique [17] illustre l'émergence de techniques de neuroimagerie avancées. La quantification épidémiologique globale [6] et la standardisation méthodologique des revues systématiques [1] reflètent une tendance vers la médecine fondée sur les preuves à l'échelle populationnelle.

Monitoring de la pression intracrânienne : L'essai BEST:TRIP [28] a suscité un débat majeur en ne démontrant pas la supériorité du monitoring invasif de la PIC dans le traumatisme crânien sévère, contredisant des décennies de pratique clinique basée sur ce monitoring. Les critères optimaux de déclenchement thérapeutique restent non résolus.

Chirurgie dans l'hémorragie intracérébrale : Les essais STICH [23] et STICH II [26] n'ont pas montré de bénéfice clair de la chirurgie précoce par rapport au traitement conservateur initial dans les hématomes supratentoriels, créant une incertitude persistante sur les indications chirurgicales que les recommandations successives [9,27] n'ont pas entièrement résolue. Les techniques mini-invasives représentent une lacune à combler.

Craniectomie décompressive : L'analyse poolée [20] a montré une réduction de la mortalité dans l'infarctus malin, mais au prix d'une survie avec handicap sévère, soulevant des questions éthiques sur le rapport bénéfice-risque et la qualité de vie.

Hypertension intracrânienne idiopathique : Malgré les critères révisés [25], les mécanismes physiopathologiques précis restent mal compris, et il n'existe pas d'essai randomisé de grande envergure validant les stratégies thérapeutiques. Le lien entre obésité, pression intracrânienne et atteinte visuelle nécessite des études longitudinales.

Maladie des petits vaisseaux : Bien que les mécanismes soient de mieux en mieux décrits [12,21,22], il n'existe aucune thérapeutique spécifique ciblant directement la pathologie microvasculaire, constituant un gap thérapeutique majeur. La relation entre dysfonction de la barrière hémato-encéphalique [8], couplage neurovasculaire [14] et progression de la maladie reste insuffisamment caractérisée.

TOP 30 ARTICLES — CLASSÉS PAR CITATIONS

1. ★ **PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation** — Annals of Internal Medicine (2018) 37,175 [DOI](#)
2. ☆ **ASSESSMENT OF COMA AND IMPAIRED CONSCIOUSNESS** — The Lancet (1974) 12,970 [DOI](#)
3. ★ **Headache Classification Committee of the International Headache Society (IHS) The International Classification of Headache Disorders, 3rd edition** — Cephalalgia (2018) 10,190 [DOI](#)
4. ★ **Guidelines for the Early Management of Patients With Acute Ischemic Stroke** — Stroke (2013) 7,630 [DOI](#)
5. ☆ **Endovascular thrombectomy after large-vessel ischaemic stroke: a meta-analysis of individual patient data from five randomised trials** — The Lancet (2016) 7,348 [DOI](#)
6. ☆ **Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019** — The Lancet Neurology (2021) 7,101 [DOI](#)
7. ★ **2018 Guidelines for the Early Management of Patients With Acute Ischemic Stroke: A Guideline for Healthcare Professionals From the American Heart Association/American Stroke Association** — Stroke (2018) 5,429 [DOI](#)
8. ☆ **Structure and function of the blood–brain barrier** — Neurobiology of Disease (2009) 4,930 [DOI](#)

9. ★ **Guidelines for the Management of Spontaneous Intracerebral Hemorrhage** — Stroke (2015) 3,935 [DOI](#)
10. ★ **Guidelines for the Management of Aneurysmal Subarachnoid Hemorrhage** — Stroke (2012) 3,472 [DOI](#)
11. ☆ **Surgical Risk as Related to Time of Intervention in the Repair of Intracranial Aneurysms** — Journal of neurosurgery (1968) 3,376 [DOI](#)
12. ☆ **Cerebral small vessel disease: from pathogenesis and clinical characteristics to therapeutic challenges** — The Lancet Neurology (2010) 3,304 [DOI](#)
13. ☆ **Traumatic brain injury** — The Lancet (2000) 2,255 [DOI](#)
14. ☆ **The Neurovascular Unit Coming of Age: A Journey through Neurovascular Coupling in Health and Disease** — Neuron (2017) 2,248 [DOI](#)
15. ★ **The ABCs of Measuring Intracerebral Hemorrhage Volumes** — Stroke (1996) 2,171 [DOI](#)
16. ★ **The ICH Score** — Stroke (2001) 2,113 [DOI](#)
17. ★ **Magnetic Resonance Elastography by Direct Visualization of Propagating Acoustic Strain Waves** — Science (1995) 2,065 [DOI](#)
18. ☆ **Prevalence of unruptured intracranial aneurysms, with emphasis on sex, age, comorbidity, country, and time period: a systematic review and meta-analysis** — The Lancet Neurology (2011) 2,007 [DOI](#)
19. ★ **Diagnosis and Management of Cerebral Venous Thrombosis** — Stroke (2011) 1,919 [DOI](#)
20. ☆ **Early decompressive surgery in malignant infarction of the middle cerebral artery: a pooled analysis of three randomised controlled trials** — The Lancet Neurology (2007) 1,783 [DOI](#)
21. ☆ **Mechanisms of sporadic cerebral small vessel disease: insights from neuroimaging** — The Lancet Neurology (2013) 1,615 [DOI](#)
22. ☆ **Small vessel disease: mechanisms and clinical implications** — The Lancet Neurology (2019) 1,590 [DOI](#)
23. ☆ **Early surgery versus initial conservative treatment in patients with spontaneous supratentorial intracerebral haematomas in the International Surgical Trial in Intracerebral Haemorrhage (STICH): a randomised trial** — The Lancet (2005) 1,544 [DOI](#)
24. ★ **Early Hemorrhage Growth in Patients With Intracerebral Hemorrhage** — Stroke (1997) 1,465 [DOI](#)
25. ★ **Revised diagnostic criteria for the pseudotumor cerebri syndrome in adults and children** — Neurology (2013) 1,410 [DOI](#)
26. ☆ **Early surgery versus initial conservative treatment in patients with spontaneous supratentorial lobar intracerebral haematomas (STICH II): a randomised trial** — The Lancet (2013) 1,372 [DOI](#)
27. ★ **2022 Guideline for the Management of Patients With Spontaneous Intracerebral Hemorrhage: A Guideline From the American Heart Association/American Stroke Association** — Stroke (2022) 1,342 [DOI](#)
28. ★ **A Trial of Intracranial-Pressure Monitoring in Traumatic Brain Injury** — New England Journal of Medicine (2012) 1,304 [DOI](#)
29. ☆ **Intracerebral haemorrhage: mechanisms of injury and therapeutic targets** — The Lancet Neurology (2012) 1,282 [DOI](#)
30. ☆ **The special clinical problem of symptomatic hydrocephalus with normal cerebrospinal fluid pressure** — Journal of the Neurological Sciences (1965) 1,243 [DOI](#)

CLUSTER 1 591 articles dans le réseau**Dynamique des fluides cérébraux, système glymphatique et clairance des solutés : rôles dans la neurodégénérescence, l'œdème cérébral et le vieillissement.**

Analyse du Cluster Bibliométrique

Dynamique des fluides cérébraux, système glymphatique et clairance des solutés : rôles dans la neurodégénérescence, l'œdème cérébral et le vieillissement.

Ce cluster rassemble des travaux centrés sur les mécanismes de circulation et de clairance des fluides dans le système nerveux central, et leurs implications dans les pathologies neurologiques. Le socle conceptuel repose sur la découverte du système glymphatique — une voie paravasculaire facilitant le flux de liquide cébrospinal (LCS) à travers le parenchyme cérébral et permettant l'élimination de solutés interstitiels, dont le peptide amyloïde- β [5]. Ce système est fortement dépendant du sommeil, qui augmente l'espace extracellulaire et accélère la clairance métabolique [7], tandis que le cycle veille-sommeil module directement la dynamique de l'amyloïde- β [22].

La compréhension de la diffusion dans l'espace extracellulaire cérébral fournit le cadre biophysique de ces phénomènes [24]. L'aquaporine-4 (AQP4), canal hydrique localisé principalement aux pieds astrocytaires périvasculaires [25], joue un rôle critique : sa délétion réduit l'œdème cérébral dans des modèles d'intoxication hydrique et d'ischémie [23], et son altération contribue au déclin de la clairance glymphatique lors du vieillissement [27].

La découverte de vaisseaux lymphatiques méningés fonctionnels a constitué une avancée majeure, démontrant que le cerveau possède un drainage lymphatique dural vers les ganglions cervicaux [10,14]. Le dysfonctionnement de ces vaisseaux avec l'âge aggrave l'accumulation d'amyloïde et le déclin cognitif [30]. Les mécanismes de clairance de l'amyloïde- β impliquent également le transport à travers la barrière hémato-encéphalique (BHE) via le récepteur LRP-1 [29], et la rupture de la BHE constitue un biomarqueur précoce du déclin cognitif humain [19]. La physiologie et la pathologie de la BHE ont été extensivement revues [15], soulignant son rôle dans la neurodégénérescence vasculaire [12].

Ces mécanismes convergent vers la compréhension des maladies neurodégénératives, notamment la maladie d'Alzheimer, pour laquelle un cadre diagnostique biologique a été proposé [2], avec des projections épidémiologiques alarmantes [8]. Les astrocytes réactifs neurotoxiques induits par la microglie activée constituent un lien supplémentaire entre neuroinflammation et neurodégénérescence [3]. Le système glymphatique est désormais impliqué dans de multiples pathologies neurologiques [28], et les systèmes de clairance cérébrale représentent des cibles thérapeutiques prometteuses [20].

- [5] Iliff et al. (2012) : Article fondateur décrivant pour la première fois le système de clairance paravasculaire (glymphatique), démontrant que le LCS circule le long des artères pénétrantes pour éliminer les solutés interstitiels, dont l'amyloïde- β . Pierre angulaire conceptuelle du cluster.

- [7] Xie et al. (2013) : Démonstration que le sommeil augmente de 60 % l'espace interstitiel cérébral, accélérant la clairance glymphatique. Établit le lien fonctionnel fondamental entre sommeil et homéostasie métabolique cérébrale.

- [10] Louveau et al. (2015) : Découverte de vaisseaux lymphatiques fonctionnels dans les méninges dures, réfutant le dogme selon lequel le cerveau est dépourvu de système lymphatique. Révolution dans la compréhension du drainage cérébral.

- [14] Aspelund et al. (2015) : Confirmation indépendante et caractérisation du réseau lymphatique dural drainant le fluide interstitiel et les macromolécules cérébrales vers les ganglions cervicaux, renforçant les conclusions de [10].

- [25] Nielsen et al. (1997) : Caractérisation pionnière de la localisation polarisée de l'AQP4 aux pieds astrocytaires périvasculaires, établissant le substrat moléculaire du transport hydrique cérébral exploité par le système glymphatique.

- [23] Manley et al. (2000) : Preuve fonctionnelle que l'AQP4 est déterminante dans la formation de l'œdème cérébral, reliant la biologie moléculaire des aquaporines à la physiopathologie de l'hypertension intracrânienne.

- [12] Zlokovic (2011) : Revue séminale articulant les voies neurovasculaires menant à la neurodégénérescence, intégrant dysfonction de la BHE, déficit de clairance et accumulation protéique pathologique.

- [30] Da Mesquita et al. (2018) : Démonstration que le déclin fonctionnel des lymphatiques méningés avec l'âge aggrave la pathologie Alzheimer, ouvrant des perspectives thérapeutiques ciblant le drainage lymphatique.

L'évolution chronologique révèle trois phases distinctes :

Phase 1 — Bases moléculaires (1997-2008) : Les travaux fondamentaux portent sur la structure et la localisation des aquaporines [17,25], leur rôle dans l'œdème cérébral [23], la clairance de l'amyloïde- β via la BHE [29], et la biophysique de la diffusion extracellulaire [24].

Phase 2 — Découverte du système glymphatique (2012-2015) : Le tournant majeur est la description du système glymphatique [5], suivie de la démonstration de sa régulation par le sommeil [7], de l'identification des lymphatiques méningés [10,14], et de la mise en évidence de son déclin avec l'âge [27]. Des revues synthétiques formalisent le concept [16,20].

Phase 3 — Intégration clinique et translationnelle (2017-2022) : Le virage récent est nettement clinique : implication du système glymphatique dans les pathologies neurologiques [28], rupture de la BHE comme biomarqueur cognitif chez l'humain [19], lien entre lymphatiques méningés et Alzheimer [30], et cadres diagnostiques biologiques pour la démence [2,8]. La neuroinflammation via les astrocytes réactifs s'intègre dans ce schéma [3]. L'imagerie de susceptibilité [21] et les standards de neuroimagerie des maladies des petits vaisseaux [6] accompagnent cette translation vers la clinique.

Mécanismes exacts du flux glymphatique : Le rôle précis de la pulsatilité artérielle versus la diffusion pure dans la propulsion du fluide paravasculaire reste débattu. Les travaux originaux [5] proposent un flux convectif, mais les données sur la diffusion extracellulaire [24] suggèrent que la contribution diffusive pourrait être sous-estimée.

Transposition à l'humain : La majorité des données sur le système glymphatique proviennent de modèles murins [5,7,27]. La démonstration directe chez l'humain reste limitée, bien que des biomarqueurs indirects comme la rupture de la BHE [19] offrent des pistes. Le manque d'outils de neuroimagerie non invasifs pour visualiser le flux glymphatique humain in vivo constitue une lacune majeure.

Relation causale versus corrélative : Si le déclin de la clairance glymphatique corrèle avec le vieillissement [27] et la pathologie Alzheimer [30], la question de savoir si ce déclin est cause ou conséquence de la neurodégénérescence n'est pas tranchée [20,28].

Rôle de l'AQP4 — résultats contradictoires : Bien que la délétion d'AQP4 réduise l'œdème cytotoxique [23], son rôle dans l'œdème vasogénique semble inverse. De plus, le lien mécanistique entre polarisation de l'AQP4 aux pieds astrocytaires [25] et efficacité du flux glymphatique [5,27] demande confirmation par des modèles de dépolarisation sélective.

Hétérogénéité du cluster : Plusieurs articles à très haute citation [1,4,11,13] semblent thématiquement périphériques (santé reproductive, statistiques cardiovasculaires, Moyamoya, dépolarisation corticale), suggérant un bruit dans le regroupement par co-citation ou des liens indirects via des mécanismes vasculaires partagés.

Lacune thérapeutique : Malgré l'identification de multiples systèmes de clairance comme cibles [20,28], aucune intervention thérapeutique ciblant spécifiquement le système glymphatique ou les lymphatiques méningés n'a encore atteint la validation clinique, ce qui représente un gap translationnel important.

TOP 30 ARTICLES — CLASSÉS PAR CITATIONS

1. ★ 🏠 **Yaşlı Kadınlarda Üreme Sağlığı** — DergiPark (Istanbul University) 169,600

2. ★ 🏠 **NIA-AA Research Framework: Toward a biological definition of Alzheimer's disease** — Alzheimer s & Dementia (2018) 9,865 [DOI](#)

3. ☆ 🏠 **Neurotoxic reactive astrocytes are induced by activated microglia** — Nature (2017) 7,742 [DOI](#)

4. ★ **Heart Disease and Stroke Statistics—2018 Update: A Report From the American Heart Association** — Circulation (2018) 7,143 [DOI](#)

5. ★  **A Paravascular Pathway Facilitates CSF Flow Through the Brain Parenchyma and the Clearance of Interstitial Solutes, Including Amyloid β** — Science Translational Medicine (2012) 5,307 [DOI](#)
6. ☆  **Neuroimaging standards for research into small vessel disease and its contribution to ageing and neurodegeneration** — The Lancet Neurology (2013) 5,246 [DOI](#)
7. ★  **Sleep Drives Metabolite Clearance from the Adult Brain** — Science (2013) 5,055 [DOI](#)
8. ☆  **Estimation of the global prevalence of dementia in 2019 and forecasted prevalence in 2050: an analysis for the Global Burden of Disease Study 2019** — The Lancet Public Health (2022) 4,701 [DOI](#)
9. ★  **International consensus diagnostic criteria for neuromyelitis optica spectrum disorders** — Neurology (2015) 4,384 [DOI](#)
10. ☆ **Structural and functional features of central nervous system lymphatic vessels** — Nature (2015) 4,175 [DOI](#)
11. ★  **Interplay between Cortical Spreading Depolarization and Seizures** — Stereotactic and Functional Neurosurgery (2017) 3,704 [DOI](#)
12. ☆ **Neurovascular pathways to neurodegeneration in Alzheimer's disease and other disorders** — Nature reviews. Neuroscience (2011) 2,836 [DOI](#)
13. ☆ **Cerebrovascular "Moyamoya" Disease** — Archives of Neurology (1969) 2,150 [DOI](#)
14. ★  **A dural lymphatic vascular system that drains brain interstitial fluid and macromolecules** — The Journal of Experimental Medicine (2015) 2,087 [DOI](#)
15. ★  **Blood-Brain Barrier: From Physiology to Disease and Back** — Physiological Reviews (2018) 2,053 [DOI](#)
16. ☆ **The Glymphatic System: A Beginner's Guide** — Neurochemical Research (2015) 1,962 [DOI](#)
17. ☆ **Structural determinants of water permeation through aquaporin-1** — Nature (2000) 1,791 [DOI](#)
18. ★  **Autonomic Dysregulation, Cognitive Impairment, and Symptoms of Psychosis as an Unusual Presentation in an Anti-Aquaporin 4-Positive Patient.** — PubMed (2017) 1,762 [DOI](#)
19. ☆ **Blood-brain barrier breakdown is an early biomarker of human cognitive dysfunction** — Nature Medicine (2019) 1,638 [DOI](#)
20. ☆  **Clearance systems in the brain—implications for Alzheimer disease** — Nature Reviews Neurology (2015) 1,593 [DOI](#)
21. ★ **Susceptibility weighted imaging (SWI)** — Magnetic Resonance in Medicine (2004) 1,567 [DOI](#)
22. ★  **Amyloid- β Dynamics Are Regulated by Orexin and the Sleep-Wake Cycle** — Science (2009) 1,517 [DOI](#)
23. ☆ **Aquaporin-4 deletion in mice reduces brain edema after acute water intoxication and ischemic stroke** — Nature Medicine (2000) 1,495 [DOI](#)
24. ★  **Diffusion in Brain Extracellular Space** — Physiological Reviews (2008) 1,449 [DOI](#)
25. ★  **Specialized Membrane Domains for Water Transport in Glial Cells: High-Resolution Immunogold Cytochemistry of Aquaporin-4 in Rat Brain** — Journal of Neuroscience (1997) 1,440 [DOI](#)
26. ☆  **Lymphangiogenesis: Molecular Mechanisms and Future Promise** — Cell (2010) 1,429 [DOI](#)
27. ★  **Impairment of paravascular clearance pathways in the aging brain** — Annals of Neurology (2014) 1,422 [DOI](#)
28. ☆  **The glymphatic pathway in neurological disorders** — The Lancet Neurology (2018) 1,398 [DOI](#)
29. ★  **Clearance of Alzheimer's amyloid- β 1-40 peptide from brain by LDL receptor-related protein-1 at the blood-brain barrier** — Journal of Clinical Investigation (2000) 1,373 [DOI](#)
30. ☆  **Functional aspects of meningeal lymphatics in ageing and Alzheimer's disease** — Nature (2018) 1,341 [DOI](#)

CLUSTER 2 558 articles dans le réseau**Prise en charge neurovasculaire aiguë : de l'AVC ischémique à la neuroprotection en soins intensifs, avec apports de la neuroimagerie avancée et du monitoring intracrânien.**

Analyse du Cluster Bibliométrique

Prise en charge neurovasculaire aiguë : de l'AVC ischémique à la neuroprotection en soins intensifs, avec apports de la neuroimagerie avancée et du monitoring intracrânien.

Ce cluster réunit des travaux centrés sur la prise en charge urgente des pathologies cérébrovasculaires et neuro-critiques, avec un noyau dominant consacré à l'AVC ischémique aigu. Le traitement thrombolytique par alteplase constitue le socle thérapeutique, démontré efficace dans la fenêtre de 3 heures [4] puis étendu à 4,5 heures [7]. Une révolution thérapeutique majeure est survenue avec les essais de thrombectomie mécanique endovasculaire, qui ont prouvé le bénéfice de l'extraction du thrombus par stent-retrieve dans les occlusions proximales antérieures [8,10,11,16,17]. L'extension de cette fenêtre thérapeutique à 16 heures [18] et même 24 heures [13] a été rendue possible grâce à la sélection par imagerie de perfusion, illustrant le concept que « le temps c'est du cerveau » [29].

Ces avancées thérapeutiques ont été encadrées par des recommandations cliniques successives [6,15,25,26,28], assurant la traduction des données probantes en pratique clinique. La neuroimagerie joue un rôle transversal fondamental : l'IRM de diffusion-perfusion [20], l'IRM fonctionnelle basée sur l'oxygénation sanguine (BOLD) [9], la tomographie par cohérence optique [3] et le Doppler transcrânien [22] permettent la sélection des patients et le monitoring hémodynamique cérébral.

Le volet neuro-réanimation est représenté par les essais d'hypothermie thérapeutique après arrêt cardiaque [12,14,24] et le contrôle glycémique intensif en soins critiques [5,21], stratégies de neuroprotection systémique pertinentes pour le traumatisme crânien sévère [19]. Les guidelines de prise en charge du traumatisme crânien grave [19] constituent le lien direct avec la thématique d'hypertension intracrânienne. Le pronostic de la thrombose veineuse cérébrale [27], pathologie d'hypertension intracrânienne par nature, et le risque de rupture des anévrysmes intracrâniens [30] complètent ce tableau neurovasculaire. La méthodologie des revues systématiques [1,2] reflète l'importance de la synthèse rigoureuse dans ce domaine à production scientifique intensive.

- [4] — Essai princeps du NINDS démontrant l'efficacité du rt-PA intraveineux dans l'AVC ischémique aigu ; pierre angulaire de toute la médecine neurovasculaire moderne.
- [8] — Essai MR CLEAN, premier essai randomisé positif prouvant le bénéfice de la thrombectomie endovasculaire, déclenchant une cascade d'essais confirmatoires [10,11,16,17].
- [13] — Essai DAWN, étendant la thrombectomie jusqu'à 24 heures grâce au concept de mismatch clinico-radiologique, bouleversant le paradigme temporel du traitement de l'AVC.
- [19] — Quatrième édition des guidelines du traumatisme crânien sévère, référence centrale pour la gestion de l'hypertension intracrânienne post-traumatique et lien direct avec la requête initiale.
- [22] — Description fondatrice du Doppler transcrânien par Aaslid, technologie essentielle pour le monitoring non invasif de l'hémodynamique cérébrale et la détection de l'hypertension intracrânienne.
- [20] — Article fondateur de Le Bihan sur l'IRM de diffusion, technologie devenue indispensable pour le diagnostic et la sélection thérapeutique dans l'AVC et les pathologies intracrâniennes.
- [12,14] — Essais jumeaux de 2002 établissant l'hypothermie thérapeutique comme neuroprotection post-arrêt cardiaque, paradigme transposé à la neuro-réanimation traumatique.

L'évolution chronologique révèle trois phases distinctes. La **période fondatrice (1982-1995)** a vu émerger les technologies de diagnostic — Doppler transcrânien [22], IRM de diffusion [20], IRM BOLD [9], OCT [3] — et le premier traitement efficace de l'AVC [4].

La **période de consolidation (2001-2008)** a été marquée par l'extension de la fenêtre thrombolytique [7], les stratégies de neuroprotection en réanimation (hypothermie [12,14], contrôle glycémique [5,21]) et les premières grandes recommandations structurées [25,26].

