



Évaluation de la Stimulation magnétique transcrânienne (TMS) dans le traitement de l'épilepsie : efficacité, sécurité et perspectives cliniques

Labante Outcha Dare

Francis Le Roy

Direction Qualité Évaluation Performance et Éthique (DQEPE) — Février 2025

Informations générales

Mission de l'UETMIS

L'Unité d'évaluation des technologies et des modes d'intervention en santé (UETMIS) du Centre hospitalier universitaire Sainte-Justine (CHUSJ) a pour mission de soutenir les gestionnaires, médecins et professionnels de la santé dans leurs prises de décision. Elle utilise une approche d'évaluation claire, transparente et rigoureuse, basée sur des données probantes (preuves scientifiques, expérientielles et contextuelles).

Renseignements

Pour tout renseignement, s'adresser à :

Unité d'évaluation des technologies et des modes d'intervention en santé (UETMIS) — CHUSJ

Direction de la qualité, évaluation, performance et éthique, Bureau 403
5757, rue Decelles
Montréal (Québec)

Site Internet : [https://www.chusj.org/fr/Professionnels-de-la-sante/Evaluation-des-technologies-\(UETMIS\)](https://www.chusj.org/fr/Professionnels-de-la-sante/Evaluation-des-technologies-(UETMIS))

Comité exécutif de l'UETMIS

Marc Girard : Directeur Services Professionnels CHUSJ, MD

Philippe Jovet : Professeur titulaire, Intensiviste pédiatrique, Responsable médical UETMIS, Ph. D., MD

Demandeur

Aristides Hadjinicolaou : Neurologue, MD, FRCPC

Financier

Ce projet a été financé par le budget de fonctionnement de l'UETMIS du CHUSJ.

Comité de pilotage

Andrée-Anne Simard-Meilleur : Neuropsychologue, Ph. D.
andree-anne.simard-meilleur.hsj@ssss.gouv.qc.ca

Aristides Hadjinicolaou : Neurologue, MD, F.R.C.P.C.
aris.hadjinicolaou.med@ssss.gouv.qc.ca

Alexander Weil : Neurochirurgien, MD, FRCSC, FACS
alexander.weil.hsj@ssss.gouv.qc.ca

Dominic Venne : Neurochirurgien, Chef Service Neurochirurgie, MD
dominic.venne.med@ssss.gouv.qc.ca

Elsa Rossignol : Neuropédiatre, MD, M.Sc., F.R.C.P.

elsa.rossignol.med@ssss.gouv.qc.ca

Francis Le Roy : Agent de Planification, de Programmation et de Recherche UETMIS

francis.le.roy.hsj@ssss.gouv.qc.ca

Inge Meijer : Neuropédiatre, MD

inge.meijer.med@ssss.gouv.qc.ca

Labante Outcha Dare : Agent de Planification, de Programmation et de Recherche UETMIS, Ph. D., M.Sc., Ing.

labante.outcha.dare.hsj@ssss.gouv.qc.ca

Louise Gagnon : Neuropsychologue, M. Ps.

louise.gagnon.hsj@ssss.gouv.qc.ca

Matsanga-Leyila Kaseka : Neuropédiatre, MD

matsanga-leyila.kaseka.med@ssss.gouv.qc.ca

Philippe Major : Neuropédiatre, Chef Service Neurologie, MD

philippe.major.med@ssss.gouv.qc.ca

Sarah Lippé : Neuropsychologue, Ph. D.

sarah.lippe@umontreal.ca

Rédacteur

Labante Outcha Dare : Agent de planification, de programmation et de recherche, UETMIS, Ph. D., MSc, Ing.

Relecture

Geneviève Blain : Adjointe à la directrice DQEPE

Sophie Deslauriers : Technicienne en administration

Marc Girard : Membre du Comité exécutif UETMIS

Philippe Jovet : Membre du Comité exécutif UETMIS

Remerciements

L'UETMIS remercie le Comité de pilotage et la bibliothèque du CHUSJ pour leurs soutien et commentaire lors de la réalisation de ce travail.

Conflits d'intérêts

Tous les participants impliqués dans ce travail ont déclaré n'avoir aucun conflit d'intérêts en lien avec cette évaluation.