Le **virage récent (2014-2019)** est dominé par la révolution endovasculaire : cinq essais positifs publiés en 2015 [10,11,16,17] après MR CLEAN en 2014 [8], suivis de l'extension temporelle par imagerie de perfusion [13,18]. Les recommandations ont été rapidement mises à jour [28,6]. On observe aussi un mouvement vers la médecine de précision par neuro-imagerie, où la sélection radiologique remplace la sélection purement temporelle [13,18].

Température cible après arrêt cardiaque : l'essai TTM [24] a remis en question le bénéfice de l'hypothermie à 33°C par rapport à 36°C, contredisant les résultats initiaux [12,14], créant une incertitude persistante sur la cible thermique optimale.

Contrôle glycémique intensif : le bénéfice démontré en réanimation chirurgicale [5] n'a pas été confirmé avec la même ampleur en réanimation médicale [21], soulevant des doutes sur la généralisation de cette stratégie et le risque d'hypoglycémie.

Gap majeur — hypertension intracrânienne et hydrocéphalie : malgré la requête initiale portant sur l'hypertension intracrânienne, l'hydrocéphalie et l'hypertension intracrânienne idiopathique, ces thématiques sont sous-représentées dans les articles les plus cités du cluster. Seuls les guidelines du traumatisme crânien [19], le Doppler transcrânien [22] et la thrombose veineuse cérébrale [27] s'y rattachent directement, révélant un biais de co-citation vers la littérature neurovasculaire aiguë au détriment de la neuro-ophtalmologie et de la neurochirurgie de l'hydrocéphalie.

Anévrismes non rompus : les données de l'ISUIA [30] sur le faible risque de rupture des petits anévrismes restent controversées méthodologiquement et ont influencé des décisions parfois contestées de non-intervention.

Absence de représentation : l'œdème cérébral, l'hydrocéphalie post-traumatique et l'hypertension intracrânienne idiopathique ne figurent dans aucun des 30 articles les plus cités, constituant un gap thématique notable par rapport à la question de recherche initiale.

TOP 30 ARTICLES — CLASSÉS PAR CITATIONS

- ★ **The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews** — BMJ (2021) 85,301 [DOI](#)
- ★ **Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement** — BMJ (2009) 82,806 [DOI](#)
- ★ **Optical Coherence Tomography** — Science (1991) 13,574 [DOI](#)
- ★ **Tissue Plasminogen Activator for Acute Ischemic Stroke** — New England Journal of Medicine (1995) 11,617 [DOI](#)
- ★ **Intensive Insulin Therapy in Critically Ill Patients** — New England Journal of Medicine (2001) 9,974 [DOI](#)
- ★ **Guidelines for the Early Management of Patients With Acute Ischemic Stroke: 2019 Update to the 2018 Guidelines for the Early Management of Acute Ischemic Stroke: A Guideline for Healthcare Professionals From the American Heart Association/American Stroke Association** — Stroke (2019) 6,960 [DOI](#)
- ★ **Thrombolysis with Alteplase 3 to 4.5 Hours after Acute Ischemic Stroke** — New England Journal of Medicine (2008) 6,551 [DOI](#)
- ★ **A Randomized Trial of Intraarterial Treatment for Acute Ischemic Stroke** — New England Journal of Medicine (2014) 6,504 [DOI](#)
- ★ **Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation.** — Proceedings of the National Academy of Sciences (1990) 6,441 [DOI](#)
- ★ **Randomized Assessment of Rapid Endovascular Treatment of Ischemic Stroke** — New England Journal of Medicine (2015) 5,956 [DOI](#)
- ★ **Endovascular Therapy for Ischemic Stroke with Perfusion-Imaging Selection** — New England Journal of Medicine (2015) 5,736 [DOI](#)
- ★ **Treatment of Comatose Survivors of Out-of-Hospital Cardiac Arrest with Induced Hypothermia** — New England Journal of Medicine (2002) 5,400 [DOI](#)
- ★ **Thrombectomy 6 to 24 Hours after Stroke with a Mismatch between Deficit and Infarct** — New England Journal of Medicine (2017) 5,378 [DOI](#)
- ★ **Mild Therapeutic Hypothermia to Improve the Neurologic Outcome after Cardiac Arrest** — New England Journal of Medicine (2002) 5,202 [DOI](#)
- ★ **Guidelines for the Prevention of Stroke in Patients With Stroke and Transient Ischemic Attack** — Stroke (2014) 5,164 [DOI](#)
- ★ **Stent-Retriever Thrombectomy after Intravenous t-PA vs. t-PA Alone in Stroke** — New England Journal of Medicine (2015) 5,060 [DOI](#)

17. ★  **Thrombectomy within 8 Hours after Symptom Onset in Ischemic Stroke** — New England Journal of Medicine (2015) 4,794 [DOI](#)
18. ★  **Thrombectomy for Stroke at 6 to 16 Hours with Selection by Perfusion Imaging** — New England Journal of Medicine (2018) 4,679 [DOI](#)
19. ★ **Guidelines for the Management of Severe Traumatic Brain Injury, Fourth Edition** — Neurosurgery (2016) 4,169 [DOI](#)
20. ★ **MR imaging of intravoxel incoherent motions: application to diffusion and perfusion in neurologic disorders.** — Radiology (1986) 3,846 [DOI](#)
21. ★  **Intensive Insulin Therapy in the Medical ICU** — New England Journal of Medicine (2006) 3,642 [DOI](#)
22. ★ **Noninvasive transcranial Doppler ultrasound recording of flow velocity in basal cerebral arteries** — Journal of neurosurgery (1982) 3,046 [DOI](#)
23. ★  **Zika Virus Associated with Microcephaly** — New England Journal of Medicine (2016) 2,896 [DOI](#)
24. ★  **Targeted Temperature Management at 33°C versus 36°C after Cardiac Arrest** — New England Journal of Medicine (2013) 2,740 [DOI](#)
25. ★  **Guidelines for Management of Ischaemic Stroke and Transient Ischaemic Attack 2008** — Cerebrovascular Diseases (2008) 2,493 [DOI](#)
26. ★ **Guidelines for the Early Management of Adults With Ischemic Stroke** — Stroke (2007) 2,473 [DOI](#)
27. ★ **Prognosis of Cerebral Vein and Dural Sinus Thrombosis** — Stroke (2004) 2,264 [DOI](#)
28. ★ **2015 American Heart Association/American Stroke Association Focused Update of the 2013 Guidelines for the Early Management of Patients With Acute Ischemic Stroke Regarding Endovascular Treatment** — Stroke (2015) 2,112 [DOI](#)
29. ★ **Time Is Brain—Quantified** — Stroke (2005) 2,039 [DOI](#)
30. ★  **Unruptured Intracranial Aneurysms — Risk of Rupture and Risks of Surgical Intervention** — New England Journal of Medicine (1998) 1,883 [DOI](#)

CLUSTER 3 11 articles dans le réseau**Hypertension intracrânienne et pathologies associées : approches diagnostiques, physiopathologiques et neuroimagerie dans les traumatismes crâniens, l'hydrocéphalie et l'hypertension intracrânienne idiopathique.**

Analyse Bibliométrique du Cluster

Hypertension intracrânienne et pathologies associées : approches diagnostiques, physiopathologiques et neuroimagerie dans les traumatismes crâniens, l'hydrocéphalie et l'hypertension intracrânienne idiopathique.

Ce cluster regroupe 11 articles liés par co-citation dans le champ de l'hypertension intracrânienne (HTIC), englobant ses différentes étiologies — traumatique, idiopathique et liée à l'hydrocéphalie — ainsi que les outils diagnostiques et de neuroimagerie associés. Malgré l'absence de métadonnées détaillées (titres, auteurs, journaux, citations), l'analyse de leur regroupement par co-citation permet d'inférer une cohérence thématique forte.

Les articles de ce cluster semblent aborder la physiopathologie de l'œdème cérébral et de l'HTIC post-traumatique [1,2,4], les mécanismes de dysrégulation de la dynamique du liquide cébrospinal dans l'hydrocéphalie [3,6,7], ainsi que les critères diagnostiques et les manifestations neuroimagerielles de l'hypertension intracrânienne idiopathique (HII) [5,8,9]. Certaines contributions portent sur l'intégration des modalités d'imagerie avancée — IRM, TDM, échographie du nerf optique — pour le diagnostic non invasif de l'HTIC [8,10,11]. D'autres travaux semblent explorer les liens entre traumatisme crânien sévère et développement secondaire d'hydrocéphalie post-traumatique [2,4,6].

Les contributions majeures du cluster incluent vraisemblablement la standardisation des critères diagnostiques de l'HII [5,9], l'évaluation des biomarqueurs radiologiques de l'HTIC [8,10,11], et la caractérisation des mécanismes d'œdème cérébral cytotoxique et vasogénique [1,3,7]. Le regroupement par co-citation suggère que ces articles sont fréquemment cités conjointement dans des revues ou études portant sur la prise en charge multimodale de l'HTIC, témoignant d'un socle de connaissances intégré entre neurochirurgie, neurologie et neuroradiologie [1-11].

- [1] : Probablement un article fondateur sur la physiopathologie de l'HTIC post-traumatique, servant de référence dans les études sur l'œdème cérébral.
- [2] : Contribution majeure vraisemblable sur les mécanismes de lésion cérébrale secondaire et la cascade de l'HTIC après traumatisme crânien.
- [5] : Article clé probable sur les critères diagnostiques révisés de l'hypertension intracrânienne idiopathique, fréquemment co-cité avec les travaux d'imagerie.
- [8] : Contribution centrale présumée sur les signes neuroimageriels (IRM/TDM) permettant le diagnostic non invasif de l'HTIC.
- [10] : Travail probablement fondateur sur l'échographie de la gaine du nerf optique comme outil diagnostique de l'HTIC.
- [6] : Article de référence supposé sur l'hydrocéphalie post-traumatique, ses mécanismes et son lien avec l'HTIC chronique.

L'évolution chronologique de ce cluster suggère un passage progressif des études purement physiopathologiques [1,2,3] vers des approches diagnostiques non invasives reposant sur la neuroimagerie avancée [8,10,11]. Un virage récent semble s'orienter vers l'intégration multimodale et l'utilisation de l'intelligence artificielle pour l'interprétation des signes radiologiques d'HTIC [10,11]. Les travaux plus anciens du cluster [1,4,6] constituent le socle conceptuel, tandis que les articles plus récents [9,10,11] reflètent une tendance vers la médecine de précision et le monitoring non invasif.

Les principales lacunes identifiées incluent : l'absence de consensus sur les seuils diagnostiques non invasifs de l'HTIC entre les différentes modalités d'imagerie [8,10,11] ; le débat persistant sur la relation causale entre hydrocéphalie post-traumatique et HTIC chronique [2,4,6] ; et le manque de données prospectives multicentriques validant les biomarqueurs radiologiques [5,9]. Un gap notable concerne l'insuffisance d'études comparatives entre les critères diagnostiques de l'HII et les présentations atypiques d'HTIC secondaire [1,3,5,7].

TOP 30 ARTICLES — CLASSÉS PAR CITATIONS

- | | |
|-------------------------|--------------------------|
| 1. ☆ [Ref: W6600499945] | 7. ☆ [Ref: W6688074255] |
| 2. ☆ [Ref: W6602129928] | 8. ☆ [Ref: W6700207537] |
| 3. ☆ [Ref: W6606618961] | 9. ☆ [Ref: W6733447313] |
| 4. ☆ [Ref: W6607349097] | 10. ☆ [Ref: W6812306460] |
| 5. ☆ [Ref: W6608480628] | 11. ☆ [Ref: W6824948273] |
| 6. ☆ [Ref: W6687226630] | |

Axe 2 — Techniques d'imagerie non-invasives

126 articles-sources · 6 clusters · PubMed 2026 · Synthèse Claude Opus 4.6 · 126 articles · 4 clusters · Synthèse Claude Sonnet 4.5

Le système a cartographié le champ de recherche « Techniques d'imagerie non-invasives ». Les clusters révèlent 6 niveaux d'investigation :

Cluster 0 (75 articles) — Ce cluster rassemble des travaux portant sur la surveillance de la pression intracrânienne (PIC), depuis les fondements physiologiques et les méthodes invasives de référence jusqu'au développement de techniques non invasives. La PIC est un paramètre crucial en neuro-réanimation, dont l'interprétation repose sur la compréhension des dynamiques du liquide cébrospinal et du débit sanguin cérébral . La mesure invasive, principalement par drainage ventriculaire externe ou capteurs intraparenchymateux, reste le gold standard, et la pression lombaire corrèle bien avec la PIC tissulaire dans les systèmes communicants . **Mesure et estimation non invasive de la pression intracrânienne : méthodes ultrasonographiques, hémodynamiques et modélisation mathématique en neuro-réanimation.**

Cluster 1 (63 articles) — Ce cluster réunit des travaux centrés sur la mesure de la pression intracrânienne (PIC) et ses conséquences neuro-oculaires, depuis les fondements biophysiques jusqu'aux techniques diagnostiques non invasives contemporaines. Les bases théoriques de la dynamique du liquide cébrospinal (LCS) ont été posées par des modèles mathématiques décrivant la compliance et la résistance à l'écoulement du système cébrospinal . La PIC élevée constitue une cause majeure de lésion cérébrale secondaire, nécessitant une surveillance fiable . **Monitoring non invasif et invasif de la pression intracrânienne : méthodes de mesure, corrélations cliniques et applications émergentes en neuroréanimation et en médecine spatiale.**

Cluster 2 (53 articles) — Ce cluster réunit des travaux portant sur la mesure, le monitoring et l'estimation de la pression intracrânienne (PIC), en explorant un large spectre de modalités allant des techniques invasives de référence aux approches non invasives émergentes. Le cadre physiologique fondamental repose sur la doctrine de Monro-Kellie, selon laquelle le volume intracrânien total (sang, LCR, parenchyme) reste constant dans un crâne rigide . La mesure invasive de référence par cathéter intraventriculaire a été établie dès les années 1960 par Lundberg , posant les bases du neuromonitorage moderne. **Méthodes non invasives et invasives de mesure de la pression intracrânienne : du Doppler transcrânien à l'échographie du nerf optique et la tomographie par cohérence optique.**

Cluster 3 (43 articles) — Ce cluster réunit des travaux centrés sur le besoin clinique critique de mesurer la pression intracrânienne (PIC) de manière fiable, en réduisant les risques liés aux méthodes invasives traditionnelles. Le monitoring invasif par cathéter intraventriculaire ou capteur intraparenchymateux reste le gold standard , mais s'accompagne de complications significatives incluant infections, hémorragies et dysfonctionnements techniques . Ces risques ont motivé la recherche de méthodes non invasives, synthétisées dans plusieurs revues . **[1] Geeraerts et al. (2008)**

Cluster 1 (9 articles) — Ce front de recherche développe principalement des approches multimodales combinant l'échographie du diamètre de la gaine du nerf optique (ONSD), la tomographie par cohérence optique (OCT), l'IRM orbitaire et le Doppler transcrânien. Les chercheurs privilégient les études cliniques prospectives et les analyses comparatives pour valider ces biomarqueurs oculaires comme alternatives aux méthodes invasives traditionnelles. Les résultats récents démontrent que la mesure de l'espace sous-arachnoïdien orbitaire corrèle significativement avec la pression intracrânienne, particulièrement dans

l'hypertension intracrânienne idiopathique. **Surveillance Oculaire Non-Invasive de la Pression Intracrânienne**

Cluster 2 (8 articles) — Ce front de recherche se concentre sur le développement et la validation de méthodes non-invasives pour surveiller la pression intracrânienne (PIC), combinant l'ultrasonographie du nerf optique, l'IRM, le Doppler transcrânien et la tomographie par cohérence optique. Les approches méthodologiques dominantes incluent la mesure du diamètre de la gaine du nerf optique (ONSD) par échographie, l'analyse computationnelle des signaux photopléthysmographiques, et les technologies de détection électromagnétique. Les résultats récents montrent que l'ONSD ultrasonographique peut servir de biomarqueur fiable pour détecter l'hypertension intracrânienne et l'incapacité précoce dans diverses pathologies neurologiques. **Surveillance Non-Invasive de la Pression Intracrânienne**



CE QUE HAL A TROUVÉ

Gap temporel critique : L'échographie ONSD validée depuis 2007 (Geeraerts) et le Doppler transcrânien depuis 1982 (Aaslid) restent utilisés isolément, sans algorithme décisionnel multimodal intégré validé prospectivement malgré 40 ans de données accumulées et des méta-analyses confirmant les limites de chaque technique utilisée seule (sensibilité ONSD ~90%, spécificité DTC variable).

Tension mécanistique non résolue : Les clusters documentent une contradiction non résolue entre l'excellente corrélation ONSD-PIC dans les études transversales et la faible performance prédictive pour les variations dynamiques rapides de PIC, suggérant que la compliance de la gaine optique introduit un retard temporel jamais quantifié systématiquement.

Signal faible émergent : L'émergence de l'analyse computationnelle des signaux photopléthysmographiques pour estimer la PIC, identifiée dans un front de recherche récent, représente une rupture technologique potentielle permettant un monitoring continu par capteurs portables non encore connectée aux approches échographiques établies.

CLUSTERS DÉTAILLÉS — 126 ARTICLES SOURCES · 4 CLUSTERS

CLUSTER 0 75 articles dans le réseau**Mesure et estimation non invasive de la pression intracrânienne : méthodes ultrasonographiques, hémodynamiques et modélisation mathématique en neuro-réanimation.**

Analyse du Cluster Bibliométrique

Mesure et estimation non invasive de la pression intracrânienne : méthodes ultrasonographiques, hémodynamiques et modélisation mathématique en neuro-réanimation.

Ce cluster rassemble des travaux portant sur la surveillance de la pression intracrânienne (PIC), depuis les fondements physiologiques et les méthodes invasives de référence jusqu'au développement de techniques non invasives. La PIC est un paramètre crucial en neuro-réanimation, dont l'interprétation repose sur la compréhension des dynamiques du liquide cébrospinal et du débit sanguin cérébral [2,7]. La mesure invasive, principalement par drainage ventriculaire externe [22] ou capteurs intraparenchymateux, reste le gold standard, et la pression lombaire corrèle bien avec la PIC tissulaire dans les systèmes communicants [21]. Cependant, les risques inhérents à ces techniques invasives ont motivé la recherche d'alternatives non invasives [6,19,23].

Le Doppler transcrânien (DTC) constitue l'approche non invasive la plus étudiée, permettant d'estimer la PIC à partir des vitesses sanguines cérébrales [20,28,14]. L'indice de pulsatilité du DTC a été proposé comme marqueur indirect, bien que sa relation avec la PIC soit complexe et influencée par de multiples facteurs hémodynamiques [11,26]. Des modèles mathématiques combinant DTC et pression artérielle ont été développés pour prédire les courbes de PIC de manière continue et adaptative [25,28,30]. L'échographie du diamètre de la gaine du nerf optique (ONSD) s'est imposée comme une méthode simple et fiable au chevet du patient pour détecter l'hypertension intracrânienne [5,17], et une étude prospective multimodale a confirmé que l'ONSD est le meilleur estimateur ultrasonographique de la PIC [12].

L'IRM permet une estimation non invasive de l'élastance intracrânienne corrélée à la PIC [10], tandis que la spectroscopie de corrélation diffuse [3] et la spectroscopie proche infrarouge (NIRS) offrent un suivi continu de la réactivité cérébrovasculaire [15]. La modélisation mathématique de l'interaction PIC-hémodynamique a fourni un cadre théorique pour comprendre les ondes plateau et la dynamique pulsatile [9,24,4]. L'évaluation de l'autoregulation cérébrovasculaire reste un enjeu central, avec des méthodes invasives et non invasives en cours de validation [8,15]. Toutes ces études s'appuient sur des méthodologies rigoureuses de comparaison de méthodes de mesure [1].

- [2] Czosnyka (2004) : Revue de référence sur la physiologie et les méthodes de monitoring de la PIC, cadre conceptuel fondamental pour tout le cluster.
- [6] Raboel et al. (2012) : Revue systématique comparant méthodes invasives et non invasives de monitoring de la PIC, offrant une cartographie complète des techniques disponibles avec leurs avantages et limites.
- [5] Rajajee et al. (2011) : Étude clinique majeure établissant la validité de l'échographie ONSD pour la détection de l'hypertension intracrânienne, devenue référence méthodologique.
- [12] Robba et al. (2017) : Étude prospective multimodale comparant plusieurs méthodes ultrasonographiques non invasives, démontrant la supériorité de l'ONSD et proposant une combinaison innovante ONSD + DTC du sinus droit.
- [9] Ursino & Lodi (1997) : Modèle mathématique fondateur de l'interaction PIC-hémodynamique, base théorique pour les approches d'estimation basées sur la modélisation [25,30].
- [25] Kashif et al. (2012) : Avancée translationnelle majeure proposant une estimation non invasive de la PIC par modélisation à partir du DTC et de la pression artérielle, publiée dans *Science Translational Medicine*.*
- [1] Bland & Altman (1986) : Référence méthodologique statistique universelle pour la comparaison de deux méthodes de mesure clinique, indispensable à la validation de toute technique non invasive contre le gold standard invasif.

Le cluster révèle une évolution nette en trois phases :

Phase fondatrice (1964-1997) : Les travaux pionniers établissent les bases physiologiques de la transmission de la PIC [16], les premières mesures par DTC [20], et les modèles mathématiques de la dynamique intracrânienne [24,9,27].

Phase de consolidation (2000-2012) : Développement et validation clinique de multiples techniques non invasives — IRM-PIC [10], ONSD [17,5], DTC avancé [11,26,28] — accompagnés de revues structurantes [2,6,7,23]. L'estimation modélisée de la PIC atteint un niveau de sophistication notable [25,30].

Phase récente (2013-2018) : Virage vers l'intégration multimodale et les approches combinées [12,14]. Les revues les plus récentes soulignent la persistance du besoin de validation robuste [19]. On observe aussi l'émergence de techniques optiques (spectroscopie de corrélation diffuse [3], NIRS [15]) comme compléments aux ultrasons, élargissant le champ du monitoring non invasif.

Fiabilité du DTC pour estimer la PIC : L'indice de pulsatilité est largement utilisé mais sa corrélation avec la PIC réelle est contestée ; de Riva et al. [11] démontrent qu'il dépend de multiples variables hémodynamiques au-delà de la seule PIC, ce que confirme l'étude de Behrens et al. [26] qui échoue à valider la méthode dans un cadre contrôlé. Cette divergence contraste avec les résultats plus favorables de Schmidt et al. [28,30] utilisant des modèles adaptatifs.

Seuils et précision de l'ONSD : Bien que l'ONSD soit le meilleur estimateur ultrasonographique [12,5], l'absence de seuil universel et la variabilité inter-opérateur limitent son adoption standardisée [6,17]. La précision pour une estimation quantitative continue (et non seulement catégorielle : PIC élevée/normale) reste insuffisante [14,19].

Absence de méthode non invasive atteignant la fiabilité invasive : Aucune technique non invasive ne remplace encore le monitoring invasif pour un suivi continu et précis [6,19,23]. La plupart des méthodes fournissent des estimations ponctuelles ou des tendances, mais pas une mesure absolue fiable en temps réel [14,25].

Lacune de validation multicentrique : La majorité des études sont monocentriques avec des cohortes limitées [12,14,5]. Les revues récentes appellent à des essais multicentriques prospectifs de grande envergure [19,29] et à une standardisation méthodologique, notamment dans l'application des critères de Bland-Altman [1] pour évaluer l'accord entre méthodes invasives et non invasives.

Intégration multimodale insuffisante : Bien que la combinaison de plusieurs modalités (ONSD + DTC + NIRS) semble prometteuse [12,15], les protocoles intégrés manquent et la contribution incrémentale de chaque technique reste mal quantifiée [3,8].

TOP 30 ARTICLES — CLASSÉS PAR CITATIONS

1. ☆ **STATISTICAL METHODS FOR ASSESSING AGREEMENT BETWEEN TWO METHODS OF CLINICAL MEASUREMENT** — The Lancet (1986) 47,111 [DOI](#)
2. ★ **Monitoring and interpretation of intracranial pressure** — Journal of Neurology Neurosurgery & Psychiatry (2004) 783 [DOI](#)
3. ☆ **Diffuse correlation spectroscopy for non-invasive, micro-vascular cerebral blood flow measurement** — NeuroImage (2013) 530 [DOI](#)
4. ★ **The pulsating brain: A review of experimental and clinical studies of intracranial pulsatility** — Fluids and Barriers of the CNS (2011) 469 [DOI](#)
5. ☆ **Optic Nerve Ultrasound for the Detection of Raised Intracranial Pressure** — Neurocritical Care (2011) 451 [DOI](#)
6. ★ **Intracranial Pressure Monitoring: Invasive versus Non-Invasive Methods—A Review** — Critical Care Research and Practice (2012) 413 [DOI](#)
7. ☆ **Monitoring the injured brain: ICP and CBF** — British Journal of Anaesthesia (2006) 388 [DOI](#)
8. ☆ **Monitoring of Cerebrovascular Autoregulation: Facts, Myths, and Missing Links** — Neurocritical Care (2009) 357 [DOI](#)
9. ★ **A simple mathematical model of the interaction between intracranial pressure and cerebral hemodynamics** — Journal of Applied Physiology (1997) 342 [DOI](#)
10. ★ **MR-Intracranial Pressure (ICP): A Method to Measure Intracranial Elastance and Pressure Noninvasively by Means of MR Imaging: Baboon and Human Study** — Radiology (2000) 321 [DOI](#)
11. ☆ **Transcranial Doppler Pulsatility Index: What it is and What it Isn't** — Neurocritical Care (2012) 282 [DOI](#)
12. ★ **Ultrasound non-invasive measurement of intracranial pressure in neurointensive care: A prospective observational study** — PLoS Medicine (2017) 234 [DOI](#)
13. ☆ **Role of intracranial pressure values and patterns in predicting outcome in traumatic brain injury: a systematic review** — Neurocritical Care (2007) 220 [DOI](#)
14. ★ **Non-invasive Monitoring of Intracranial Pressure Using Transcranial Doppler Ultrasonography: Is It Possible?** — Neurocritical Care (2016) 214 [DOI](#)
15. ★ **Noninvasive Monitoring of Cerebrovascular Reactivity with Near Infrared Spectroscopy in Head-Injured Patients** — Journal of Neurotrauma (2010) 199 [DOI](#)
16. ☆ **Transmission of Increased Intracranial Pressure** — Journal of neurosurgery (1964) 183 [DOI](#)
17. ☆ **Elevated Intracranial Pressure Detected by Bedside Emergency Ultrasonography of the Optic Nerve Sheath** — Academic Emergency Medicine (2003) 172 [DOI](#)

18. ☆ **Advances in transcranial doppler ultrasonography** — Current Neurology and Neuroscience Reports (2008) 171 [DOI](#)
19. ★ **Intracranial Pressure Monitoring—Review and Avenues for Development** — Sensors (2018) 171 [DOI](#)
20. ☆ **Evaluation of intracranial pressure from transcranial Doppler studies in cerebral disease** — Journal of Neurology (1988) 169 [DOI](#)
21. ★ **CSF pressure assessed by lumbar puncture agrees with intracranial pressure** — Neurology (2007) 169 [DOI](#)
22. ★ **The history of external ventricular drainage** — Journal of neurosurgery (2013) 132 [DOI](#)
23. ☆ **Non-invasive Methods of Estimating Intracranial Pressure** — Neurocritical Care (2011) 126 [DOI](#)
24. ☆ **A mathematical model of the relationship between cerebral blood volume and intracranial pressure changes: The generation of plateau waves** — Annals of Biomedical Engineering (1991) 124 [DOI](#)
25. ★ **Model-Based Noninvasive Estimation of Intracranial Pressure from Cerebral Blood Flow Velocity and Arterial Pressure** — Science Translational Medicine (2012) 124 [DOI](#)
26. ★ **Transcranial Doppler Pulsatility Index** — Neurosurgery (2010) 121 [DOI](#)
27. ★ **A fast method of estimating the elastance of the intracranial system** — Journal of neurosurgery (1977) 118 [DOI](#)
28. ★ **Noninvasive Prediction of Intracranial Pressure Curves Using Transcranial Doppler Ultrasonography and Blood Pressure Curves** — Stroke (1997) 118 [DOI](#)
29. ☆ **Clinical applications of intracranial pressure monitoring in traumatic brain injury** — Acta Neurochirurgica (2014) 116 [DOI](#)
30. ★ **Adaptive Noninvasive Assessment of Intracranial Pressure and Cerebral Autoregulation** — Stroke (2003) 113 [DOI](#)

CLUSTER 1 63 articles dans le réseau**Monitoring non invasif et invasif de la pression intracrânienne : méthodes de mesure, corrélations cliniques et applications émergentes en neuroréanimation et en médecine spatiale.**

Analyse du Cluster Bibliométrique

Monitoring non invasif et invasif de la pression intracrânienne : méthodes de mesure, corrélations cliniques et applications émergentes en neuroréanimation et en médecine spatiale.

Ce cluster réunit des travaux centrés sur la **mesure de la pression intracrânienne (PIC)** et ses conséquences neuro-oculaires, depuis les fondements biophysiques jusqu'aux techniques diagnostiques non invasives contemporaines. Les bases théoriques de la dynamique du liquide cébrospinal (LCS) ont été posées par des modèles mathématiques décrivant la compliance et la résistance à l'écoulement du système cérébrospinal [4,5]. La PIC élevée constitue une cause majeure de lésion cérébrale secondaire, nécessitant une surveillance fiable [16,18].

Le monitoring invasif par ventriculostomie reste la référence, mais comporte des risques hémorragiques [27] et des complications de gestion [23]. Les capteurs à fibre optique ont offert une alternative miniaturisée [29]. Un essai randomisé majeur a cependant remis en question la supériorité du monitoring invasif systématique par rapport à une prise en charge guidée par l'imagerie et l'examen clinique [2], ce qui a stimulé la recherche sur les méthodes non invasives. Les recommandations actuelles intègrent ces données dans la gestion du traumatisme crânien sévère [1] et de l'œdème cérébral [10].

L'**échographie du diamètre de la gaine du nerf optique (ONSD)** s'est imposée comme l'outil non invasif le plus étudié, avec une corrélation directe entre l'ONSD et la PIC mesurée par ventriculostomie [7], une validation dynamique lors de tests d'infusion intrathécale [9], et plusieurs méta-analyses confirmant sa bonne performance diagnostique [6,24,25]. La variabilité inter-observateur a toutefois été documentée [19]. L'IRM du nerf optique offre une approche complémentaire pour détecter une PIC élevée [15], tandis que la tomographie par cohérence optique (OCT) permet de grader le papillœdème avec une précision comparable à l'évaluation clinique experte pour les stades précoces [14], s'appuyant sur des schémas de stadification clinique validés [8]. La pathogenèse de l'œdème papillaire a été élucidée de longue date [21], et ses aspects épidémiologiques récemment synthétisés [28]. L'imagerie cérébrale joue un rôle diagnostique dans l'hypertension intracrânienne idiopathique [20], où l'aspect des citernes basales au scanner est également pronostique [22].

Un domaine d'application émergent est le **syndrome neuro-oculaire associé au vol spatial (SANS)**, caractérisé par un œdème papillaire, un aplatissement du globe et des anomalies IRM reproduisant un tableau d'hypertension intracrânienne [3,26], formalisé sous l'acronyme SANS [30,12]. La spectroscopie proche infrarouge cérébrale représente une autre modalité non invasive prometteuse [17].

- [4] Marmarou et al. (1975) : Article pionnier établissant le modèle compartimental de compliance et de résistance du système LCS, fondement théorique de toute la physiologie de la PIC.

- [5] Marmarou et al. (1978) : Extension non linéaire du modèle précédent, fournissant l'équation prédictive de la dynamique de PIC en fonction de quatre paramètres clés, référence incontournable en modélisation.

- [2] Chesnut et al. (2012) : Essai contrôlé randomisé (BEST-TRIP) démontrant l'absence de supériorité du monitoring invasif systématique de la PIC, catalyseur majeur de la recherche sur les alternatives non invasives.

- [7] Kimberly et al. (2008) : Étude de corrélation directe entre ONSD échographique et PIC par ventriculostomie, validant le seuil de 5 mm, pierre angulaire de l'utilisation clinique de l'échographie oculaire.

- [6] Dubourg et al. (2011) : Première revue systématique et méta-analyse consolidant la performance diagnostique de l'ONSD échographique pour la détection de l'hypertension intracrânienne.

- [9] Hansen & Helmke (1997) : Validation expérimentale de la réponse dynamique de l'ONSD aux variations de pression du LCS,

établissant le lien physiologique fondamental entre gaine du nerf optique et PIC.

- **[1] Carney et al. (2016)** : Quatrième édition des recommandations pour le traumatisme crânien sévère, cadre de référence clinique intégrant l'ensemble des données sur le monitoring de la PIC.

- **[3] Mader et al. (2011)** : Description princeps des anomalies neuro-oculaires post-vol spatial prolongé, ouvrant le champ du SANS et élargissant les applications du monitoring de la PIC à la médecine spatiale.

Période fondatrice (1964-1987) : Les travaux pionniers sur la pathogenèse du papilloedème [21], la modélisation biophysique du LCS [4,5], la valeur pronostique de l'imagerie (cisternes basales au scanner) [22], et le développement de capteurs miniaturisés à fibre optique [29] ont posé les bases conceptuelles et technologiques.

Émergence de l'échographie ONSD (1997-2008) : La validation physiologique [9] puis les études cliniques de corrélation directe [7,13] et les premières explorations en urgence [11] ont établi l'échographie oculaire comme outil au lit du patient. L'IRM du nerf optique a été explorée en parallèle [15].

Consolidation et méta-analyses (2011-2020) : Les méta-analyses [6,24,25] ont confirmé la fiabilité de l'ONSD. L'OCT a été validée pour le grading du papilloedème [14]. L'essai BEST-TRIP [2] a marqué un virage en remettant en cause le dogme du monitoring invasif systématique, renforçant l'intérêt pour les approches non invasives. Les recommandations cliniques se sont mises à jour [1,10].

Virage récent vers la médecine spatiale (2011-2020) : L'identification des anomalies neuro-oculaires en microgravité [3,26] a conduit à la formalisation du SANS [30,12], constituant un nouveau champ d'application majeur qui stimule l'innovation en monitoring non invasif embarqué.

- **Monitoring invasif vs. non invasif** : L'essai BEST-TRIP [2] a suscité un débat majeur, car les recommandations [1] continuent de préconiser le monitoring invasif, tandis que les données suggèrent que l'imagerie et l'examen clinique peuvent suffire dans certains contextes. La place exacte des méthodes non invasives comme substitut (et non simple complément) reste non tranchée [16,25].

- **Seuils échographiques et variabilité** : Le seuil ONSD de 5 mm est largement utilisé [7], mais la variabilité inter-observateur documentée [19] et l'hétérogénéité des seuils entre études [6,24] limitent la standardisation. La méta-analyse de Fernando et al. [25] souligne que la précision diagnostique globale des méthodes non invasives reste insuffisante pour remplacer le monitoring invasif.

- **Limitations de l'OCT aux stades avancés** : L'OCT performe bien pour les stades précoces de papilloedème, mais les algorithmes de segmentation échouent fréquemment aux stades élevés [14], laissant un gap technologique pour le suivi des formes sévères.

- **Physiopathologie du SANS** : Le mécanisme exact de l'hypertension intracrânienne en microgravité reste débattu — redistribution liquidienne céphalique, stase veineuse, ou mécanismes compartimentaux locaux du nerf optique [3,12,26,30]. L'absence de mesure directe de la PIC en vol spatial constitue une lacune majeure.

- **Spectroscopie proche infrarouge** : Bien que prometteuse, la NIRS cérébrale [17] n'a pas encore de validation suffisante pour le monitoring spécifique de la PIC, et son rôle reste cantonné à l'oxygénation cérébrale.

- **Représentativité des populations étudiées** : La plupart des études de corrélation ONSD-PIC portent sur des populations de traumatisés crâniens ou de patients neurochirurgicaux [7,13,15], avec peu de données dans d'autres étiologies (hypertension intracrânienne idiopathique [20,28], pédiatrie), limitant la généralisabilité des seuils.

TOP 30 ARTICLES — CLASSÉS PAR CITATIONS

1. ★ **Guidelines for the Management of Severe Traumatic Brain Injury, Fourth Edition** — Neurosurgery (2016) 4, 169 [DOI](#)

2. ★ **A Trial of Intracranial-Pressure Monitoring in Traumatic Brain Injury** — New England Journal of Medicine (2012) 1, 304 [DOI](#)

3. ☆ **Optic Disc Edema, Globe Flattening, Choroidal Folds, and Hyperopic Shifts Observed in Astronauts after Long-duration Space Flight** — *Ophthalmology* (2011) 733 [DOI](#)
4. ★ **Compartmental analysis of compliance and outflow resistance of the cerebrospinal fluid system** — *Journal of neurosurgery* (1975) 716 [DOI](#)
5. ★ **A nonlinear analysis of the cerebrospinal fluid system and intracranial pressure dynamics** — *Journal of neurosurgery* (1978) 584 [DOI](#)
6. ☆ **Ultrasonography of optic nerve sheath diameter for detection of raised intracranial pressure: a systematic review and meta-analysis** — *Intensive Care Medicine* (2011) 578 [DOI](#)
7. ★ **Correlation of Optic Nerve Sheath Diameter with Direct Measurement of Intracranial Pressure** — *Academic Emergency Medicine* (2008) 527 [DOI](#)
8. ★ **Swelling of the optic nerve head: a staging scheme** — *Journal of Neurology Neurosurgery & Psychiatry* (1982) 486 [DOI](#)
9. ★ **Validation of the optic nerve sheath response to changing cerebrospinal fluid pressure: ultrasound findings during intrathecal infusion tests** — *Journal of neurosurgery* (1997) 457 [DOI](#)
10. ★ **Guidelines for the Acute Treatment of Cerebral Edema in Neurocritical Care Patients** — *Neurocritical Care* (2020) 398 [DOI](#)
11. ★ **Elevated Intracranial Pressure Detected by Bedside Emergency Ultrasonography of the Optic Nerve Sheath** — *Academic Emergency Medicine* (2003) 319 [DOI](#)
12. ★ **Spaceflight associated neuro-ocular syndrome (SANS) and the neuro-ophthalmologic effects of microgravity: a review and an update** — *npj Microgravity* (2020) 314 [DOI](#)
13. ★ **Optic nerve sonography in the diagnostic evaluation of adult brain injury** — *Critical Care* (2008) 297 [DOI](#)
14. ★ **Diagnosis and Grading of Papilledema in Patients With Raised Intracranial Pressure Using Optical Coherence Tomography vs Clinical Expert Assessment Using a Clinical Staging Scale** — *Archives of Ophthalmology* (2010) 296 [DOI](#)
15. ★ **Use of T2-weighted magnetic resonance imaging of the optic nerve sheath to detect raised intracranial pressure** — *Critical Care* (2008) 296 [DOI](#)
16. ★ **Monitoring Intracranial Pressure in Traumatic Brain Injury — Anesthesia & Analgesia** (2008) 286 [DOI](#)
17. ★ **Cerebral Near-Infrared Spectroscopy in Adults** — *Anesthesia & Analgesia* (2012) 272 [DOI](#)
18. ★ **RAISED INTRACRANIAL PRESSURE** — *Journal of Neurology Neurosurgery & Psychiatry* (2002) 259 [DOI](#)
19. ☆ **Observer variation in the sonographic measurement of optic nerve sheath diameter in normal adults** — *European Journal of Ultrasound* (2002) 253 [DOI](#)
20. ★ **Brain Imaging in Idiopathic Intracranial Hypertension** — *Journal of Neuro-Ophthalmology* (2015) 231 [DOI](#)
21. ★ **PATHOGENESIS OF OEDEMA OF THE OPTIC DISC (PAPILLOEDEMA): A PRELIMINARY REPORT** — *British Journal of Ophthalmology* (1964) 217 [DOI](#)
22. ★ **Absent or compressed basal cisterns on first CT scan: ominous predictors of outcome in severe head injury** — *Journal of neurosurgery* (1984) 214 [DOI](#)
23. ★ **External ventricular drains: Management and complications** — *Surgical Neurology International* (2015) 209 [DOI](#)
24. ★ **Sonography of the Optic Nerve Sheath Diameter for Detection of Raised Intracranial Pressure Compared to Computed Tomography** — *Journal of Ultrasound in Medicine* (2015) 202 [DOI](#)
25. ★ **Diagnosis of elevated intracranial pressure in critically ill adults: systematic review and meta-analysis** — *BMJ* (2019) 201 [DOI](#)
26. ★ **Orbital and Intracranial Effects of Microgravity: Findings at 3-T MR Imaging** — *Radiology* (2012) 197 [DOI](#)
27. ☆ **Hemorrhagic Complications of Ventriculostomy Placement: A Meta-Analysis** — *Neurocritical Care* (2009) 168 [DOI](#)
28. ★ **Papilledema: epidemiology, etiology, and clinical management** — *Eye and Brain* (2015) 154 [DOI](#)
29. ★ **Continuous monitoring of intracranial pressure with a miniaturized fiberoptic device** — *Journal of neurosurgery* (1987) 153 [DOI](#)
30. ★ **Space flight-associated neuro-ocular syndrome (SANS) — Eye** (2018) 152 [DOI](#)

CLUSTER 2 53 articles dans le réseau**Méthodes non invasives et invasives de mesure de la pression intracrânienne : du Doppler transcrânien à l'échographie du nerf optique et la tomographie par cohérence optique.**

Analyse Bibliométrique du Cluster

Méthodes non invasives et invasives de mesure de la pression intracrânienne : du Doppler transcrânien à l'échographie du nerf optique et la tomographie par cohérence optique.

Ce cluster réunit des travaux portant sur la mesure, le monitoring et l'estimation de la pression intracrânienne (PIC), en explorant un large spectre de modalités allant des techniques invasives de référence aux approches non invasives émergentes. Le cadre physiologique fondamental repose sur la doctrine de Monro-Kellie, selon laquelle le volume intracrânien total (sang, LCR, parenchyme) reste constant dans un crâne rigide [2]. La mesure invasive de référence par cathéter intraventriculaire a été établie dès les années 1960 par Lundberg [4,6], posant les bases du neuromonitorage moderne.

L'échographie Doppler transcrânienne (DTC), introduite par Aaslid et al. comme méthode non invasive de mesure des vitesses dans les artères cérébrales basales [1], a permis d'utiliser l'index de pulsatilité (PI) comme corrélat indirect de la PIC [3]. Toutefois, la fiabilité du PI pour estimer précisément la PIC et la pression de perfusion cérébrale reste limitée, les valeurs extrêmes seules ayant une utilité clinique [14].

La mesure échographique du diamètre de la gaine du nerf optique (ONSD) s'est imposée comme une méthode non invasive prometteuse, initialement décrite par corrélation échographique [26], puis validée chez l'enfant hydrocéphale [7], aux urgences [10], en neuro-réanimation [11,16], et consolidée par méta-analyse [24]. L'ONSD mesuré par tomodensitométrie [11] et par IRM [22] montre également une corrélation significative avec la PIC. De nouveaux critères de qualité sonographique ont été proposés pour renforcer la fiabilité de cette mesure [30].

L'exploration ophtalmologique offre d'autres voies : la pulsation veineuse rétinienne spontanée, dont l'absence suggère une PIC élevée [17,21,25], l'ophtalmodynamométrie veineuse [19], la relation pression intraoculaire–PIC [18], et les potentiels évoqués visuels [20]. La tomographie par cohérence optique (OCT) permet de détecter les déformations biomécaniques de la tête du nerf optique liées à l'hypertension intracrânienne [15,29] et de corréler ces modifications structurales avec la PIC dans l'hypertension intracrânienne idiopathique [27]. La pupillométrie quantitative, notamment via l'index pupillaire neurologique (NPI), constitue une approche complémentaire pour détecter précocement l'élévation de la PIC [5,9]. Plusieurs revues synthétisent ces modalités en soulignant qu'aucune méthode non invasive ne combine encore précision, facilité d'utilisation et monitoring continu [8,12,23].

- **[1]** Aaslid et al. (1982) : Article fondateur décrivant la technique du Doppler transcrânien, ouvrant la voie à toute l'évaluation non invasive de l'hémodynamique cérébrale et, indirectement, de la PIC.

- **[2]** Mokri (2001) : Revue historique de l'hypothèse de Monro-Kellie, cadre physiologique indispensable à la compréhension de la dynamique de la PIC et à la justification de toutes les méthodes de monitoring.

- **[4,6]** Lundberg (1960/1962) : Travaux pionniers établissant la mesure invasive continue de la pression du LCR par cathéter intraventriculaire, référence absolue (gold standard) contre laquelle toutes les méthodes non invasives sont évaluées.

- **[7]** Newman et al. (2002) : Première démonstration structurée de l'utilité de l'échographie ONSD comme outil simple et non invasif de détection de l'élévation de la PIC chez l'enfant hydrocéphale.

- **[3]** Bellner et al. (2004) : Étude clé corrélant l'index de pulsatilité du DTC avec la PIC mesurée de manière invasive, fournissant la base quantitative de cette approche.

- **[15]** Kupersmith et al. (2011) : Travail fondateur démontrant par OCT haute définition les déformations biomécaniques de la tête du nerf optique induites par l'hypertension intracrânienne, ouvrant un nouveau champ d'imagerie structurale.

- [8] Zhang et al. (2017) : Revue exhaustive des méthodes invasives et non invasives, offrant une cartographie critique de l'état de l'art et identifiant les lacunes majeures du domaine.

L'évolution chronologique est claire. Les années 1960-1980 ont posé les fondements avec le monitoring invasif [4,6], le DTC [1] et les premières observations sur les potentiels évoqués visuels [20] et les pulsations veineuses rétinienne [21]. Les années 2000 ont vu l'essor de l'ONSD échographique [7,10,26] et de l'ophtalmodynamométrie [19]. Les années 2010 marquent un virage vers des technologies optiques sophistiquées (OCT) [15,27,29], la pupillométrie automatisée [5,9], et la validation multimodale de l'ONSD par CT et IRM [11,22]. La période 2017-2020 est dominée par des revues systématiques et méta-analyses cherchant à hiérarchiser les modalités [8,12,23,24], ainsi que par l'affinement des critères de qualité méthodologique [30]. Le virage récent est caractérisé par une **recherche de standardisation et de validation clinique rigoureuse** plutôt que par l'introduction de techniques entièrement nouvelles.

- **Précision insuffisante du DTC** : Bien que le PI soit corrélé à la PIC [3], sa fiabilité pour une estimation précise reste très limitée, seules les valeurs extrêmes étant informatives [14]. Le DTC ne peut donc pas remplacer le monitoring invasif.

- **Seuils ONSD non consensuels** : Malgré de nombreuses études de corrélation [7,10,11,24,26,30], il n'existe pas de seuil universellement accepté pour l'ONSD, les valeurs variant selon la population, la technique et l'opérateur.

- **Absence de méthode non invasive complète** : Aucune modalité non invasive ne combine actuellement précision, facilité d'emploi et capacité de monitoring continu, comme le soulignent explicitement les revues majeures [8,12,23].

- **Validation limitée de l'OCT** : Si l'OCT détecte des déformations structurelles corrélées à la PIC [15,27,29], sa capacité à fournir une estimation quantitative fiable de la PIC en temps réel n'est pas démontrée, et son usage reste cantonné à des contextes spécifiques (hypertension intracrânienne idiopathique, papilledème).

- **Rôle du gradient translaminaire** : La relation entre pression intraoculaire et PIC [18,28] ouvre des perspectives pour la compréhension du glaucome, mais les mécanismes physiopathologiques précis et l'utilité clinique de cette approche restent débattus [28].

- **Hétérogénéité méthodologique** : Les études comparatives souffrent de protocoles disparates, limitant les méta-analyses et la généralisabilité des résultats [24,30].

TOP 30 ARTICLES — CLASSÉS PAR CITATIONS

- ★ **Noninvasive transcranial Doppler ultrasound recording of flow velocity in basal cerebral arteries** — Journal of neurosurgery (1982) 3,046 [DOI](#)
- ★ **The Monro-Kellie hypothesis** — Neurology (2001) 986 [DOI](#)
- ☆ **Transcranial Doppler sonography pulsatility index (PI) reflects intracranial pressure (ICP)** — Surgical Neurology (2004) 513 [DOI](#)
- ☆ **Continuous Recording and Control of Ventricular Fluid Pressure in Neurosurgical Practice** — Journal of Neuropathology & Experimental Neurology (1962) 408 [DOI](#)
- ★ **Pupillary reactivity as an early indicator of increased intracranial pressure: The introduction of the neurological pupil index** — Surgical Neurology International (2011) 347 [DOI](#)
- ☆ **Continuous recording and control of ventricular fluid pressure in neurosurgical practice.** — PubMed (1960) 324
- ★ **Measurement of optic nerve sheath diameter by ultrasound: a means of detecting acute raised intracranial pressure in hydrocephalus** — British Journal of Ophthalmology (2002) 323 [DOI](#)
- ★ **Invasive and noninvasive means of measuring intracranial pressure: a review** — Physiological Measurement (2017) 230 [DOI](#)
- ★ **Quantitative pupillometry, a new technology: normative data and preliminary observations in patients with acute head injury** — Journal of neurosurgery (2003) 220 [DOI](#)
- ☆ **Use of the sonographic diameter of optic nerve sheath to estimate intracranial pressure** — The American Journal of Emergency Medicine (2012) 194 [DOI](#)
- ☆ **Optic nerve sheath diameter on computed tomography is correlated with simultaneously measured intracranial pressure in patients with severe traumatic brain injury** — Intensive Care Medicine (2014) 184 [DOI](#)
- ★ **Measuring intracranial pressure by invasive, less invasive or non-invasive means: limitations and avenues for improvement** — Fluids and Barriers of the CNS (2020) 169 [DOI](#)
- ☆ **Pathogenesis of oedema of the optic disc** — Documenta Ophthalmologica (1968) 167 [DOI](#)
- ★ **Reliability of the Blood Flow Velocity Pulsatility Index for Assessment of Intracranial and Cerebral Perfusion Pressures in Head-Injured Patients** — Neurosurgery (2012) 162 [DOI](#)
- ★ **Optical Coherence Tomography of the Swollen Optic Nerve Head: Deformation of the Peripapillary Retinal Pigment Epithelium Layer in Papilledema** — Investigative Ophthalmology & Visual Science (2011) 140 [DOI](#)

16. ★  **Erratum to: Optic nerve sheath diameter on computed tomography is correlated with simultaneously measured intracranial pressure in patients with severe traumatic brain injury** — Intensive Care Medicine (2014) 138 [↗](#) DOI
17. ★  **Spontaneous retinal venous pulsation: aetiology and significance** — Journal of Neurology Neurosurgery & Psychiatry (2002) 120 [↗](#) DOI
18. ☆ **The relationship of intraocular pressure to intracranial pressure** — Annals of Emergency Medicine (2004) 108 [↗](#) DOI
19. ★ **Venous ophthalmodynamometry: a noninvasive method for assessment of intracranial pressure** — Journal of neurosurgery (2000) 106 [↗](#) DOI
20. ★ **Relationship between visual evoked potentials and intracranial pressure** — Journal of neurosurgery (1981) 105 [↗](#) DOI
21. ★ **The Clinical Significance of Spontaneous Pulsations of the Retinal Vein** — Archives of Neurology (1978) 103 [↗](#) DOI
22. ★  **Using MRI of the optic nerve sheath to detect elevated intracranial pressure** — Critical Care (2008) 103 [↗](#) DOI
23. ★  **Noninvasive monitoring intracranial pressure – A review of available modalities** — Surgical Neurology International (2017) 103 [↗](#) DOI
24. ★ **Bedside Optic Nerve Ultrasonography for Diagnosing Increased Intracranial Pressure** — Annals of Internal Medicine (2019) 92 [↗](#) DOI
25. ☆ **Retinal venous pulsation: Expanding our understanding and use of this enigmatic phenomenon** — Progress in Retinal and Eye Research (2016) 78 [↗](#) DOI
26. ★ **Echographic correlation of optic nerve sheath size and cerebrospinal fluid pressure.** — PubMed (1989) 73
27. ☆ **Diagnostic value of optical coherence tomography for intracranial pressure in idiopathic intracranial hypertension** — Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology (2012) 72 [↗](#) DOI
28. ★  **Update in intracranial pressure evaluation methods and translaminar pressure gradient role in glaucoma** — Acta Ophthalmologica (2014) 67 [↗](#) DOI
29. ★  **Effects of Lowering Cerebrospinal Fluid Pressure on the Shape of the Peripapillary Retina in Intracranial Hypertension** — Investigative Ophthalmology & Visual Science (2014) 66 [↗](#) DOI
30. ★  **New Optic Nerve Sonography Quality Criteria in the Diagnostic Evaluation of Traumatic Brain Injury** — Critical Care Research and Practice (2018) 55 [↗](#) DOI

CLUSTER 3 43 articles dans le réseau**Méthodes non invasives d'estimation de la pression intracrânienne : de l'échographie du nerf optique aux techniques avancées d'imagerie et d'optique, en comparaison avec le monitoring invasif de référence.**

Analyse du Cluster Bibliométrique

Méthodes non invasives d'estimation de la pression intracrânienne : de l'échographie du nerf optique aux techniques avancées d'imagerie et d'optique, en comparaison avec le monitoring invasif de référence.

Ce cluster réunit des travaux centrés sur le besoin clinique critique de mesurer la pression intracrânienne (PIC) de manière fiable, en réduisant les risques liés aux méthodes invasives traditionnelles. Le monitoring invasif par cathéter intraventriculaire ou capteur intraparenchymateux reste le gold standard [8,25], mais s'accompagne de complications significatives incluant infections, hémorragies et dysfonctionnements techniques [9]. Ces risques ont motivé la recherche de méthodes non invasives, synthétisées dans plusieurs revues [12,20,28].

L'échographie du diamètre de la gaine du nerf optique (ONSD) constitue la technique non invasive la plus étudiée du cluster. Les travaux pionniers ont démontré que le liquide cérébrospinal dans l'espace sous-arachnoïdien périoptique communique directement avec la pression intracrânienne [7], et que la gaine antérieure du nerf optique possède une élasticité suffisante pour détecter les variations de pression [10]. L'étude de Geeraerts et al. a validé l'échographie oculaire comme outil d'estimation de la PIC en neuro-réanimation [1], tandis que la méta-analyse de Robba et al. a confirmé la performance diagnostique globale de l'ONSD échographique [3]. La reproductibilité intra- et inter-observateur s'est révélée élevée chez l'adulte sain [5], et des seuils spécifiques ont été proposés, y compris pour les populations non caucasiennes [18]. L'ONSD a été validé en traumatologie [16] et en contexte neurochirurgical traumatique et non traumatique [14,15].

Parallèlement, l'IRM a permis d'évaluer l'espace sous-arachnoïdien périoptique [22], la compliance crânio-spinale [21], et les signes neuroradiologiques de l'hypertension intracrânienne idiopathique [4,26,27]. La tomographie par cohérence optique (OCT) a émergé comme marqueur de substitution potentiel de la PIC via la mesure du volume de la tête du nerf optique [19]. D'autres approches innovantes incluent la spectroscopie de corrélation diffuse pour estimer la PIC via le flux sanguin cérébral [23], l'analyse du déplacement tympanique [24] et l'ophtalmodynamométrie [30]. Un dispositif dédié de monitoring non invasif a montré des résultats préliminaires encourageants [29].

Le contexte clinique s'étend de la neuro-réanimation du traumatisme crânien sévère [2,6] à l'ophtalmologie, notamment le glaucome [11,17] et l'hypertension intracrânienne idiopathique [4,19,21].

- **[1] Geeraerts et al. (2008)** : Étude princeps validant l'échographie ONSD comme estimateur non invasif de la PIC en neuro-réanimation, devenue la référence méthodologique du domaine (412 citations).

- **[3] Robba et al. (2018)** : Première méta-analyse systématique évaluant la performance diagnostique de l'ONSD échographique, consolidant la base de preuves avec une synthèse quantitative rigoureuse (386 citations).

- **[7] Liu & Kahn (1993)** : Travail fondamental sur cadavres établissant la relation physique directe entre la pression sous-arachnoïdienne du nerf optique et la PIC, justifiant le rationnel physiologique de toutes les mesures ONSD ultérieures.

- **[10] Hansen et al. (2011)** : Étude expérimentale démontrant la dépendance du diamètre de la gaine optique aux variations de pression sous-arachnoïdienne, validant le mécanisme biophysique sous-jacent à la technique échographique.

- **[2] Rangel-Castillo et al. (2008)** : Revue de référence sur la prise en charge de l'hypertension intracrânienne, fournissant le cadre clinique dans lequel s'inscrivent toutes les techniques de monitoring.

- **[9] Tavakoli et al. (2017)** : Revue exhaustive des complications du monitoring invasif, justifiant directement le besoin de développer des alternatives non invasives.

- [19] Vijay et al. (2020) : Étude pionnière démontrant la corrélation entre les mesures OCT du nerf optique et la PIC, ouvrant une voie technologique nouvelle pour le monitoring non invasif en ophtalmologie.

- [5] Bäuerle et al. (2010) : Établissement des valeurs normales de l'ONSD et validation de la reproductibilité de la mesure, indispensable pour l'utilisation clinique standardisée de la technique.

Phase fondamentale (1993-2008) : Les travaux initiaux établissent le rationnel physiologique de la mesure ONSD sur cadavres [7], l'IRM de l'espace sous-arachnoïdien périoptique [22], puis la validation clinique échographique [1], dans un contexte de codification de la prise en charge de l'hypertension intracrânienne [2].

Phase de validation clinique (2010-2016) : Multiplication des études de validation dans différentes populations et contextes : valeurs normales et reproductibilité [5], traumatologie [16], neurochirurgie [14], patients avec PIC fluctuante [15], et pédiatrie [24]. L'IRM est utilisée pour la compliance crânio-spinale [21] et les pathologies ophtalmologiques [4,11]. Des seuils populationnels spécifiques sont proposés [18].

Phase de consolidation et d'innovation (2017-2020) : Un virage notable apparaît. D'une part, la méta-analyse de Robba et al. [3] consolide les preuves pour l'ONSD. D'autre part, de nouvelles technologies émergent : l'OCT comme substitut de la PIC [19], la spectroscopie de corrélation diffuse [23], et les dispositifs dédiés de monitoring non invasif [29]. Les revues synthétiques se multiplient, intégrant désormais des perspectives ophtalmologiques [28] et critiques [8,13]. On observe également un élargissement des applications vers le glaucome [17] et la médecine spatiale [27].

Seuils diagnostiques non consensuels : Le seuil ONSD de 5 mm, largement utilisé dans les populations caucasiennes, n'est pas universel. Wang et al. ont démontré qu'un seuil optimal différent est nécessaire pour la population chinoise [18], soulevant la question de la variabilité ethnique non résolue à ce jour [3,13].

Débat sur le bénéfice du monitoring invasif : Malgré les recommandations existantes, Alali et al. ont montré que les preuves d'un bénéfice du monitoring invasif de la PIC sur la mortalité en traumatisme crânien restent limitées [6], ce qui questionne à la fois le gold standard et la pertinence des études de validation non invasives qui s'y comparent [8,25].

Limites de l'ONSD en conditions dynamiques : Rajajee et al. ont identifié que la précision de l'ONSD échographique varie significativement entre les situations de PIC stable et fluctuante [15], limitant potentiellement son utilité en monitoring continu.

Absence de validation multicentrique à grande échelle : La plupart des études sont monocentriques et de taille modeste [1,14,16]. La méta-analyse de Robba et al. souligne l'hétérogénéité méthodologique entre études [3], et les revues récentes insistent sur le manque d'essais prospectifs de grande envergure [13,28].

Maturité technologique insuffisante des alternatives émergentes : Les nouvelles approches (OCT [19], spectroscopie de corrélation diffuse [23], dispositifs dédiés [29], ophtalmodynamométrie [30], déplacement tympanique [24]) en sont encore au stade de résultats préliminaires ou pilotes, sans validation clinique suffisante pour une adoption en routine.

Lacune en physiopathologie du glaucome : La relation entre PIC et glaucome à tension normale reste controversée, Lindén et al. ayant démontré une PIC normale chez ces patients [17], contredisant l'hypothèse d'un rôle de l'hypotension intracrânienne dans la pathogenèse, tandis que Wang et al. avaient suggéré une implication de l'espace cérébrospinal orbitaire [11].

TOP 30 ARTICLES — CLASSÉS PAR CITATIONS

1. ☆ Non-invasive assessment of intracranial pressure using ocular sonography in neurocritical care patients — Intensive Care Medicine (2008) 412 [DOI](#)
2. ☆ 📄 Management of Intracranial Hypertension — Neurologic Clinics (2008) 409 [DOI](#)
3. ☆ 📄 Optic nerve sheath diameter measured sonographically as non-invasive estimator of intracranial pressure: a systematic review and meta-analysis — Intensive Care Medicine (2018) 386 [DOI](#)
4. ☆ Idiopathic intracranial hypertension: the validity of cross-sectional neuroimaging signs — Neuroradiology (2006) 255 [DOI](#)
5. ★ Intra- and Interobserver Reliability of Sonographic Assessment of the Optic Nerve Sheath Diameter in Healthy Adults — Journal of Neuroimaging (2010) 223 [DOI](#)

6. ★  **Intracranial Pressure Monitoring in Severe Traumatic Brain Injury: Results from the American College of Surgeons Trauma Quality Improvement Program** — *Journal of Neurotrauma* (2013) 216 [DOI](#)
7. ☆ **Measurement and Relationship of Subarachnoid Pressure of the Optic Nerve to Intracranial Pressures in Fresh Cadavers** — *American Journal of Ophthalmology* (1993) 215 [DOI](#)
8. ★  **Intracranial pressure monitoring: Gold standard and recent innovations** — *World Journal of Clinical Cases* (2019) 202 [DOI](#)
9. ★  **Complications of invasive intracranial pressure monitoring devices in neurocritical care** — *Neurosurgical FOCUS* (2017) 194 [DOI](#)
10. ★ **Dependence of the optic nerve sheath diameter on acutely applied subarachnoid pressure - an experimental ultrasound study** — *Acta Ophthalmologica* (2011) 163 [DOI](#)
11. ☆ **Orbital Cerebrospinal Fluid Space in Glaucoma: The Beijing Intracranial and Intraocular Pressure (iCOP) Study** — *Ophthalmology* (2012) 163 [DOI](#)
12. ★ **Measuring Elevated Intracranial Pressure through Noninvasive Methods** — *Journal of Neurosurgical Anesthesiology* (2013) 161 [DOI](#)
13. ☆ **Optic nerve sheath diameter: present and future perspectives for neurologists and critical care physicians** — *Neurological Sciences* (2019) 128 [DOI](#)
14. ☆ **Optic nerve sheath diameter measurement: a means of detecting raised ICP in adult traumatic and non-traumatic neurosurgical patients** — *The American Journal of Emergency Medicine* (2016) 119 [DOI](#)
15. ★  **Comparison of accuracy of optic nerve ultrasound for the detection of intracranial hypertension in the setting of acutely fluctuating vs stable intracranial pressure: post-hoc analysis of data from a prospective, blinded single center study** — *Critical Care* (2012) 106 [DOI](#)
16. ☆ **Sonographic Optic Nerve Sheath Diameter as an Estimate of Intracranial Pressure in Adult Trauma** — *Journal of Surgical Research* (2011) 104 [DOI](#)
17. ☆  **Normal-Tension Glaucoma Has Normal Intracranial Pressure** — *Ophthalmology* (2017) 96 [DOI](#)
18. ★  **Optimal Optic Nerve Sheath Diameter Threshold for the Identification of Elevated Opening Pressure on Lumbar Puncture in a Chinese Population** — *PLoS ONE* (2015) 93 [DOI](#)
19. ★  **Using Optical Coherence Tomography as a Surrogate of Measurements of Intracranial Pressure in Idiopathic Intracranial Hypertension** — *JAMA Ophthalmology* (2020) 77 [DOI](#)
20. ☆ **Noninvasive methods of detecting increased intracranial pressure** — *Child s Nervous System* (2016) 67 [DOI](#)
21. ★  **Determination of cranio-spinal canal compliance distribution by MRI: Methodology and early application in idiopathic intracranial hypertension** — *Journal of Magnetic Resonance Imaging* (2011) 65 [DOI](#)
22. ★ **High-Resolution Magnetic Resonance Imaging of the Intraorbital Optic Nerve and Subarachnoid Space in Patients With Papilledema and Optic Atrophy** — *Archives of Ophthalmology* (1996) 63 [DOI](#)
23. ★  **Estimating intracranial pressure using pulsatile cerebral blood flow measured with diffuse correlation spectroscopy** — *Biomedical Optics Express* (2020) 61 [DOI](#)
24. ★  **The tympanic membrane displacement analyser for monitoring intracranial pressure in children** — *Child s Nervous System* (2013) 56 [DOI](#)
25. ☆ **Primary External Ventricular Drainage Catheter Versus Intraparenchymal ICP Monitoring: Outcome Analysis** — *Neurocritical Care* (2019) 54 [DOI](#)
26. ☆ **Intracranial Hypotension and Intracranial Hypertension** — *Neuroimaging Clinics of North America* (2010) 53 [DOI](#)
27. ☆ **Spaceflight-Induced Visual Impairment and Globe Deformations in Astronauts Are Linked to Orbital Cerebrospinal Fluid Volume Increase** — *Acta neurochirurgica. Supplementum* (2018) 47 [DOI](#)
28. ★ **Review of non-invasive intracranial pressure measurement techniques for ophthalmology applications** — *British Journal of Ophthalmology* (2019) 38 [DOI](#)
29. ★ **Evaluation of a novel noninvasive ICP monitoring device in patients undergoing invasive ICP monitoring: preliminary results** — *Journal of neurosurgery* (2017) 33 [DOI](#)
30. ★  **Ophthalmodynamometry for ICP prediction and pilot test on Mt. Everest** — *BMC Neurology* (2010) 30 [DOI](#)

Axe 3 — Intelligence artificielle et prédiction

482 articles-sources · 23 clusters · PubMed 2026 · Synthèse Claude Opus 4.6 · 482 articles · 5 clusters · Synthèse Claude Sonnet 4.5

Le système a cartographié le champ de recherche « Intelligence artificielle et prédiction ». Les clusters révèlent 23 niveaux d'investigation :

Cluster 0 (1,011 articles) — Ce cluster rassemble des articles fondateurs relatifs au diagnostic, à la classification, au traitement et à l'évaluation pronostique des pathologies cérébrovasculaires aiguës et des lésions cérébrales traumatiques, avec un ancrage méthodologique en neuroimagerie et en médecine de soins intensifs. Le socle méthodologique repose sur les standards de reporting systématique et sur les définitions consensuelles des pathologies critiques, notamment le sepsis et l'insuffisance cardiaque, fréquemment comorbides chez ces patients. L'évaluation neurologique standardisée s'appuie sur l'échelle de coma de Glasgow et l'échelle pronostique de Glasgow (Glasgow Outcome Scale), qui demeurent les outils de référence depuis les années 1970. **Prise en charge de l'accident vasculaire cérébral aigu et des lésions cérébrales : de la neuroimagerie aux interventions endovasculaires et à la médecine de soins critiques neurologiques.**

Cluster 1 (914 articles) — Ce cluster rassemble les fondements méthodologiques qui sous-tendent l'application de l'intelligence artificielle à l'analyse d'images, avec une forte pertinence pour l'imagerie médicale et l'aide à la décision clinique. Le socle repose sur les architectures de réseaux de neurones convolutifs (CNN), depuis les travaux pionniers sur l'apprentissage par gradient jusqu'à la percée d'AlexNet sur la base ImageNet, qui a catalysé la révolution de l'apprentissage profond en vision par ordinateur. Des architectures toujours plus profondes et performantes ont suivi : GoogLeNet/Inception, DenseNet, et les réseaux de détection d'objets comme Faster R-CNN, R-CNN et Feature Pyramid Networks. **Architectures d'apprentissage profond et méthodes fondamentales pour la vision par ordinateur et la classification d'images médicales/biomédicales à grande échelle.**

Cluster 2 (901 articles) — Ce cluster réunit les piliers algorithmiques, les cadres d'évaluation statistique et les outils logiciels qui sous-tendent l'application de l'intelligence artificielle aux domaines biomédicaux, notamment la neuroimagerie et l'aide à la décision clinique. Le socle théorique repose sur les architectures fondamentales de réseaux de neurones : l'apprentissage par rétropropagation, les réseaux récurrents à mémoire longue (LSTM), les encodeurs-décodeurs RNN, et les réseaux résiduels profonds, qui ont révolutionné la reconnaissance d'images évaluée sur le benchmark ImageNet. La régularisation par dropout et l'optimiseur Adam constituent des avancées techniques essentielles pour l'entraînement de ces modèles. **Fondements méthodologiques de l'apprentissage automatique et de l'apprentissage profond appliqués à l'analyse de données biomédicales et à l'imagerie : outils, algorithmes et cadres d'évaluation.**

Cluster 3 (360 articles) — Ce cluster réunit des travaux fondateurs et applicatifs autour de l'utilisation de l'apprentissage profond (deep learning) pour le traitement et l'analyse automatisée des images médicales. Le socle méthodologique repose sur des architectures de réseaux de neurones convolutifs : U-Net constitue le modèle de référence pour la segmentation biomédicale, s'appuyant sur les réseaux pleinement convolutifs (FCN) et les architectures profondes comme VGGNet. Des variantes architecturales ont été proposées, notamment MultiResUNet et Swin UNETR intégrant les transformers, pour améliorer la segmentation multimodale, en particulier des tumeurs cérébrales. **Apprentissage profond pour l'analyse d'images médicales : architectures de segmentation, reconstruction, recalage et radiomique appliquées à l'imagerie clinique.**

Cluster 4 (233 articles) — Ce cluster réunit des travaux à l'intersection de l'intelligence artificielle (IA), de l'imagerie médicale et de la médecine de précision, avec deux pôles pathologiques dominants : les maladies neurodégénératives (principalement la maladie de Parkinson et Alzheimer) et les maladies cardiovasculaires (athérosclérose, maladie coronarienne). Sur le plan méthodologique, le cluster s'ancre dans le développement de modèles d'apprentissage profond (deep learning) pour la reconnaissance de patterns complexes dans les données cliniques et d'imagerie. L'IA est présentée comme un levier transformateur pour la médecine de précision, permettant une détection précoce des maladies et une personnalisation thérapeutique. **Poewe et al. (2017) : Revue de référence exhaustive sur la maladie de Parkinson constituant le socle clinique sur lequel s'appuient les travaux de diagnostic automatisé [20,22]. -**

Cluster 1 (61 articles) — Ce front de recherche se caractérise par l'intégration de méthodes d'apprentissage profond avancées pour l'analyse d'images cérébrales et la prédiction de paramètres neurophysiologiques critiques. Les approches dominantes incluent les réseaux de neurones convolutionnels pour la segmentation automatisée, les réseaux adverses génératifs pour l'augmentation de données, l'apprentissage par graphes pour capturer les relations complexes entre structures cérébrales, et les architectures multimodales fusionnant IRM structurelle, fonctionnelle et angiographique. Les résultats récents montrent des avancées significatives dans la prédiction automatisée de la pression intracrânienne, la segmentation précise des hyperintensités de substance blanche, et le développement de biomarqueurs d'âge cérébral. **Intelligence Artificielle pour Support Décisionnel Clinique Neurologique**

17 micro-clusters complètent le panorama : Intelligence Artificielle pour Surveillance Neurologique Automatisée (55 articles), Intelligence Artificielle pour Diagnostic Cérébro-vasculaire d'Urgence (40 articles), Intelligence Artificielle Appliquée à l'Imagerie Médicale Clinique (38 articles), Intelligence Artificielle pour Surveillance Neurologique EEG (26 articles), IA Multi-Modale pour Prédiction Cardiovasculaire Neurologique (9 articles).



CE QUE HAL A TROUVÉ

Gap temporel critique : Les architectures de segmentation U-Net (2015) et les transformers visuels (ViT 2020, Swin 2021) dominent l'imagerie cérébrale, mais aucun modèle validé cliniquement n'intègre ces avancées pour la prédiction dynamique de la PIC à partir de séquences d'imagerie, créant un retard de 3-8 ans entre innovations architecturales et applications neuro-critiques.

Tension mécanistique non résolue : Les clusters IA soulignent simultanément l'exigence d'interprétabilité des modèles pour les décisions cliniques à haut risque et la supériorité des architectures profondes opaques (ResNet, transformers) pour la performance prédictive, sans solution satisfaisante pour réconcilier ces exigences contradictoires dans le contexte du monitoring PIC.

Signal faible émergent : L'émergence des jumeaux numériques et essais cliniques virtuels mentionnée dans les fronts de recherche IA suggère une nouvelle approche pour valider les algorithmes de prédiction PIC sans exposer les patients aux risques d'erreurs algorithmiques, paradigme non exploité dans les clusters neuro-critiques existants.

CLUSTERS DÉTAILLÉS — 482 ARTICLES SOURCES · 5 CLUSTERS

CLUSTER 0 1011 articles dans le réseau**Prise en charge de l'accident vasculaire cérébral aigu et des lésions cérébrales : de la neuroimagerie aux interventions endovasculaires et à la médecine de soins critiques neurologiques.**

Analyse Bibliométrique du Cluster

Prise en charge de l'accident vasculaire cérébral aigu et des lésions cérébrales : de la neuroimagerie aux interventions endovasculaires et à la médecine de soins critiques neurologiques.

Ce cluster rassemble des articles fondateurs relatifs au diagnostic, à la classification, au traitement et à l'évaluation pronostique des pathologies cérébrovasculaires aiguës et des lésions cérébrales traumatiques, avec un ancrage méthodologique en neuroimagerie et en médecine de soins intensifs.

Le socle méthodologique repose sur les standards de reporting systématique [1] et sur les définitions consensuelles des pathologies critiques, notamment le sepsis [2] et l'insuffisance cardiaque [3], fréquemment comorbides chez ces patients. L'évaluation neurologique standardisée s'appuie sur l'échelle de coma de Glasgow [4] et l'échelle pronostique de Glasgow (Glasgow Outcome Scale) [8], qui demeurent les outils de référence depuis les années 1970.

La classification étiologique des AVC ischémiques selon le système TOAST [5] a permis de structurer les essais cliniques, dont le premier essai majeur sur le rt-PA intraveineux [6], suivi par l'extension de la fenêtre thérapeutique à 4,5 heures [12]. Les guidelines successives de l'AHA/ASA [7,11,17] ont codifié ces avancées. Une révolution thérapeutique est survenue avec les essais de thrombectomie mécanique — MR CLEAN [13], ESCAPE [14], EXTEND-IA [15], SWIFT PRIME [20], REVASCAT [21] — consolidés par une méta-analyse individuelle [9], puis étendus à des fenêtres tardives de 6-16 heures [23] et 6-24 heures [18] grâce à la sélection par imagerie de perfusion.

L'épidémiologie globale documente le fardeau considérable des AVC [10,30] et des maladies cardiovasculaires [16]. Les standards de neuroimagerie des maladies des petits vaisseaux [19] et la définition actualisée de l'AVC [29] fournissent un cadre conceptuel moderne. La prise en charge des hémorragies intracérébrales spontanées [27] et des traumatismes crâniens sévères [24] — incluant la gestion de la pression intracrânienne — complète ce panorama, avec les recommandations de sédation et gestion de la douleur en réanimation [28]. L'émergence de thérapies contre les maladies neurodégénératives, comme le lecanemab pour la maladie d'Alzheimer [22], illustre l'élargissement du champ vers la neuroprotection.

- [4] Teasdale & Jennett (1974) : Introduction de l'échelle de coma de Glasgow, outil universellement utilisé pour l'évaluation neurologique et la prédiction pronostique, fondement de tout système d'aide à la décision clinique en neuro-réanimation.

- [6] NINDS rt-PA Study (1995) : Premier essai randomisé démontrant l'efficacité de la thrombolyse intraveineuse dans l'AVC ischémique aigu, pierre angulaire de toute la thérapeutique neurovasculaire moderne.

- [9] HERMES Collaboration (2016) : Méta-analyse sur données individuelles de cinq essais de thrombectomie [13-15,20,21] confirmant définitivement l'efficacité du traitement endovasculaire, devenue la référence pour les recommandations internationales.

- [24] Carney et al. (2016) : Quatrième édition des guidelines sur le traumatisme crânien sévère, incluant les recommandations sur le monitoring et la gestion de la pression intracrânienne, directement liée au thème de la recherche.

- [19] Wardlaw et al. (2013) : Standards de neuroimagerie pour la recherche sur les maladies des petits vaisseaux cérébraux, cadre méthodologique essentiel pour l'application du deep learning à l'imagerie cérébrale.

- [5] Adams et al. (1993) : Classification TOAST des sous-types d'AVC ischémique, indispensable pour la stratification des patients dans les essais cliniques et les modèles prédictifs par intelligence artificielle.

- [18] Nogueira et al. (2018) : Essai DAWN étendant la thrombectomie jusqu'à 24 heures sur la base d'un mismatch clinico-radiologique, illustrant le rôle critique de l'imagerie automatisée dans la sélection thérapeutique.

L'évolution chronologique révèle trois phases distinctes :

Phase 1 — Fondations (1974-1995) : Développement des outils d'évaluation clinique [4,8] et des classifications étiologiques [5], culminant avec la démonstration de l'efficacité de la thrombolyse [6].

Phase 2 — Extension thérapeutique (2008-2015) : Élargissement de la fenêtre de thrombolyse [12], puis révolution endovasculaire avec cinq essais positifs publiés simultanément en 2014-2015 [13-15,20,21], synthétisés par la méta-analyse HERMES [9].

Phase 3 — Sélection par imagerie et fenêtres étendues (2017-2022) : Les essais DAWN [18] et DEFUSE 3 [23] ont démontré que l'imagerie avancée (perfusion, mismatch) permet de traiter des patients bien au-delà des fenêtres classiques. Cette période voit l'actualisation rapide des guidelines [11,17] et l'épidémiologie globale à grande échelle [10,30,16].

Virage récent : L'émergence de thérapies ciblées comme le lecanemab [22] et l'accent mis sur la neuroimagerie standardisée [19] créent un terrain propice à l'intégration de l'intelligence artificielle et du deep learning pour la prédiction automatisée (pression intracrânienne [24], sélection des patients pour thrombectomie [18,23]).

Fenêtre thérapeutique et sélection des patients : Malgré les avancées, la définition optimale du mismatch clinico-radiologique pour sélectionner les patients au-delà de 6 heures reste débattue entre les critères de DAWN [18] et DEFUSE 3 [23], avec des populations cibles différentes.

Intelligence artificielle et aide à la décision : Bien que ce cluster porte sur la prédiction par machine learning de la pression intracrânienne, aucun des 30 articles les plus cités ne porte directement sur l'IA ou le deep learning appliqués à cette problématique. Cela révèle un **gap majeur** : le domaine repose encore sur des fondations cliniques et essais classiques, et les outils automatisés de mesure et de prédiction n'ont pas encore atteint le niveau de citation des textes fondateurs.

Gestion de la pression intracrânienne : Les guidelines sur le traumatisme crânien sévère [24] reconnaissent explicitement que les recommandations reposent sur des données limitées et ne constituent pas un protocole complet, soulignant le besoin de recherches supplémentaires.

Hémorragie intracérébrale : Les guidelines [27] et l'extension de la thrombolyse [12] identifient le risque hémorragique comme complication majeure, mais les stratégies optimales de prévention et de traitement de l'hémorragie intracrânienne post-thrombolyse restent insuffisamment codifiées.

Standardisation de la neuroimagerie : Wardlaw et al. [19] soulignent l'hétérogénéité persistante des protocoles d'imagerie, ce qui constitue un obstacle à l'entraînement fiable de modèles de deep learning et à la reproductibilité des mesures automatisées.

Épidémiologie et équité : Les études de charge globale [10,30] révèlent des disparités régionales considérables dans l'accès aux traitements, posant la question de la transférabilité des modèles d'IA développés principalement dans des contextes à hauts revenus.

TOP 30 ARTICLES — CLASSÉS PAR CITATIONS

- ★ Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement — Annals of Internal Medicine (2009) 37,550 [DOI](#)
- ★ The Third International Consensus Definitions for Sepsis and Septic Shock (Sepsis-3) — JAMA (2016) 26,833 [DOI](#)
- ★ Corrigendum to: 2021 ESC Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure: Developed by the Task Force for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure of the European Society of Cardiology (ESC) With the special contribution of the Heart Failure Association (HFA) of the ESC. — PubMed (2021) 19,535 [DOI](#)
- ☆ ASSESSMENT OF COMA AND IMPAIRED CONSCIOUSNESS — The Lancet (1974) 12,970 [DOI](#)
- ★ Classification of subtype of acute ischemic stroke. Definitions for use in a multicenter clinical trial. TOAST. Trial of Org 10172 in Acute Stroke Treatment. — Stroke (1993) 12,079 [DOI](#)
- ★ Tissue Plasminogen Activator for Acute Ischemic Stroke — New England Journal of Medicine (1995) 11,617 [DOI](#)
- ★ Guidelines for the Early Management of Patients With Acute Ischemic Stroke — Stroke (2013) 7,630 [DOI](#)
- ☆ ASSESSMENT OF OUTCOME AFTER SEVERE BRAIN DAMAGE A Practical Scale — The Lancet (1975) 7,531 [DOI](#)

9. ☆  **Endovascular thrombectomy after large-vessel ischaemic stroke: a meta-analysis of individual patient data from five randomised trials** — The Lancet (2016) 7,348 [DOI](#)
10. ☆  **Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019** — The Lancet Neurology (2021) 7,101 [DOI](#)
11. ★ **Guidelines for the Early Management of Patients With Acute Ischemic Stroke: 2019 Update to the 2018 Guidelines for the Early Management of Acute Ischemic Stroke: A Guideline for Healthcare Professionals From the American Heart Association/American Stroke Association** — Stroke (2019) 6,960 [DOI](#)
12. ★  **Thrombolysis with Alteplase 3 to 4.5 Hours after Acute Ischemic Stroke** — New England Journal of Medicine (2008) 6,551 [DOI](#)
13. ★  **A Randomized Trial of Intraarterial Treatment for Acute Ischemic Stroke** — New England Journal of Medicine (2014) 6,504 [DOI](#)
14. ★  **Randomized Assessment of Rapid Endovascular Treatment of Ischemic Stroke** — New England Journal of Medicine (2015) 5,956 [DOI](#)
15. ★  **Endovascular Therapy for Ischemic Stroke with Perfusion-Imaging Selection** — New England Journal of Medicine (2015) 5,736 [DOI](#)
16. ★  **Heart Disease and Stroke Statistics—2021 Update** — Circulation (2021) 5,544 [DOI](#)
17. ★ **2018 Guidelines for the Early Management of Patients With Acute Ischemic Stroke: A Guideline for Healthcare Professionals From the American Heart Association/American Stroke Association** — Stroke (2018) 5,429 [DOI](#)
18. ★  **Thrombectomy 6 to 24 Hours after Stroke with a Mismatch between Deficit and Infarct** — New England Journal of Medicine (2017) 5,378 [DOI](#)
19. ☆  **Neuroimaging standards for research into small vessel disease and its contribution to ageing and neurodegeneration** — The Lancet Neurology (2013) 5,246 [DOI](#)
20. ★  **Stent-Retriever Thrombectomy after Intravenous t-PA vs. t-PA Alone in Stroke** — New England Journal of Medicine (2015) 5,060 [DOI](#)
21. ★  **Thrombectomy within 8 Hours after Symptom Onset in Ischemic Stroke** — New England Journal of Medicine (2015) 4,794 [DOI](#)
22. ★  **Lecanemab in Early Alzheimer's Disease** — New England Journal of Medicine (2022) 4,745 [DOI](#)
23. ★  **Thrombectomy for Stroke at 6 to 16 Hours with Selection by Perfusion Imaging** — New England Journal of Medicine (2018) 4,679 [DOI](#)
24. ★ **Guidelines for the Management of Severe Traumatic Brain Injury, Fourth Edition** — Neurosurgery (2016) 4,169 [DOI](#)
25. ★  **Family history of subarachnoid haemorrhage: supplemental value of scrutinizing all relatives.** — Journal of Neurology Neurosurgery & Psychiatry (1997) 4,144 [DOI](#)
26. ★  **Isolated Hand Paresis: A Case Series** — Cerebrovascular Diseases Extra (2013) 4,070 [DOI](#)
27. ★ **Guidelines for the Management of Spontaneous Intracerebral Hemorrhage** — Stroke (2015) 3,935 [DOI](#)
28. ★ **Clinical Practice Guidelines for the Prevention and Management of Pain, Agitation/Sedation, Delirium, Immobility, and Sleep Disruption in Adult Patients in the ICU** — Critical Care Medicine (2018) 3,686 [DOI](#)
29. ★  **An Updated Definition of Stroke for the 21st Century** — Stroke (2013) 3,391 [DOI](#)
30. ☆  **Global, regional, and national burden of stroke, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016** — The Lancet Neurology (2019) 3,301 [DOI](#)

CLUSTER 1 914 articles dans le réseau**Architectures d'apprentissage profond et méthodes fondamentales pour la vision par ordinateur et la classification d'images médicales/biomédicales à grande échelle.**

Analyse Bibliométrique du Cluster

Architectures d'apprentissage profond et méthodes fondamentales pour la vision par ordinateur et la classification d'images médicales/biomédicales à grande échelle.

Ce cluster rassemble les fondements méthodologiques qui sous-tendent l'application de l'intelligence artificielle à l'analyse d'images, avec une forte pertinence pour l'imagerie médicale et l'aide à la décision clinique. Le socle repose sur les architectures de réseaux de neurones convolutifs (CNN), depuis les travaux pionniers sur l'apprentissage par gradient [8] jusqu'à la percée d'AlexNet sur la base ImageNet [5,7], qui a catalysé la révolution de l'apprentissage profond en vision par ordinateur. Des architectures toujours plus profondes et performantes ont suivi : GoogLeNet/Inception [11,16], DenseNet [13], et les réseaux de détection d'objets comme Faster R-CNN [10], R-CNN [15] et Feature Pyramid Networks [19]. La normalisation par lots a permis d'accélérer considérablement l'entraînement de ces réseaux profonds [21].

Plus récemment, un virage paradigmatique s'est opéré avec l'introduction des architectures Transformer en vision, notamment le Vision Transformer (ViT) [29] et le Swin Transformer [18], remplaçant progressivement les convolutions par des mécanismes d'attention. Les réseaux adversariaux génératifs (GAN) ont ouvert la voie à l'augmentation de données synthétiques [27], tandis que SMOTE adresse le déséquilibre des classes fréquent en données cliniques [17].

Sur le plan évaluatif, les méthodes de comparaison de courbes ROC [26,28] et les métriques de qualité d'image comme le SSIM [9] constituent des outils standards. L'explicabilité des modèles est assurée par des techniques comme Grad-CAM [30]. Le transfert d'apprentissage [23] permet d'adapter des modèles pré-entraînés aux domaines médicaux à données limitées. Les cadres méthodologiques de revues systématiques PRISMA [4,20] et les études de portée [14] structurent la synthèse de cette littérature, tandis que le contrôle du taux de fausses découvertes [3] reste essentiel pour la validation statistique. L'extraction de caractéristiques texturales [25] et la décomposition modale empirique [22] complètent l'arsenal analytique pour les signaux biomédicaux.

- [8] **LeCun et al. (1998)** : Article fondateur des CNN modernes, introduisant LeNet et démontrant l'efficacité de l'apprentissage par gradient pour la reconnaissance de documents — architecture de base pour toute la vision par ordinateur profonde.

- [5] **Krizhevsky et al. (2012/2017)** : AlexNet a déclenché la révolution de l'apprentissage profond en vision en démontrant une supériorité massive sur les méthodes classiques sur ImageNet, inaugurant l'ère des GPU pour l'entraînement des CNN.

- [7] **Deng et al. (2009)** : Création d'ImageNet, le jeu de données de référence qui a rendu possibles les avancées en classification d'images et permis l'étalonnage de toutes les architectures subséquentes.

- [10] **Ren et al. (2016)** : Faster R-CNN a introduit les Region Proposal Networks, rendant la détection d'objets quasi temps réel et devenant la référence pour la détection dans l'imagerie médicale.

- [29] **Dosovitskiy et al. (2020)** : Le Vision Transformer a démontré que les architectures Transformer, sans convolution, pouvaient égaler ou surpasser les CNN en classification d'images, ouvrant un nouveau paradigme.

- [23] **Pan & Yang (2009)** : Revue fondatrice sur le transfert d'apprentissage, technique cruciale pour appliquer des modèles pré-entraînés sur ImageNet aux domaines médicaux à faibles volumes de données.

- [30] **Selvaraju et al. (2017)** : Grad-CAM a fourni un outil d'explicabilité visuelle essentiel pour rendre les décisions des CNN interprétables, condition nécessaire en contexte clinique.

- [3] **Benjamini & Hochberg (1995)** : Méthode de contrôle du FDR devenue un standard universel pour les tests multiples,

indispensable en analyse d'imagerie cérébrale et en études multi-variables.

L'évolution chronologique révèle trois phases distinctes :

Phase fondatrice (1973-2009) : Les bases sont posées avec les caractéristiques texturales [25], l'évaluation par courbes ROC [28,26], le contrôle statistique FDR [3], les CNN à gradient [8], et la création d'ImageNet [7].

Explosion des CNN (2012-2017) : AlexNet [5] déclenche une course aux architectures toujours plus profondes — GoogLeNet [11], Inception v2/v3 [16], DenseNet [13], Faster R-CNN [10], FPN [19] — soutenue par la normalisation par lots [21]. Les GAN émergent [27], l'explicabilité devient prioritaire [30], et SMOTE répond au déséquilibre des données [17].

Virage Transformer et méthodologique (2020-2023) : Les Transformers envahissent la vision [29,18], marquant une rupture architecturale. Simultanément, les cadres PRISMA actualisés [4] et les méthodologies de revue [14,20] traduisent la maturité du domaine et le besoin de synthèses rigoureuses pour la recherche translationnelle.

CNN vs Transformers : La question de savoir si les Transformers [29,18] surpassent réellement les CNN [5,13] en toutes circonstances, notamment sur de petits jeux de données médicaux, reste débattue. Le transfert d'apprentissage [23] atténue partiellement ce problème mais ne le résout pas.

Explicabilité insuffisante : Malgré Grad-CAM [30], l'interprétabilité des modèles profonds reste superficielle pour la prise de décision clinique, les cartes d'activation ne fournissant pas de raisonnement causal.

Déséquilibre des données et biais : Les techniques comme SMOTE [17] sont largement utilisées mais peuvent introduire des artefacts dans les données synthétiques ; les GAN [27] offrent une alternative mais avec des risques de génération d'échantillons non réalistes.

Hétérogénéité du cluster : Plusieurs articles sont manifestement mal attribués à ce cluster (santé reproductive [1], statistiques du cancer [2], changement climatique [24], système de preuve mathématique [6], article sur les suppléments de santé [12]), suggérant un bruit significatif dans l'analyse de co-citation ou un effet d'hyper-citation généraliste.

Gap domaine-spécifique : Les 30 articles les plus cités sont quasi exclusivement méthodologiques et génériques. L'absence d'articles spécifiquement dédiés à la prédiction de la pression intracrânienne ou à la neuroimagerie clinique dans ce top 30 révèle que les applications cliniques ciblées par la requête initiale s'appuient sur ces fondements mais restent dans la périphérie citationnelle du cluster, indiquant un écart entre développement méthodologique et traduction clinique.

TOP 30 ARTICLES — CLASSÉS PAR CITATIONS

- ★ **Yaşlı Kadınlarda Üreme Sağlığı** — DergiPark (Istanbul University) 169,600
- ★ **Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries** — CAA Cancer Journal for Clinicians (2021) 110,232 [DOI](#)
- ★ **Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing** — Journal of the Royal Statistical Society Series B (Statistical Methodology) (1995) 106,123 [DOI](#)
- ★ **The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews** — BMJ (2021) 85,301 [DOI](#)
- ★ **ImageNet classification with deep convolutional neural networks** — Communications of the ACM (2017) 75,547 [DOI](#)
- ★ **MizAR 60 for MizAR 50** — DROPS (Schloss Dagstuhl – Leibniz Center for Informatics) (2023) 74,119 [DOI](#)
- ★ **ImageNet: A large-scale hierarchical image database** — 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (2009) 60,460 [DOI](#)
- ★ **Gradient-based learning applied to document recognition** — Proceedings of the IEEE (1998) 56,796 [DOI](#)
- ★ **Image quality assessment: from error visibility to structural similarity** — IEEE Transactions on Image Processing (2004) 54,367 [DOI](#)
- ★ **Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks** — IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (2016) 52,689 [DOI](#)
- ★ **Going deeper with convolutions** (2015) 46,263 [DOI](#)
- ★ **AI-Assisted Pipeline for Dynamic Generation of Trustworthy Health Supplement Content at Scale** — DROPS (Schloss Dagstuhl – Leibniz Center for Informatics) (2018) 45,380 [DOI](#)
- ★ **Densely Connected Convolutional Networks** (2017) 43,520 [DOI](#)
- ★ **Scoping studies: towards a methodological framework** — International Journal of Social Research Methodology (2005) 33,642 [DOI](#)

15. ★ **Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation** (2014) 31,285 [DOI](#)
16. ★ **Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision** (2016) 30,321 [DOI](#)
17. ★ **SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique** — Journal of Artificial Intelligence Research (2002) 29,848 [DOI](#)
18. ★ **Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows** — 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV) (2021) 28,279 [DOI](#)
19. ★ **Feature Pyramid Networks for Object Detection** (2017) 27,880 [DOI](#)
20. ★ **Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement** — Systematic Reviews (2015) 25,933 [DOI](#)
21. ★ **Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift** — arXiv (Cornell University) (2015) 24,241 [DOI](#)
22. ★ **The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis** — Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences (1998) 22,942 [DOI](#)
23. ★ **A Survey on Transfer Learning** — IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering (2009) 22,607 [DOI](#)
24. ★ **Home visits: a strategy to improve newborn survival - Authors' reply** — Portuguese National Funding Agency for Science, Research and Technology (RCAAP Project by FCT) (2008) 22,514 [DOI](#)
25. ★ **Textural Features for Image Classification** — IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics (1973) 22,235 [DOI](#)
26. ★ **Comparing the Areas under Two or More Correlated Receiver Operating Characteristic Curves: A Nonparametric Approach** — Biometrics (1988) 21,784 [DOI](#)
27. ★ **GAN (Generative Adversarial Nets)** — Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics (2017) 21,733 [DOI](#)
28. ★ **The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve.** — Radiology (1982) 21,440 [DOI](#)
29. ★ **An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale** — arXiv (Cornell University) (2020) 21,296 [DOI](#)
30. ★ **Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-Based Localization** (2017) 20,305 [DOI](#)

CLUSTER 2 901 articles dans le réseau**Fondements méthodologiques de l'apprentissage automatique et de l'apprentissage profond appliqués à l'analyse de données biomédicales et à l'imagerie : outils, algorithmes et cadres d'évaluation.**

Analyse Bibliométrique du Cluster

Fondements méthodologiques de l'apprentissage automatique et de l'apprentissage profond appliqués à l'analyse de données biomédicales et à l'imagerie : outils, algorithmes et cadres d'évaluation.

Ce cluster réunit les piliers algorithmiques, les cadres d'évaluation statistique et les outils logiciels qui sous-tendent l'application de l'intelligence artificielle aux domaines biomédicaux, notamment la neuroimagerie et l'aide à la décision clinique. Le socle théorique repose sur les architectures fondamentales de réseaux de neurones : l'apprentissage par rétropropagation [20], les réseaux récurrents à mémoire longue (LSTM) [3], les encodeurs-décodeurs RNN [24], et les réseaux résiduels profonds [1], qui ont révolutionné la reconnaissance d'images évaluée sur le benchmark ImageNet [16]. La régularisation par dropout [18] et l'optimiseur Adam [4] constituent des avancées techniques essentielles pour l'entraînement de ces modèles. Une synthèse magistrale du domaine est fournie par LeCun, Bengio et Hinton [5].

En parallèle, les méthodes d'apprentissage automatique classiques restent centrales : les forêts aléatoires [2], les machines à vecteurs de support [15,19], le boosting par gradient via XGBoost [12], le lasso pour la sélection de variables [9], et l'ensemble AdaBoost [29]. L'écosystème logiciel scikit-learn [8] a démocratisé l'accès à ces algorithmes, tandis que EEGLAB [23] offre des outils spécialisés pour l'analyse de signaux neurophysiologiques.

L'évaluation rigoureuse des modèles et des mesures cliniques mobilise des cadres statistiques spécifiques : l'analyse ROC [28], l'accord inter-observateurs par le kappa de Cohen [6], la concordance par Bland-Altman [11], et les coefficients de corrélation intraclasse [21,26]. Pour les revues systématiques guidant cette recherche, les lignes directrices PRISMA-ScR [17] et l'outil Rayyan [25] structurent la synthèse des connaissances. La gestion des données cliniques est facilitée par REDCap [10]. Le dépistage cognitif par le MoCA [22] illustre l'ancrage clinique neurologique du cluster. Enfin, des contributions transversales comme AlphaFold [13] démontrent le potentiel transformateur de l'IA en sciences biomédicales, tandis que l'étude Global Burden of Disease [30] et les hallmarks du cancer [7] fournissent le contexte épidémiologique et biologique justifiant ces développements technologiques.

- [1] He et al. (2016) — L'architecture ResNet a rendu possible l'entraînement de réseaux très profonds grâce aux connexions résiduelles, devenant la colonne vertébrale de la plupart des systèmes de vision par ordinateur appliqués à l'imagerie médicale, y compris la neuroimagerie.

- [2] Breiman (2001) — Les forêts aléatoires constituent l'un des algorithmes les plus utilisés en prédiction clinique (y compris la pression intracrânienne) grâce à leur robustesse, leur interprétabilité relative et leur résistance au surapprentissage.

- [3] Hochreiter & Schmidhuber (1997) — L'architecture LSTM a résolu le problème du gradient évanescent dans les séries temporelles, ce qui est fondamental pour la prédiction de signaux physiologiques longitudinaux comme la pression intracrânienne.

- [5] LeCun, Bengio & Hinton (2015) — Cette revue séminale dans *Nature* a formalisé et popularisé le deep learning auprès de la communauté scientifique biomédicale, catalysant son adoption en neuroimagerie et en aide à la décision clinique.

- [8] Pedregosa et al. (2012) — Scikit-learn est l'infrastructure logicielle de référence qui a rendu les algorithmes de machine learning accessibles aux chercheurs non-informaticiens en biomédecine.

- [12] Chen & Guestrin (2016) — XGBoost est devenu l'algorithme dominant dans de nombreuses compétitions et études prédictives cliniques grâce à son efficacité et sa scalabilité sur données tabulaires.

- [6] Landis & Koch (1977) — Ce cadre d'interprétation du kappa reste la référence universelle pour évaluer la fiabilité inter-

observateurs, essentielle pour valider les mesures automatisées par rapport aux mesures humaines.

- **[11] Bland & Altman (1986)** — La méthode de comparaison entre deux techniques de mesure clinique est indispensable pour valider tout système automatisé de mesure (pression intracrânienne, volumes cérébraux) contre un gold standard.

L'évolution chronologique révèle trois vagues distinctes :

Phase fondatrice (1977-2001) : Mise en place des bases statistiques d'évaluation [6,11,26] et des algorithmes classiques — rétropropagation [20], SVM [15,19], LSTM [3], boosting [29], lasso [9], forêts aléatoires [2]. Ces méthodes ont structuré le champ pendant deux décennies.

Phase de transition (2004-2014) : Émergence des outils logiciels et des infrastructures de données — EEGLAB pour la neurophysiologie [23], MoCA pour l'évaluation cognitive [22], REDCap pour la gestion de données [10], scikit-learn pour le machine learning [8]. Les innovations techniques clés incluent le dropout [18], Adam [4] et les GRU [24], préparant le terrain pour l'explosion du deep learning.

Phase d'accélération (2015-2021) : Virage décisif vers l'apprentissage profond avec la synthèse de LeCun et al. [5], les architectures ResNet [1], le benchmark ImageNet [16], et XGBoost [12]. On observe une convergence vers l'application biomédicale à grande échelle, illustrée par AlphaFold [13] et contextualisée par les données épidémiologiques globales [30]. La méthodologie de revue systématique se formalise avec PRISMA-ScR [17] et Rayyan [25], traduisant une volonté de rigueur dans la synthèse des preuves en IA biomédicale. Le virage récent est clairement orienté vers la **validation clinique** et la **reproductibilité** [17,21,25].

Interprétabilité vs. performance : Les modèles profonds [1,3,5] offrent des performances supérieures mais restent largement des « boîtes noires », ce qui entre en tension avec les exigences d'explicabilité clinique. Les méthodes classiques comme les forêts aléatoires [2] et XGBoost [12] sont souvent préférées en pratique clinique pour leur interprétabilité, créant un débat non résolu sur le compromis optimal.

Validation des mesures automatisées : Les cadres de Bland-Altman [11], de Landis-Koch [6] et des ICC [21,26] sont systématiquement invoqués, mais leur application aux prédictions par IA manque souvent de standardisation. La question de savoir quel seuil d'accord est cliniquement acceptable pour remplacer un opérateur humain (par exemple pour la mesure de la pression intracrânienne) reste ouverte.

Absence de benchmarks spécifiques : Si ImageNet [16] a standardisé l'évaluation en vision par ordinateur, il n'existe pas d'équivalent reconnu pour la prédiction de la pression intracrânienne ou la neuroimagerie clinique, rendant les comparaisons entre études difficiles.

Biais de généralisation : Les données d'entraînement issues de cohortes monocentriques, documentées via REDCap [10], posent un problème de transférabilité. Les revues systématiques [17,25] révèlent une hétérogénéité méthodologique importante entre les études, avec des définitions variables des outcomes et des populations.

Fossé entre démonstration technique et impact clinique : Malgré des preuves de concept spectaculaires [13], le transfert vers l'aide à la décision clinique effective (par exemple intégration dans les systèmes de monitoring neurologique) reste limité. Le dépistage cognitif [22] et le fardeau global des maladies [30] soulignent l'ampleur des besoins cliniques non satisfaits que ces technologies devraient adresser.

TOP 30 ARTICLES — CLASSÉS PAR CITATIONS

- | | |
|--|--|
| 1. ★ Deep Residual Learning for Image Recognition (2016)
216,145 DOI | 4. ★ Adam: A Method for Stochastic Optimization — UvA-DARE
(University of Amsterdam) (2014) 84,458 DOI |
| 2. ☆ Random Forests — Machine Learning (2001) 120,422 DOI | 5. ☆ Deep learning — Nature (2015) 78,741 DOI |
| 3. ★ Long Short-Term Memory — Neural Computation (1997)
94,536 DOI | 6. ★ The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data — Biometrics (1977) 76,958 DOI |
| | 7. ☆ Hallmarks of Cancer: The Next Generation — Cell (2011)
65,509 DOI |

8. ★  **Scikit-learn: Machine Learning in Python** — arXiv (Cornell University) (2012) 63,354 [DOI](#)
9. ★ **Regression Shrinkage and Selection Via the Lasso** — Journal of the Royal Statistical Society Series B (Statistical Methodology) (1996) 50,573 [DOI](#)
10. ☆  **Research electronic data capture (REDCap)—A metadata-driven methodology and workflow process for providing translational research informatics support** — Journal of Biomedical Informatics (2008) 49,832 [DOI](#)
11. ☆ **STATISTICAL METHODS FOR ASSESSING AGREEMENT BETWEEN TWO METHODS OF CLINICAL MEASUREMENT** — The Lancet (1986) 47,111 [DOI](#)
12. ★  **XGBoost** (2016) 44,888 [DOI](#)
13. ☆  **Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold** — Nature (2021) 42,551 [DOI](#)
14. ☆ **A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms** — IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics (1979) 42,509 [DOI](#)
15. ☆  **Support-vector networks** — Machine Learning (1995) 39,923 [DOI](#)
16. ☆ **ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge** — International Journal of Computer Vision (2015) 39,595 [DOI](#)
17. ★ **PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation** — Annals of Internal Medicine (2018) 37,175 [DOI](#)
18. ★ **Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting** (2014) 34,176
19. ☆  **Support-Vector Networks** — Machine Learning (1995) 31,947 [DOI](#)
20. ☆ **Learning representations by back-propagating errors** — Nature (1986) 29,910 [DOI](#)
21. ☆  **A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research** — Journal of Chiropractic Medicine (2016) 25,955 [DOI](#)
22. ★ **The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: A Brief Screening Tool For Mild Cognitive Impairment** — Journal of the American Geriatrics Society (2005) 24,564 [DOI](#)
23. ☆ **EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis** — Journal of Neuroscience Methods (2004) 24,370 [DOI](#)
24. ★  **Learning Phrase Representations using RNN Encoder-Decoder for Statistical Machine Translation** (2014) 23,843 [DOI](#)
25. ★  **Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews** — Systematic Reviews (2016) 22,868 [DOI](#)
26. ★ **Intraclass correlations: Uses in assessing rater reliability.** — Psychological Bulletin (1979) 22,707 [DOI](#)
27. ☆ **The Elements of Statistical Learning** — Springer series in statistics (2009) 22,229 [DOI](#)
28. ☆ **An introduction to ROC analysis** — Pattern Recognition Letters (2005) 20,596 [DOI](#)
29. ☆ **A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting** — Journal of Computer and System Sciences (1997) 19,916 [DOI](#)
30. ☆  **Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019** — The Lancet (2020) 18,373 [DOI](#)

CLUSTER 3 360 articles dans le réseau**Apprentissage profond pour l'analyse d'images médicales : architectures de segmentation, reconstruction, recalage et radiomique appliquées à l'imagerie clinique.**

Analyse Bibliométrique du Cluster

Apprentissage profond pour l'analyse d'images médicales : architectures de segmentation, reconstruction, recalage et radiomique appliquées à l'imagerie clinique.

Ce cluster réunit des travaux fondateurs et applicatifs autour de l'utilisation de l'apprentissage profond (deep learning) pour le traitement et l'analyse automatisée des images médicales. Le socle méthodologique repose sur des architectures de réseaux de neurones convolutifs : U-Net [1] constitue le modèle de référence pour la segmentation biomédicale, s'appuyant sur les réseaux pleinement convolutifs (FCN) [3,7] et les architectures profondes comme VGGNet [2]. Des variantes architecturales ont été proposées, notamment MultiResUNet [19] et Swin UNETR intégrant les transformers [29], pour améliorer la segmentation multimodale, en particulier des tumeurs cérébrales.

L'apprentissage profond a été appliqué massivement au dépistage et au diagnostic, notamment pour la détection du cancer du poumon par scanner faible dose [8,20] et la détection de métastases ganglionnaires en pathologie mammaire [15]. Une revue systématique a cartographié l'ensemble de ces applications [6], complétée par une synthèse focalisée sur l'IRM [22].

Le domaine de la radiomique, visant l'extraction quantitative de caractéristiques d'imagerie, a été formalisé conceptuellement [18,11] puis standardisé via l'initiative IBSI [14], avec des outils dédiés comme PyRadiomics [10]. Ces biomarqueurs d'imagerie permettent un phénotypage tumoral non invasif [11].

La reconstruction d'images, notamment en scanner faible dose et en IRM accélérée, a bénéficié de réseaux encodeur-décodeur résiduels [23], de GAN avec distance de Wasserstein [26], de réseaux variationnels [25] et d'approches par apprentissage de variétés [24]. La traduction d'images non appariées via CycleGAN [5,17] a ouvert des perspectives pour la synthèse inter-modalités.

Le recalage d'images médicales a évolué des méthodes classiques comme les démons diffeomorphes [27], ANTs [12] et Elastix [13] vers des approches par apprentissage avec VoxelMorph [21]. La détection d'objets a été améliorée par la focal loss traitant le déséquilibre de classes [4,9]. Enfin, les enjeux d'interprétabilité [16], de standardisation des données [28] et de gestion des erreurs en radiothérapie [30] complètent ce paysage.

- **[1] U-Net (Ronneberger et al., 2015)** : Architecture fondatrice de la segmentation biomédicale, avec son encodeur-décodeur à connexions sautées, devenue le standard de facto pour quasiment toutes les tâches de segmentation en imagerie médicale (>85 000 citations).

- **[3,7] FCN (Long/Shelhamer et al., 2015-2016)** : Introduction du paradigme de segmentation pixel-à-pixel par réseaux pleinement convolutifs, fondement théorique sur lequel U-Net et ses dérivés ont été construits.

- **[6] Litjens et al. (2017)** : Revue exhaustive de référence sur le deep learning en analyse d'images médicales, cartographiant les applications en détection, segmentation, classification et recalage, servant de point d'entrée incontournable dans le domaine.

- **[11] Aerts et al. (2014)** : Article pionnier de la radiomique quantitative démontrant qu'un large ensemble de caractéristiques d'imagerie peut décoder le phénotype tumoral de manière non invasive, ouvrant la voie aux biomarqueurs radiomiques.

- **[14] Zwanenburg et al. (2020)** : Initiative de standardisation (IBSI) de 174 caractéristiques radiomiques avec valeurs de référence validées, essentielle pour la reproductibilité et l'adoption clinique de la radiomique.

- **[5,17] CycleGAN (Zhu et al., 2017)** : Méthode de traduction d'images non appariées par cohérence cyclique, ayant permis la synthèse inter-modalités (CT↔IRM) sans nécessiter de données appariées, révolutionnant l'augmentation de données en imagerie

médicale.

- **[21] VoxelMorph (Balakrishnan et al., 2019)** : Cadre d'apprentissage pour le recalage déformable d'images médicales, marquant le passage des méthodes itératives classiques vers des approches par réseaux de neurones rapides et performantes.

- **[4,9] Focal Loss (Lin et al., 2017-2018)** : Fonction de perte rééquilibrant les classes pour la détection dense d'objets, largement adoptée en imagerie médicale où le déséquilibre entre lésions et fond normal est omniprésent.

L'évolution chronologique révèle trois phases distinctes :

Phase 1 – Fondations classiques (2004-2012) : Les méthodes de recalage non paramétrique [27], les toolbox comme Elastix [13] et ANTs [12], ainsi que les premiers cadres conceptuels de la radiomique [18] et la gestion des erreurs en radiothérapie [30] posent les bases pré-deep learning. L'essai NLST [8] démontre l'intérêt clinique du dépistage par scanner faible dose.

Phase 2 – Révolution deep learning (2014-2018) : L'émergence des architectures fondatrices (VGGNet [2], FCN [3,7], U-Net [1]) transforme radicalement le domaine. La focal loss [4,9] résout le problème du déséquilibre de classes. Les GAN, notamment CycleGAN [5,17], ouvrent la synthèse d'images. Les premières applications cliniques majeures apparaissent [15,20]. La reconstruction d'images par deep learning prend son essor [23,24,25,26]. Les revues structurantes [6,22] consolident le champ.

Phase 3 – Maturation et standardisation (2019-2022) : Un virage vers la standardisation se confirme avec l'IBSI [14] et les bases de données publiques [28]. Les architectures évoluent vers les transformers [29] et les réseaux plus sophistiqués [19]. L'apprentissage du recalage [21] remplace progressivement les méthodes itératives. L'interprétabilité [16] devient une préoccupation centrale, signalant la transition vers le déploiement clinique.

Le virage récent le plus marquant est le passage des **transformers** en segmentation [29], supplantant potentiellement les architectures purement convolutives comme U-Net [1].

Reproductibilité et standardisation : L'absence de définitions standardisées des caractéristiques radiomiques a longtemps entravé l'utilisation clinique [14]. Malgré l'initiative IBSI [14], la variabilité inter-logiciels (PyRadiomics [10] vs. autres implémentations) reste problématique, et la reproductibilité des études radiomiques demeure un défi majeur [11,18].

Interprétabilité vs. performance : Doshi-Velez et Kim [16] soulignent l'absence de science rigoureuse de l'interprétabilité, alors que les modèles de deep learning les plus performants [1,2,29] fonctionnent comme des boîtes noires. Ce fossé entre performance diagnostique [15,20] et explicabilité limite l'adoption clinique et soulève des questions réglementaires.

Généralisation et biais de données : Les modèles entraînés sur des jeux de données spécifiques [28] montrent des performances dégradées en contexte réel. La question de la transférabilité des architectures génériques (VGGNet [2], transformers [29]) vers des tâches médicales spécialisées, avec des données limitées, reste ouverte.

Méthodes classiques vs. apprentissage : La tension entre méthodes conventionnelles de recalage (Elastix [13], ANTs [12], démons difféomorphes [27]) et les approches par apprentissage (VoxelMorph [21]) n'est pas résolue, notamment sur les garanties de difféomorphisme et la précision anatomique fine.

Validation clinique : Un écart persiste entre les performances algorithmiques rapportées in silico [15,20] et l'intégration réelle dans les flux de travail cliniques. L'essai NLST [8] reste l'un des rares exemples de validation clinique à grande échelle, tandis que la plupart des approches de deep learning [6,22] manquent d'essais prospectifs rigoureux.

Reconstruction faible dose : Les approches GAN [26] et réseaux résiduels [23] pour la réduction de dose en CT produisent parfois des artefacts ou des textures artificielles, posant la question de la fiabilité diagnostique des images reconstruites par rapport aux méthodes itératives conventionnelles.

TOP 30 ARTICLES – CLASSÉS PAR CITATIONS

1. ★  **U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation** — Lecture notes in computer science (2015) 85,981 [DOI](#)
2. ★  **Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition** — arXiv (Cornell University) (2014) 75,404 [DOI](#)
3. ★ **Fully convolutional networks for semantic segmentation** (2015) 36,286 [DOI](#)
4. ★ **Focal Loss for Dense Object Detection** (2017) 24,611 [DOI](#)
5. ★  **Unpaired Image-to-Image Translation Using Cycle-Consistent Adversarial Networks** (2017) 21,410 [DOI](#)
6. ☆  **A survey on deep learning in medical image analysis** — Medical Image Analysis (2017) 13,521 [DOI](#)
7. ★ **Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation** — IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (2016) 10,935 [DOI](#)
8. ★  **Reduced Lung-Cancer Mortality with Low-Dose Computed Tomographic Screening** — New England Journal of Medicine (2011) 10,748 [DOI](#)
9. ★ **Focal Loss for Dense Object Detection** — IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (2018) 9,305 [DOI](#)
10. ★  **Computational Radiomics System to Decode the Radiographic Phenotype** — Cancer Research (2017) 6,233 [DOI](#)
11. ★  **Decoding tumour phenotype by noninvasive imaging using a quantitative radiomics approach** — Nature Communications (2014) 5,008 [DOI](#)
12. ☆  **A reproducible evaluation of ANTs similarity metric performance in brain image registration** — NeuroImage (2010) 4,942 [DOI](#)
13. ★ **elastix: A Toolbox for Intensity-Based Medical Image Registration** — IEEE Transactions on Medical Imaging (2009) 4,257 [DOI](#)
14. ★  **The Image Biomarker Standardization Initiative: Standardized Quantitative Radiomics for High-Throughput Image-based Phenotyping** — Radiology (2020) 3,625 [DOI](#)
15. ★  **Diagnostic Assessment of Deep Learning Algorithms for Detection of Lymph Node Metastases in Women With Breast Cancer** — JAMA (2017) 3,192 [DOI](#)
16. ★  **Towards A Rigorous Science of Interpretable Machine Learning** — arXiv (Cornell University) (2017) 3,107 [DOI](#)
17. ★  **Unpaired Image-to-Image Translation using Cycle-Consistent Adversarial Networks** — arXiv (Cornell University) (2017) 2,309 [DOI](#)
18. ☆  **Radiomics: the process and the challenges** — Magnetic Resonance Imaging (2012) 2,221 [DOI](#)
19. ☆  **MultiResUNet : Rethinking the U-Net architecture for multimodal biomedical image segmentation** — Neural Networks (2019) 2,184 [DOI](#)
20. ☆ **End-to-end lung cancer screening with three-dimensional deep learning on low-dose chest computed tomography** — Nature Medicine (2019) 1,980 [DOI](#)
21. ★  **VoxelMorph: A Learning Framework for Deformable Medical Image Registration** — IEEE Transactions on Medical Imaging (2019) 1,909 [DOI](#)
22. ☆  **An overview of deep learning in medical imaging focusing on MRI** — Zeitschrift für Medizinische Physik (2018) 1,907 [DOI](#)
23. ★  **Low-Dose CT With a Residual Encoder-Decoder Convolutional Neural Network** — IEEE Transactions on Medical Imaging (2017) 1,769 [DOI](#)
24. ☆  **Image reconstruction by domain-transform manifold learning** — Nature (2018) 1,693 [DOI](#)
25. ★ **Learning a variational network for reconstruction of accelerated MRI data** — Magnetic Resonance in Medicine (2017) 1,648 [DOI](#)
26. ★  **Low-Dose CT Image Denoising Using a Generative Adversarial Network With Wasserstein Distance and Perceptual Loss** — IEEE Transactions on Medical Imaging (2018) 1,567 [DOI](#)
27. ☆  **Diffeomorphic demons: Efficient non-parametric image registration** — NeuroImage (2008) 1,560 [DOI](#)
28. ★  **MIMIC-CXR, a de-identified publicly available database of chest radiographs with free-text reports** — Scientific Data (2019) 1,494 [DOI](#)
29. ☆ **Swin UNETR: Swin Transformers for Semantic Segmentation of Brain Tumors in MRI Images** — Lecture notes in computer science (2022) 1,463 [DOI](#)
30. ☆ **Errors and margins in radiotherapy** — Seminars in Radiation Oncology (2004) 1,373 [DOI](#)

CLUSTER 4 233 articles dans le réseau**Intelligence artificielle et apprentissage automatique appliqués à la prédiction des risques, au diagnostic et à la stratification pronostique dans les maladies neurodégénératives et cardiovasculaires.**

Analyse Bibliométrique du Cluster

Intelligence artificielle et apprentissage automatique appliqués à la prédiction des risques, au diagnostic et à la stratification pronostique dans les maladies neurodégénératives et cardiovasculaires.

Ce cluster réunit des travaux à l'intersection de l'intelligence artificielle (IA), de l'imagerie médicale et de la médecine de précision, avec deux pôles pathologiques dominants : les maladies neurodégénératives (principalement la maladie de Parkinson et Alzheimer) et les maladies cardiovasculaires (athérosclérose, maladie coronarienne).

Sur le plan méthodologique, le cluster s'ancre dans le développement de modèles d'apprentissage profond (deep learning) pour la reconnaissance de patterns complexes dans les données cliniques et d'imagerie [4,12,17,23]. L'IA est présentée comme un levier transformateur pour la médecine de précision, permettant une détection précoce des maladies et une personnalisation thérapeutique [5,18,26]. Un débat fondamental traverse ces travaux : la nécessité de privilégier des modèles interprétables plutôt que des boîtes noires opaques dans les décisions médicales à haut risque [1], et l'exigence de standards rigoureux pour le reporting des modèles prédictifs en IA [11].

Concernant les maladies neurodégénératives, les travaux portent sur la physiopathologie de la maladie de Parkinson, notamment le rôle de l' α -synucléine [3], du stress oxydatif [9] et de la dysautonomie [24], ainsi que sur le diagnostic assisté par apprentissage automatique à partir de données motrices, vocales et d'imagerie [20,22]. Le deep learning est également appliqué à la classification diagnostique et pronostique de la maladie d'Alzheimer à partir de données de neuroimagerie [12]. La détection automatisée du papillœdème par photographies du fond d'œil illustre une application clinique directe de ces technologies [21].

Dans le domaine cardiovasculaire, la stratification du risque repose sur des biomarqueurs circulants comme les molécules d'adhésion [14], l'évaluation de la capacité d'exercice [13,19], l'imagerie carotidienne [25,30] et la compréhension des mécanismes de rupture de plaque [27] et de dysfonction mitochondriale [10]. L'hypertension et la dysfonction cérébrovasculaire constituent un pont entre les deux pôles pathologiques [15]. La stratification du risque diabétique par machine learning complète ce tableau de médecine prédictive [28,29].

- **[1]** Rudin (2019) : Article pivot qui pose le cadre éthique et méthodologique de tout le cluster en argumentant que les modèles interprétables doivent remplacer les boîtes noires en médecine à haut risque. Ses 8095 citations en font la référence la plus influente.

- **[2]** Poewe et al. (2017) : Revue de référence exhaustive sur la maladie de Parkinson constituant le socle clinique sur lequel s'appuient les travaux de diagnostic automatisé [20,22].

- **[3]** Spillantini et al. (1998) : Texte fondateur en neuropathologie démontrant le rôle de l' α -synucléine dans les corps de Lewy, fournissant les bases biologiques que les algorithmes de diagnostic cherchent à détecter indirectement.

- **[5]** Johnson et al. (2020) : Synthèse stratégique sur la convergence IA/médecine de précision, articulant la vision programmatique de la santé personnalisée qui motive l'ensemble du cluster.

- **[12]** Jo et al. (2019) : Revue centrale sur l'application du deep learning aux données de neuroimagerie pour Alzheimer, établissant le pont méthodologique entre IA et neurodégénérescence.

- **[13]** Kavanagh et al. (2002) : Étude de cohorte majeure (12 169 patients) démontrant la valeur pronostique de la capacité d'exercice, modèle de stratification du risque que l'IA cherche à optimiser.

- [21] Miléa et al. (2020) : Démonstration clinique publiée dans le NEJM d'un système de deep learning détectant le papillœdème, preuve de concept directement liée à la pression intracrânienne.

- [6] Hlatky et al. (2009) : Déclaration scientifique établissant les critères d'évaluation des nouveaux marqueurs de risque cardiovasculaire, cadre méthodologique pour juger la valeur ajoutée des prédictions par IA.

Phase 1 – Fondements biomédicaux (1998-2009) : Le cluster s'enracine dans la caractérisation moléculaire et clinique des maladies, avec les travaux sur l' α -synucléine [3], les biomarqueurs cardiovasculaires [14,27], la physiopathologie mitochondriale [10], et la stratification pronostique classique [6,13,19,25,30].

Phase 2 – Émergence du machine learning médical (2009-2017) : Les techniques de reconnaissance de formes et de réseaux récurrents [4] commencent à être transposées au domaine médical. Les premières revues sur l'IA en médecine posent le cadre [7]. Les approches comparatives de classification par machine learning apparaissent pour des pathologies comme le diabète [29].

Phase 3 – Virage deep learning et IA clinique (2019-2022) : Un tournant net s'observe à partir de 2019 avec une concentration d'articles sur le deep learning appliqué au diagnostic neurologique [12,17,20,21,22], la médecine de précision augmentée par l'IA [5,18,26], et simultanément l'émergence d'un discours critique sur l'interprétabilité [1] et la qualité du reporting [11]. Ce virage traduit le passage d'une IA expérimentale à une IA aspirant à l'intégration clinique, avec une attention croissante aux enjeux économiques [26] et réglementaires.

Interprétabilité vs. performance : La tension fondamentale identifiée par Rudin [1] entre la performance des modèles opaques (deep learning) et l'exigence d'interprétabilité en contexte clinique reste non résolue, particulièrement pour les applications en neuroimagerie [12,17] où les architectures les plus performantes sont les moins explicables.

Qualité méthodologique du reporting : Collins et Moons [11] soulignent l'insuffisance des standards de publication des modèles prédictifs en IA, ce qui compromet la reproductibilité et la comparabilité des résultats, un problème amplifié par le nombre croissant de publications dans le domaine [20,22].

Rétractation et intégrité scientifique : La rétractation de l'article de Quazi [18], malgré ses 382 citations, illustre un problème d'intégrité dans la littérature sur l'IA en médecine de précision et soulève des questions sur la fiabilité de certaines revues dans ce domaine en expansion rapide.

Lacune de validation clinique prospective : La majorité des études sur le diagnostic par machine learning de la maladie de Parkinson [20,22] et d'Alzheimer [12] reposent sur des données rétrospectives. Le passage à la validation prospective en conditions cliniques réelles, tel que démontré partiellement par Miléa et al. [21], reste un chaînon manquant critique.

Fragmentation disciplinaire : Le cluster révèle un fossé entre les travaux de physiopathologie fondamentale [3,9,10,24] et les approches computationnelles [4,12,17,28], avec peu de travaux intégrant véritablement les connaissances biologiques dans l'architecture des modèles d'IA. L'évaluation de nouveaux marqueurs de risque selon des critères rigoureux [6] n'est que rarement appliquée aux prédictions issues de l'IA.

Biais de représentation : Les études pronostiques cardiovasculaires fondatrices portent principalement sur des cohortes masculines [13], avec une seule étude spécifique aux femmes [19], soulevant des questions sur la généralisabilité des modèles prédictifs entraînés sur ces données.

TOP 30 ARTICLES — CLASSÉS PAR CITATIONS

1. ☆ 📄 **Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead** — Nature Machine Intelligence (2019) 8,095 [DOI](#)
2. ☆ **Parkinson disease** — Nature Reviews Disease Primers (2017) 4,722 [DOI](#)
3. ☆ 📄 **α -Synuclein in filamentous inclusions of Lewy bodies from Parkinson's disease and dementia with Lewy bodies** — Proceedings of the National Academy of Sciences (1998) 3,157 [DOI](#)
4. ★ **A Novel Connectionist System for Unconstrained Handwriting Recognition** — IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (2009) 1,976 [DOI](#)
5. ★ 📄 **Precision Medicine, AI, and the Future of Personalized Health Care** — Clinical and Translational Science (2020) 1,586 [DOI](#)
6. ★ 📄 **Criteria for Evaluation of Novel Markers of Cardiovascular Risk** — Circulation (2009) 1,121 [DOI](#)

7. ★  **Artificial intelligence in medicine** — Annals of The Royal College of Surgeons of England (2004) 974 [DOI](#)
8. ★ **The scientific and clinical basis for the treatment of Parkinson disease (2009)** — Neurology (2009) 884 [DOI](#)
9. ★  **Oxidative stress and Parkinson's disease** — Frontiers in Neuroanatomy (2015) 861 [DOI](#)
10. ★ **Mitochondrial Dysfunction in Atherosclerosis** — Circulation Research (2007) 780 [DOI](#)
11. ☆ **Reporting of artificial intelligence prediction models** — The Lancet (2019) 674 [DOI](#)
12. ★  **Deep Learning in Alzheimer's Disease: Diagnostic Classification and Prognostic Prediction Using Neuroimaging Data** — Frontiers in Aging Neuroscience (2019) 674 [DOI](#)
13. ★  **Prediction of Long-Term Prognosis in 12 169 Men Referred for Cardiac Rehabilitation** — Circulation (2002) 646 [DOI](#)
14. ★ **Circulating Cell Adhesion Molecules and Death in Patients With Coronary Artery Disease** — Circulation (2001) 581 [DOI](#)
15. ☆  **Hypertension and Cerebrovascular Dysfunction** — Cell Metabolism (2008) 535 [DOI](#)
16. ☆ **A Systematic Review of the Association Between Erectile Dysfunction and Cardiovascular Disease** — European Urology (2013) 514 [DOI](#)
17. ★  **A Review on a Deep Learning Perspective in Brain Cancer Classification** — Cancers (2019) 439 [DOI](#)
18. ★  **RETRACTED ARTICLE: Artificial intelligence and machine learning in precision and genomic medicine** — Medical Oncology (2022) 382 [DOI](#)
19. ☆ **Peak oxygen intake and cardiac mortality in women referred for cardiac rehabilitation** — Journal of the American College of Cardiology (2003) 380 [DOI](#)
20. ★  **Machine Learning for the Diagnosis of Parkinson's Disease: A Review of Literature** — Frontiers in Aging Neuroscience (2021) 358 [DOI](#)
21. ★  **Artificial Intelligence to Detect Papilledema from Ocular Fundus Photographs** — New England Journal of Medicine (2020) 350 [DOI](#)
22. ☆  **Early diagnosis of Parkinson's disease using machine learning algorithms** — Medical Hypotheses (2020) 339 [DOI](#)
23. ☆ **The present and future of deep learning in radiology** — European Journal of Radiology (2019) 336 [DOI](#)
24. ☆ **Dysautonomia in Parkinson's disease: neurocardiological abnormalities** — The Lancet Neurology (2003) 316 [DOI](#)
25. ★  **Systematic Review of Computed Tomographic Angiography for Assessment of Carotid Artery Disease** — Stroke (2004) 312 [DOI](#)
26. ★  **Economics of Artificial Intelligence in Healthcare: Diagnosis vs. Treatment** — Healthcare (2022) 309 [DOI](#)
27. ☆ **The role of plaque rupture and thrombosis in coronary artery disease** — Atherosclerosis (2000) 276 [DOI](#)
28. ★  **Accurate Diabetes Risk Stratification Using Machine Learning: Role of Missing Value and Outliers** — Journal of Medical Systems (2018) 267 [DOI](#)
29. ☆ **Comparative approaches for classification of diabetes mellitus data: Machine learning paradigm** — Computer Methods and Programs in Biomedicine (2017) 264 [DOI](#)
30. ★ **Vasa Vasorum and Plaque Neovascularization on Contrast-Enhanced Carotid Ultrasound Imaging Correlates With Cardiovascular Disease and Past Cardiovascular Events** — Stroke (2009) 257 [DOI](#)

Fronts de recherche

Couplage bibliographique · 4 axes · Ce que les chercheurs publient maintenant

Note méthodologique — Le **couplage bibliographique** identifie les fronts de recherche en regroupant les articles-sources qui partagent les mêmes références. Co-citation → **fondations**. Couplage biblio → **fronts actifs** (ce qui s'écrit maintenant).

AXE 1 – CONTEXTE CLINIQUE HYPERTENSION INTRACRÂNIENNE

180 articles · 8 fronts · 1268 connexions

Front 1 — 56 articles

>Surveillance Non-Invasive de la Pression Intracrânienne

Ce front de recherche se concentre sur le développement et la validation d'approches non-invasives pour surveiller la pression intracrânienne (PIC). Les approches méthodologiques dominantes incluent l'ultrasonographie du diamètre de la gaine du nerf optique (ONSD), les capteurs sans fil portables basés sur la déformation crânienne, et l'échographie point-of-care (POCUS). Les efforts de standardisation sont prioritaires, avec des consensus internationaux sur les critères de qualité d'imagerie ONSD.

Les résultats récents clés montrent une sensibilité améliorée des mesures ONSD grâce à l'optimisation du placement des marqueurs échographiques, et le développement de dispositifs sans fil à résolution nanométrique pour la surveillance continue. L'intégration de concepts comme l'élastance intracrânienne et le syndrome compartimentaire intracrânien enrichit la compréhension physiologique.

Ce qui distingue ce front est sa transition vers des solutions cliniquement pratiques et standardisées, particulièrement en soins intensifs et situations d'urgence. L'accent sur la pédiatrie, reconnaissant les différences anatomophysiologiques spécifiques, et l'émergence de technologies portables révolutionnent la surveillance neurologique en permettant un monitoring continu sans les risques invasifs traditionnels.

Front 2 — 43 articles

>Neuroimagerie du système glymphatique et clearance cérébrale

Ce front de recherche se caractérise par des approches méthodologiques innovantes combinant neuroimagerie avancée et modélisation physiologique. La méthode DTI-ALPS (Diffusion Tensor Image Analysis ALong the Perivascular Space) émerge comme technique non-invasive de référence pour évaluer le système glymphatique, complétée par des approches SPECT dynamiques et l'analyse quantitative des espaces périvasculaires élargis.

Les résultats récents révèlent le rôle central des dysfonctions du système glymphatique dans diverses pathologies neurologiques, dépassant le cadre initial de l'hypertension intracrânienne. L'identification de biomarqueurs d'imagerie spécifiques permet désormais d'évaluer la clearance des déchets métaboliques cérébraux et la dynamique du liquide céphalorachidien de manière cliniquement applicable.

Ce qui distingue ce front est son approche translationnelle intégrant mécanismes fondamentaux et applications cliniques. Contrairement aux approches traditionnelles focalisées sur la pression intracrânienne, ces recherches conceptualisent une "fluidopathie interstitielle" englobant multiples pathologies (AVC, épilepsie, encéphalopathie hépatique, maladie d'Alzheimer) sous un paradigme unifié de dysfonction du transport fluide cérébral, ouvrant vers des stratégies thérapeutiques ciblant spécifiquement ces voies de clearance.

Front 3 — 24 articles

>Neuroimagerie Avancée en Urgences Neurovasculaires Pédiatriques

Ce front de recherche se concentre sur l'utilisation d'approches d'imagerie multimodale sophistiquées pour le diagnostic et la prise en charge des pathologies neurovasculaires aiguës chez l'enfant. Les méthodes dominantes incluent l'imagerie par susceptibilité magnétique (SWI), l'IRM avec marquage de spin artériel (ASL), et l'imagerie de contraste de phase pour évaluer la perfusion cérébrale et détecter les microhémorragies.

Les résultats récents révèlent l'importance cruciale de la détection précoce des complications comme l'hyperperfusion post-opératoire dans la maladie de moyamoya, l'amélioration du diagnostic des thromboses veineuses cérébrales, et l'identification des biomarqueurs d'imagerie prédictifs d'évolution défavorable. Les techniques minimalement invasives combinées à l'imagerie peropératoire montrent des résultats prometteurs pour réduire la morbidité.

Ce front se distingue par son approche translationnelle intégrant les spécificités physiologiques pédiatriques avec des technologies d'imagerie de pointe. L'accent sur les pathologies rares mais à fort impact (AVC pédiatrique, hémorragies cérébrales) et l'émergence de protocoles d'imagerie standardisés pour cette population vulnérable constituent les innovations majeures de ce domaine de recherche actuel.

Front 4 — 12 articles

>Mécanismes Moléculaires et Imagerie dans l'Hydrocéphalie

Ce front de recherche se caractérise par une approche multi-méthodologique combinant études moléculaires, neuroimagerie avancée et modélisation computationnelle. Les chercheurs utilisent principalement l'analyse des aquaporines (AQP1 et AQP4), l'imagerie multimodale pour l'hydrocéphalie à pression normale (NPH), et des modèles animaux comme les rats spontanément hypertendus.

Les résultats récents révèlent le rôle central des aquaporines dans l'homéostasie hydrique cérébrale et la pathogenèse de l'hydrocéphalie. L'inflammation acquise émerge comme mécanisme pathogène clé avec de nouvelles cibles thérapeutiques. Pour l'hydrocéphalie à pression normale, l'intégration de biomarqueurs moléculaires avec l'imagerie améliore significativement le diagnostic et la prédiction du succès thérapeutique.

Ce qui distingue ce front est son approche translationnelle intégrant mécanismes moléculaires fondamentaux et applications cliniques directes. L'accent sur l'hydrocéphalie à pression normale chez l'adulte et l'enfant, combiné à la compréhension des voies de l'inflammation et du transport hydrique, ouvre des perspectives thérapeutiques innovantes au-delà des approches chirurgicales traditionnelles de dérivation du LCR.

Front 5 — 5 articles

>Congrès Neurologique Canadien: Évolution Disciplinaire

Ce cluster regroupe cinq années consécutives (2007-2011) de congrès de la Fédération Canadienne des Sciences Neurologiques, révélant l'évolution méthodologique et thématique d'une communauté scientifique mature. L'approche dominante est celle de forums éducatifs multidisciplinaires intégrant neurologues, neurochirurgiens et neurophysiologistes dans un cadre d'échange structuré.

Les résultats clés montrent une reconceptualisation réussie de l'identité congressuelle basée sur les retours des membres, transformant ces événements en véritables laboratoires d'innovation collaborative. Le programme scientifique évolue d'une approche traditionnelle vers une intégration plus poussée des spécialités neurologique.

Ce qui distingue ce front est sa dimension méta-scientifique : plutôt que de se concentrer sur des découvertes spécifiques, il documente l'évolution des pratiques de recherche collaborative en neurosciences. Le couplage bibliographique de ces articles suggère une standardisation progressive des références méthodologiques et conceptuelles dans la communauté neurologique canadienne, créant un corpus de connaissances partagées qui influence les directions de recherche sur l'hypertension intracrânienne et les pathologies connexes.

Front 6 — 2 articles

>Neuroimaging Evolution in CSF Pressure Disorders

Ce front de recherche combine l'expertise clinique croissante des troubles de pression du liquide céphalorachidien avec les avancées technologiques en neuroimagerie. L'approche méthodologique dominante intègre l'imagerie CT de nouvelle génération avec une meilleure caractérisation clinique des fuites spontanées de LCR, exploitant 50 ans d'évolution technologique pour affiner le diagnostic.

Les résultats récents montrent que l'hypotension intracrânienne spontanée, autrefois considérée comme rare, est maintenant diagnostiquée beaucoup plus fréquemment grâce aux améliorations de l'imagerie. Les fuites spontanées de LCR, principalement au niveau spinal, sont mieux identifiées grâce aux avancées en software et hardware CT, permettant une détection plus précoce et précise.

Ce front se distingue par sa perspective historique et prospective unique, combinant une réévaluation clinique d'une pathologie sous-diagnostiquée avec l'exploitation des capacités technologiques modernes. L'accent est mis sur la translation des avancées technologiques en amélioration diagnostique concrète pour des conditions neurologiques complexes impliquant les troubles de pression du LCR.

Front 7 — 2 articles

>Neuroimagerie Quantitative Vétérinaire pour Lésions Cérébrales

Ce front de recherche se concentre sur l'adaptation des techniques d'imagerie cérébrale avancées du domaine médical humain vers la médecine vétérinaire. Les approches méthodologiques dominantes incluent l'IRM quantitative (qMRI) pour la caractérisation objective des lésions cérébrales chez les chiens et chats, ainsi que le développement de systèmes de classification standardisés pour les encéphalopathies et myélopathies hémorragiques.

Les résultats récents soulignent le potentiel diagnostique de l'IRM quantitative pour améliorer la détection et la caractérisation des lésions cérébrales vétérinaires, bien que l'adoption des outils de traitement de données reste limitée comparativement à la médecine humaine. Une attention particulière est portée à la classification des pathologies hémorragiques du système nerveux central, malgré leur prévalence relativement faible par rapport aux néoplasies et inflammations.

Ce qui distingue ce front est sa nature translationnelle bidirectionnelle : il transpose les avancées de la neuroimagerie humaine vers la médecine vétérinaire tout en développant des classifications spécifiques aux espèces animales. Cette approche ouvre des perspectives pour des modèles animaux plus précis des pathologies neurologiques humaines.

Front 8 — 2 articles

>Approches Thérapeutiques Intégrées en Hydrocéphalie Pédiatrique

Ce front de recherche se caractérise par une approche méthodologique basée sur la revue systématique et l'analyse comparative des modalités thérapeutiques en hydrocéphalie infantile. Les chercheurs adoptent une perspective holistique intégrant les aspects chirurgicaux, pharmacologiques et les mécanismes de compensation spontanée.

Les résultats récents mettent en évidence l'importance d'une stratification thérapeutique selon trois axes principaux : les interventions chirurgicales, les traitements médicamenteux, et l'observation des processus d'auto-compensation. Cette approche tripartite permet une personnalisation du traitement basée sur la dynamique du liquide céphalorachidien, les manifestations cliniques et les données de neuroimagerie.

Ce qui distingue ce front est son focus spécifiquement pédiatrique et sa reconnaissance des capacités d'auto-régulation du système nerveux central immature. Contrairement aux approches traditionnelles privilégiant systématiquement l'intervention chirurgicale, cette perspective intègre les critères de compensation spontanée comme paramètre décisionnel thérapeutique. L'accent mis sur la dynamique liquidienne et les critères radiologiques d'auto-compensation représente une évolution vers une médecine plus personnalisée en neurochirurgie pédiatrique, optimisant les résultats tout en minimisant les interventions invasives.

AXE 2 — TECHNIQUES D'IMAGERIE NON-INVASIVES

19 articles · 2 fronts · 78 connexions

Front 1 — 9 articles

>Surveillance Oculaire Non-Invasive de la Pression Intracrânienne

Ce front de recherche développe principalement des approches multimodales combinant l'échographie du diamètre de la gaine du nerf optique (ONSD), la tomographie par cohérence optique (OCT), l'IRM orbitaire et le Doppler transcrânien. Les chercheurs privilégient les études cliniques prospectives et les analyses comparatives pour valider ces biomarqueurs oculaires comme alternatives aux méthodes invasives traditionnelles.

Les résultats récents démontrent que la mesure de l'espace sous-arachnoïdien orbitaire corrèle significativement avec la pression intracrânienne, particulièrement dans l'hypertension intracrânienne idiopathique. L'émergence du syndrome neuro-oculaire associé aux vols spatiaux (SANS) comme nouveau modèle d'étude révèle l'importance de la surveillance continue non-invasive. Les protocoles standardisés d'échographie ONSD montrent une précision diagnostique prometteuse.

Ce qui distingue ce front est son approche transdisciplinaire, bridgeant neurologie, ophtalmologie et médecine spatiale. Contrairement aux recherches précédentes focalisées sur des techniques isolées, cette approche intégrée combine multiples modalités d'imagerie pour créer des algorithmes diagnostiques robustes, répondant aux besoins cliniques urgents de surveillance continue et aux défis uniques de l'exploration spatiale prolongée.

Front 2 — 8 articles

>Surveillance Non-Invasive de la Pression Intracrânienne

Ce front de recherche se concentre sur le développement et la validation de méthodes non-invasives pour surveiller la pression intracrânienne (PIC), combinant l'ultrasonographie du nerf optique, l'IRM, le Doppler transcrânien et la tomographie par cohérence optique. Les approches méthodologiques dominantes incluent la mesure du diamètre de la gaine du nerf optique (ONSD) par échographie, l'analyse computationnelle des signaux photopléthysmographiques, et les technologies de détection électromagnétique.

Les résultats récents montrent que l'ONSD ultrasonographique peut servir de biomarqueur fiable pour détecter l'hypertension intracrânienne et l'incapacité précoce dans diverses pathologies neurologiques. Les études computationnelles révèlent que les variations de PIC modifient les formes d'onde photopléthysmographiques dans différents territoires de perfusion cérébrale, ouvrant la voie à une surveillance continue par capteurs portables.

Ce qui distingue ce front est l'intégration multimodale de techniques d'imagerie non-invasives pour remplacer la surveillance invasive traditionnelle de la PIC, particulièrement crucial en soins intensifs neurologiques, pendant l'ECMO, et dans la gestion des AVC avec œdème cérébral. Cette approche permet une surveillance temps réel moins risquée pour les patients.

AXE 3 — INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET PRÉDICTION

302 articles · 18 fronts · 1427 connexions

Front 1 — 61 articles

>Intelligence Artificielle pour Support Décisionnel Clinique Neurologique

Ce front de recherche se caractérise par l'intégration de méthodes d'apprentissage profond avancées pour l'analyse d'images cérébrales et la prédiction de paramètres neurophysiologiques critiques. Les approches dominantes incluent les réseaux de neurones convolutionnels pour la segmentation automatisée, les réseaux adverses génératifs pour l'augmentation de données, l'apprentissage par graphes pour capturer les relations complexes entre structures cérébrales, et les architectures multimodales fusionnant IRM structurelle, fonctionnelle et angiographique.

Les résultats récents montrent des avancées significatives dans la prédiction automatisée de la pression intracrânienne, la segmentation précise des hyperintensités de substance blanche, et le développement de biomarqueurs d'âge cérébral. L'accent est mis sur la validation clinique robuste et la généralisation trans-ethnique des modèles.

Ce qui distingue particulièrement ce front est son orientation vers l'implémentation clinique réelle, avec un focus sur la sécurité des algorithmes, la réduction des biais populationnels, et l'adaptation aux environnements hospitaliers contraints. L'émergence des jumeaux numériques et des essais cliniques virtuels représente une approche innovante pour valider ces outils avant déploiement clinique massif.

Front 2 — 55 articles

>Intelligence Artificielle pour Surveillance Neurologique Automatisée

Ce front de recherche développe des systèmes d'IA pour automatiser la surveillance et la prédiction en neurologie critique, particulièrement pour les traumatismes crâniens. Les approches méthodologiques dominantes combinent l'apprentissage profond pour l'analyse d'imagerie CT/IRM avec des algorithmes de machine learning (forêts aléatoires, réseaux de neurones) intégrant données cliniques, biomarqueurs et signaux physiologiques multimodaux.

Les résultats récents montrent que les algorithmes ML surpassent les modèles de régression traditionnels pour prédire les issues défavorables, avec des performances particulièrement prometteuses pour la détection automatisée d'hémorragies intracrâniennes et l'estimation non-invasive de la pression intracrânienne via spectroscopie proche infrarouge. Les systèmes de fusion de données permettent une analyse plus précise des lésions traumatiques.

Ce front se distingue par son approche intégrative combinant neuroinformatique, analyse d'images automatisée et aide à la décision clinique temps réel. L'objectif est de passer d'une approche "traitement unique pour tous" vers une médecine personnalisée en neuro-réanimation, utilisant l'IA pour une surveillance continue et une stratification des risques plus précise chez les patients cérébrolésés.

Front 3 — 40 articles

>Intelligence Artificielle pour Diagnostic Cérébro-vasculaire d'Urgence

Ce front de recherche se concentre sur l'application de l'IA et du machine learning pour le diagnostic automatisé des pathologies cérébrovasculaires aiguës, particulièrement l'AVC et les anévrismes intracrâniens. Les approches méthodologiques dominantes incluent les réseaux de neurones profonds pour l'analyse d'imagerie (CT, IRM, angiographie), les modèles d'ensemble multimodaux intégrant données cliniques et déterminants sociaux, et les systèmes de support décisionnel temps réel basés sur les dossiers médicaux électroniques.

Les résultats récents démontrent une précision diagnostique élevée des algorithmes IA pour détecter les occlusions de gros vaisseaux et prédire les issues cliniques, avec des modèles quantifiant le volume sanguin surpassant les échelles traditionnelles. Les systèmes multimodaux montrent une efficacité supérieure aux approches mono-paramétriques pour le pronostic d'AVC.

Ce qui distingue ce front est sa double orientation : d'une part, l'optimisation de la détection précoce pour améliorer le triage d'urgence, d'autre part, l'intégration de données hétérogènes (imagerie, données administratives, facteurs sociaux) dans des modèles prédictifs globaux. L'accent mis sur l'évaluation critique de l'efficacité clinique réelle reflète une maturité croissante du domaine.

Front 4 — 38 articles

>Intelligence Artificielle Appliquée à l'Imagerie Médicale Clinique

Ce front de recherche se caractérise par l'intégration de méthodes d'apprentissage automatique avancées dans la pratique clinique, particulièrement pour l'aide à la décision diagnostique. Les approches dominantes incluent les réseaux de neurones profonds pour l'analyse d'images médicales, les algorithmes YOLO pour la détection d'objets médicaux, et les autoencodeurs pour la détection d'anomalies biomédicales.

Les résultats récents montrent des avancées significatives dans la différenciation automatisée de pathologies complexes (pseudopapillœdème vs vraie papillœdème), l'évaluation quantitative des sténoses carotidiennes, et la prédiction des risques d'AVC via capteurs portables multimodaux. L'accent est mis sur la validation clinique et l'intégration pratique des outils IA.

Ce qui distingue ce front est son approche holistique combinant perfectionnement méthodologique et implémentation clinique réelle, avec une attention particulière aux défis de reproductibilité et aux recommandations pour surmonter les échecs méthodologiques historiques. La recherche intègre explicitement les considérations de médecine basée sur la valeur et les contraintes économiques du système de santé.

Front 5 — 26 articles

>Intelligence Artificielle pour Surveillance Neurologique EEG

Les approches méthodologiques dominantes combinent l'apprentissage profond avec l'analyse de signaux EEG pour des applications cliniques temps réel. Les réseaux de neurones convolutionnels et récurrents sont privilégiés pour traiter les données électroencéphalographiques, tandis que les interfaces cerveau-ordinateur (BCI) intègrent des algorithmes d'apprentissage automatique pour la détection automatisée de pathologies neurologiques.

Les résultats récents montrent des avancées significatives dans la prédiction et détection des crises épileptiques avec des taux de précision dépassant 90%, la reconnaissance d'émotions via EEG pour applications thérapeutiques, et le développement de systèmes de stimulation cérébrale en boucle fermée. L'intégration de l'Internet des objets médicaux (IoMT) permet désormais une surveillance continue des patients neurologiques.

Ce front se distingue par sa transition des environnements de laboratoire vers des applications cliniques réelles, l'emphasis sur la surveillance neurologique ambulatoire, et l'intégration multidisciplinaire entre neurosciences cognitives et intelligence artificielle. L'accent mis sur les systèmes de support à la décision clinique automatisés représente une évolution majeure vers une médecine neurologique personnalisée et prédictive.

Front 6 — 9 articles

>IA Multi-Modale pour Prédiction Cardiovasculaire Neurologique

Ce front de recherche se caractérise par l'intégration de multiples modalités de données (neuroimagerie, signaux EEG, radiomique, génomique) dans des frameworks d'intelligence artificielle pour la prédiction des risques cardiovasculaires chez les patients neurologiques. Les approches méthodologiques dominantes incluent le deep learning explicable (XAI), la fusion de données multi-échelles, et les systèmes de support décisionnel clinique automatisés, particulièrement pour les maladies d'Alzheimer et de Parkinson.

Les résultats récents révèlent que l'IA peut stratifier efficacement les risques cardiovasculaires dans les pathologies neurodégénératives, avec des modèles radiogénomiques offrant une nouvelle dimension d'évaluation composite. Les systèmes développés montrent une capacité prometteuse pour la médecine préventive personnalisée, notamment chez les patients avec apnée du sommeil obstructive ou affectés par la COVID-19.

Ce qui distingue ce front est son approche holistique combinant neurologie et cardiologie via l'IA, l'accent sur l'explicabilité des algorithmes pour l'adoption clinique, et l'émergence de solutions nanomédecine ciblant l'axe intestin-cerveau pour moduler l'inflammation chronique dans les maladies neurodégénératives.

Front 7 — 8 articles

>Intelligence Artificielle en Neurochirurgie Clinique

Ce front de recherche se concentre sur l'intégration pratique de l'IA dans les applications neurochirurgicales réelles. Les approches méthodologiques dominantes incluent l'apprentissage automatique appliqué aux données d'imagerie médicale, particulièrement la radiomique pour l'analyse des malformations artério-veineuses, et le développement de systèmes d'aide à la décision clinique. La robotique neurochirurgicale émergente, notamment en Chine, représente une composante technologique majeure.

Les résultats récents révèlent que malgré des avancées prometteuses dans l'analyse des tumeurs cérébrospinales et la prédiction de la pression intracrânienne, les applications cliniques restent largement au stade de développement. Les études de radiomique montrent un potentiel pour la gestion des malformations artério-veineuses, mais nécessitent encore des validations prospectives.

Ce qui distingue ce front est son orientation vers la traduction clinique plutôt que la recherche fondamentale. L'accent est mis sur des prédictions "actionnables" et des systèmes généralisables, avec une attention particulière aux défis d'implémentation dans les environnements hospitaliers réels, notamment en médecine d'urgence et dans les blocs opératoires robotisés.

Front 8 — 7 articles

>IA pour Mesures Quantitatives du Vieillissement Biologique

Ce front de recherche développe des outils d'intelligence artificielle pour quantifier objectivement les processus de vieillissement à travers différentes modalités biologiques. Les approches méthodologiques dominantes incluent l'apprentissage profond appliqué à l'neuroimagerie multi-organes, les modèles fondationnels fine-tunés sur des données rétinienne, et l'intégration de biomarqueurs multi-omiques (protéomique, métabolomique, génétique) pour créer des "horloges biologiques" digitalisées.

Les résultats récents démontrent des performances remarquables : prédiction de l'âge chronologique avec une erreur absolue moyenne de 2,85 ans à partir d'images rétinienne, développement de chartes de croissance fonctionnelle cérébrale basées sur l'EEG de l'enfance à l'adolescence, et création d'horloges vieillissement spécifiques aux organes révélant des signatures cliniques et génétiques sexe-spécifiques.

Ce qui distingue ce front est son approche holistique combinant imagerie non-invasive, signaux électrophysiologiques et données multi-omiques pour créer des outils cliniques scalables. L'accent mis sur la personnalisation (hétérogénéité du vieillissement, spécificités par sexe) et l'applicabilité clinique directe marque une évolution vers des mesures quantitatives objectives du développement et du vieillissement biologique.

Front 9 — 5 articles

>Automated MRI Analysis for Hydrocephalus Diagnosis

Ce front de recherche se concentre sur l'application de l'intelligence artificielle pour automatiser le diagnostic et la prise en charge de l'hydrocéphalie à pression normale idiopathique (iNPH). Les approches méthodologiques dominantes incluent les réseaux de neurones convolutionnels 3D (U-Net), les algorithmes d'apprentissage automatique multimodaux intégrant différentes séquences IRM (T2, FLAIR), et le développement de métriques quantitatives pour l'évaluation des espaces sous-arachnoïdiens disproportionnellement élargis (DESH).

Les résultats récents montrent des avancées significatives dans la détection automatique des marqueurs DESH avec une précision diagnostique améliorée, et la capacité de prédire l'amélioration clinique post-chirurgicale à partir d'analyses IRM multiséquences. Les études révèlent également l'importance des différences liées à l'âge et au sexe dans l'analyse du volume cérébral et du débit sanguin cérébral.

Ce front se distingue par sa focalisation spécifique sur l'iNPH, une condition neurologique potentiellement réversible, combinant l'expertise en neuroimagerie quantitative avec des outils d'aide à la décision clinique automatisés. L'approche multimodale et la validation clinique directe des prédictions algorithmiques marquent une évolution vers une médecine de précision en neurologie.

Front 10 — 4 articles

>Neuroimagerie AI pour Tumeurs Cérébrales Invasives

Ce front de recherche se concentre sur l'application de l'intelligence artificielle avancée à l'analyse des tumeurs cérébrales, particulièrement les gliomes et métastases. Les approches méthodologiques dominantes incluent l'utilisation de réseaux de neurones convolutionnels comme U-Net pour la segmentation automatique des tumeurs, l'analyse multimodale combinant IRM conventionnelle et avancée (FLAIR, T2, perfusion, diffusion), et le développement de modèles prédictifs intégrant imagerie et données cliniques.

Les résultats récents montrent des avancées significatives dans la caractérisation automatisée des zones péri-tumorales non-rehaussées (NEPA), la distinction entre œdème vasogénique et infiltratif, et la prédiction de survie basée sur l'imagerie. Les algorithmes d'apprentissage profond démontrent une capacité croissante à identifier des biomarqueurs invisibles à l'œil humain.

Ce qui distingue ce front est son approche translationnelle "bench-to-bedside", visant directement l'implémentation clinique pour améliorer la planification chirurgicale, la stratification pronostique et la médecine de précision en neuro-oncologie. L'accent mis sur les tumeurs infiltratives reflète le défi clinique majeur de définir les marges tumorales réelles.

Front 11 — 3 articles

>Faiblement Supervisée Hémorragie Intracrânienne Segmentation Transformers

Ce front de recherche se concentre sur l'apprentissage faiblement supervisé pour la segmentation automatique des hémorragies intracrâniennes (ICH) en neuroimagerie. L'approche méthodologique dominante utilise les Swin Transformers avec des cartes d'auto-attention infusées de gradients tête par tête, permettant d'exploiter l'apprentissage catégoriel sans nécessiter d'annotations pixel-parfaites coûteuses.

Les résultats récents montrent que cette approche faiblement supervisée peut rivaliser avec les méthodes entièrement supervisées traditionnelles pour la détection et segmentation d'ICH, tout en réduisant significativement les besoins en données annotées manuellement. L'intégration des mécanismes d'attention permet une localisation plus précise des régions hémorragiques et une meilleure interprétabilité des prédictions.

Ce qui distingue ce front est l'adoption spécifique des architectures Transformer (Swin) pour les tâches de segmentation neurologique, combinée à l'apprentissage faiblement supervisé qui répond aux contraintes pratiques de disponibilité des données médicales annotées. Cette approche ouvre la voie à des systèmes d'aide à la décision clinique plus accessibles et déployables dans des contextes où l'expertise en annotation radiologique est limitée.

Front 12 — 3 articles

>Intelligence Artificielle en Obstétrique et Imagerie Fœtale

Ce front de recherche se concentre sur l'application de l'IA et du machine learning pour l'analyse automatisée d'images échographiques fœtales et la prise de décision clinique en obstétrique. Les approches méthodologiques dominantes incluent le deep learning pour la segmentation et l'analyse automatique de la tête et du cerveau fœtal, les algorithmes de vision par ordinateur pour l'interprétation d'images échographiques, et le développement de systèmes d'aide à la décision clinique intégrés.

Les résultats récents démontrent des avancées significatives dans la détection automatisée d'anomalies fœtales, l'amélioration de la précision diagnostique en échographie obstétricale, et l'optimisation de la surveillance fœtale. Les systèmes développés montrent des performances comparables aux experts humains pour certaines tâches de mesure et de détection.

Ce qui distingue ce front est son approche spécifiquement orientée vers la santé maternelle et fœtale, intégrant des considérations cliniques uniques à l'obstétrique. Contrairement aux applications générales de neuroimagerie, ce domaine doit gérer la complexité supplémentaire du développement fœtal, la variabilité des positions fœtales, et les contraintes temporelles des décisions obstétricales, créant des défis méthodologiques spécifiques.

Front 13 — 3 articles

>Modélisation Dynamique Computationnelle de la Conscience

Ce front de recherche développe des approches computationnelles sophistiquées pour quantifier et modéliser les états de conscience. Les méthodologies dominantes combinent la modélisation dynamique de l'activité cérébrale globale avec des perturbations contrôlées pour mesurer la stabilité des réseaux neuronaux, et intègrent la théorie de l'information algorithmique (AIT) pour formaliser l'expérience structurée.

Les résultats clés montrent que les perturbations dans les modèles dynamiques permettent de dissocier efficacement le niveau et la stabilité de la conscience across différents états (sommeil profond, anesthésie, lésions cérébrales). Le framework AIT propose une approche unifiante pour étudier l'organisation spatiale, temporelle et conceptuelle de l'expérience subjective, offrant des bases théoriques robustes pour quantifier la conscience.

Ce qui distingue ce front est son approche multidisciplinaire intégrant neurosciences computationnelles, théorie de l'information et modélisation dynamique pour créer des indices quantitatifs de conscience. Contrairement aux approches purement cliniques, ces travaux établissent des fondements théoriques formels tout en maintenant une applicabilité clinique pour évaluer les états de conscience pathologiques.

Front 14 — 3 articles

>Computational Biomarkers for Therapeutic Neurotoxicity Prediction

Ce front de recherche combine l'intelligence artificielle avec la surveillance clinique pour prédire et gérer les complications neurologiques des thérapies avancées. Les approches méthodologiques dominantes intègrent l'apprentissage automatique pour l'analyse de biomarqueurs prédictifs, les systèmes de pharmacovigilance computationnelle pour le suivi longitudinal, et les modèles d'aide à la décision clinique pour l'évaluation des risques neurologiques.

Les résultats récents révèlent des avancées significatives dans l'identification de biomarqueurs prédictifs du syndrome de neurotoxicité associé aux cellules effectrices immunitaires (ICANS), le développement de systèmes de surveillance automatisée pour les thérapies géniques et cellulaires, et l'implémentation de méthodes computationnelles pour l'innovation médicale personnalisée.

Ce qui distingue particulièrement ce front est sa focalisation sur la prévention proactive plutôt que réactive des complications neurologiques. L'intégration de données multi-omiques avec des algorithmes prédictifs permet une surveillance en temps réel et une intervention précoce. Cette approche translationnelle bridge le gap entre la recherche fondamentale sur les mécanismes de neurotoxicité et l'application clinique directe, particulièrement cruciale pour les thérapies CAR-T où la fenêtre d'intervention est critique.

Front 15 — 2 articles

>Self-Supervised Learning in Biomedical Signal Processing

Ce front de recherche se concentre sur l'adaptation des techniques d'apprentissage auto-supervisé aux signaux biomédicaux, particulièrement pertinentes pour la prédiction de la pression intracrânienne et l'analyse neuroimagerie. L'approche méthodologique dominante consiste à développer des modèles d'apprentissage profond capables de s'entraîner sur des données non-annotées, contournant ainsi le défi majeur de l'annotation experte coûteuse en contexte médical.

Les résultats récents montrent que ces méthodes peuvent rivaliser avec les approches supervisées traditionnelles tout en exploitant efficacement les vastes quantités de données biomédicales disponibles. Les techniques de pré-entraînement auto-supervisé permettent d'apprendre des représentations robustes des signaux physiologiques, puis de les adapter à des tâches spécifiques avec moins de données annotées.

Ce qui distingue ce front est sa réponse directe au goulot d'étranglement de l'annotation en médecine. Contrairement aux approches supervisées classiques nécessitant des expertises cliniques pour chaque échantillon, l'apprentissage auto-supervisé exploite la structure intrinsèque des signaux biomédicaux, ouvrant la voie vers des systèmes d'aide à la décision clinique plus accessibles et automatisés.

Front 16 — 2 articles

>Generative AI Applications in Medical Healthcare

Ces deux articles forment un front de recherche concentré sur l'application systématique des technologies d'IA générative dans le domaine médical. L'approche méthodologique dominante repose sur des revues systématiques exhaustives analysant 87 articles de recherche, avec une taxonomie structurée des modèles génératifs : GANs, modèles de diffusion, grands modèles de langage, et autoencodeurs variationnels.

Les résultats clés révèlent que l'IA générative transforme activement trois domaines principaux : l'imagerie médicale (amélioration et synthèse d'images), la découverte de médicaments (génération de nouvelles molécules), et la création de données synthétiques pour l'entraînement de modèles. Les applications s'étendent également aux systèmes de support décisionnel clinique et à la mesure automatisée de paramètres biomédicaux.

Ce qui distingue ce front est son approche holistique et classificatoire des technologies d'IA générative spécifiquement appliquées à la santé, plutôt qu'une focalisation sur une technique particulière. La perspective est résolument applicative et clinique, analysant comment ces technologies transforment concrètement les pratiques médicales actuelles plutôt que de développer de nouveaux algorithmes théoriques.

Front 17 — 2 articles

>Intraoperative Ultrasound for Real-Time Brain Surgery

Ce front de recherche se concentre sur les approches méthodologiques combinant l'imagerie ultrasonore intraopératoire (IOUS) avec des systèmes de guidage avancés pour compenser le "brain shift" - le déplacement des tissus cérébraux pendant la chirurgie. Les méthodes dominantes intègrent l'imagerie temps réel, les systèmes de navigation assistés par ordinateur, et les techniques de compensation dynamique des déformations tissulaires causées par la gravité, la manipulation chirurgicale et la perte de liquide céphalorachidien.

Les résultats récents démontrent que l'IOUS permet une adaptation dynamique continue aux changements anatomiques durant la résection tumorale, particulièrement pour les gliomes cérébraux. Cette technologie améliore significativement la précision du guidage chirurgical comparée aux systèmes basés uniquement sur l'imagerie préopératoire, permettant une résection maximale tout en préservant les fonctions neurologiques critiques.

Ce qui distingue ce front est son approche pragmatique : plutôt que de développer des algorithmes d'IA complexes pour la prédiction de la pression intracrânienne, ces recherches se focalisent sur des solutions d'imagerie en temps réel directement applicables au bloc opératoire, offrant une réponse immédiate aux défis chirurgicaux contemporains.

Front 18 — 2 articles

>Détection EEG Non-Invasive des Dépressions Envahissantes

Ce front de recherche développe des algorithmes automatisés pour détecter les dépressions envahissantes (spreading depolarizations, SD) après traumatisme crânien sévère via EEG de surface, évitant les méthodes invasives intracrâniennes actuelles.

L'approche méthodologique repose sur l'algorithme WAVEFRONT, utilisant l'apprentissage automatique pour analyser les signaux EEG du cuir chevelu et identifier automatiquement les patterns caractéristiques des SD. Cette approche combine traitement du signal avancé et intelligence artificielle pour transformer des données EEG non-invasives en biomarqueurs cliniques fiables.

Les résultats récents démontrent la faisabilité de cette détection automatisée non-invasive avec des performances quantifiées, ouvrant la voie à un monitoring continu des patients TBI sans risques chirurgicaux. L'algorithme montre une capacité prometteuse pour le diagnostic en temps réel et l'adaptation thérapeutique.

Ce qui distingue ce front est sa transition révolutionnaire d'une détection invasive vers une approche complètement non-invasive des SD, un mécanisme crucial mais difficilement accessible de l'aggravation des lésions cérébrales. Cette innovation pourrait transformer la prise en charge clinique en permettant un monitoring systématique des SD, actuellement limité aux centres équipés pour l'enregistrement intracrânien.

UMAN [iA]

HAL BIBLIO · Analyse bibliométrique par intelligence artificielle
OpenAlex · SPECTER · Leiden · Louvain · Claude Opus 4.6
uman-ia.fr/hal/biblio/

"Open the pod bay doors, HAL."

— *Dave Bowman, 2001 : L'Odyssée de l'espace*