Abréviations et acronymes

Abréviation	Définition
AVC	Accident vasculaire cérébral
CHUM	Centre hospitalier de l'Université de Montréal
CHUSJ	Centre hospitalier universitaire Sainte-Justine
CSM	Cartographie du cortex moteur
CUSM	Centre universitaire de santé McGill
DBS	Deep Brain Stimulation
DCS	Direct Cortical Stimulation
EEG	Électroencéphalogramme
EMJ	Épilepsie myoclonique juvénile
EMP	Épilepsie myoclonique progressive
ECR	Essai contrôlé randomisé
ECT	Électroconvulsivothérapie
FCI	Fonds de convergence et d'innovation
FDA	Food and Drug Administration
IRM	Imagerie par résonance magnétique
IRMf	Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
MAC	Médicaments anticrises
MAE	Médicaments antiépileptiques
MEPs	Motor Evoked Potentials
nTMS	Stimulation magnétique transcrânienne naviguée
NIBS	Non-Invasive Brain Stimulation
ppTMS	Paired-Pulse Transcranial Magnetic Stimulation
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
RNS	Responsive Neurostimulation
rTMS	Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation
spTMS	Single-pulse Transcranial Magnetic Stimulation
TBS	Theta Burst Stimulation
TDAH	Trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité
TMS	Transcranial Magnetic Stimulation
tDCS	Transcranial Direct Current Stimulation
tES	Transcranial Electrical Stimulation
TNS	Trigeminal Nerve Stimulation
TOC	Trouble obsessionnel compulsif
tVNS	Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation

Table des matières

Informations générales.....	2
Abréviations et acronymes	4
Table des matières.....	5
Liste des figures	6
Liste des tableaux	6
Synthèse du rapport.....	7
Introduction	8
Question décisionnelle	9
Questions d'évaluation	9
Méthodes	10
Historique et principe de la TMS.....	15
Résultats et Discussion	16
Synthèse des recherches	18
Qualité méthodologique des études sélectionnées	22
Utilisation de la TMS dans l'épilepsie : efficacité, sécurité, modulation de l'excitabilité corticale et cartographie.....	31
TMS pour un usage pédiatrique.....	34
Utilisation de la TMS dans les établissements de santé étudiés	37
Conclusion et recommandations	41
Références.....	43

Liste des figures

Figure 1 : Diagramme de flux PRISMA pour la sélection des études sur la TMS au CHUSJ	17
Figure 2 : Grille d'évaluation critique de l'Institut Joanna Briggs des revues systématiques et des synthèses de recherches — Source [27].....	22
Figure 3 : Grille d'évaluation de Downs et Black — Source [26].....	26

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques des études sur la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) dans le contexte de l'épilepsie.....	19
Tableau 2 : Qualité méthodologique des revues de la littérature avec ou sans méta-analyse.....	24
Tableau 3 : Qualité méthodologique des études de recherche originale	30
Tableau 4 : Caractéristiques des études sur la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) dans une population pédiatrique.....	35
Tableau 5 : Comparaison des caractéristiques et pratiques de la TMS dans différents établissements	38

Synthèse du rapport

L'épilepsie est une maladie neurologique courante, touchant 1 à 2 % de la population mondiale, avec une prévalence élevée chez les enfants. Elle se caractérise par des crises récurrentes dues à un déséquilibre entre l'excitabilité et l'inhibition neuronale. Malgré les progrès des médicaments anticrises (MAC), environ 30 % des patients.es demeurent réfractaires, nécessitant des alternatives thérapeutiques comme la stimulation magnétique transcrânienne (TMS). Ce rapport évalue l'efficacité, la sécurité et les perspectives cliniques de la TMS dans l'épilepsie, avec un accent particulier sur les enfants.

Une revue systématique basée sur Medline et Embase a permis d'inclure 52 études selon des critères méthodologiques rigoureux. Les protocoles de TMS étudiés (dans la revue de la littérature et dans les établissements enquêtés) couvrent diverses modalités (impulsions uniques, appariées, répétitives) et fréquences (≤ 1 Hz ou > 5 Hz). Les résultats montrent que la TMS, notamment la rTMS à basse fréquence, réduit significativement les crises. Bien tolérée, la TMS présente des effets secondaires mineurs (céphalées, douleurs locales) et un faible risque de crises induites. Elle est également utile pour évaluer l'excitabilité corticale et réaliser une cartographie fonctionnelle préopératoire, afin de minimiser les déficits postopératoires.

Chez les enfants, les études montrent que la TMS est également sécuritaire et que la TMS naviguée (nTMS) est particulièrement utile pour la cartographie fonctionnelle chez les enfants subissant une chirurgie de l'épilepsie. Toutefois, des défis persistent, notamment la personnalisation des protocoles et la formation des cliniciens. Nos principales recommandations sont :

- ✓ **Intégration clinique** : Déployer la TMS comme option thérapeutique et diagnostique pour les patients.es pédiatriques, en particulier pour la chirurgie de l'épilepsie.
- ✓ **Formation des cliniciens** : Former les professionnels à l'utilisation sécurisée de la TMS, incluant la gestion des contre-indications et des effets secondaires.
- ✓ **Approche personnalisée** : Adapter les protocoles aux caractéristiques des patients.es et établir un suivi à long terme.
- ✓ **Collecte de données** : Documenter l'efficacité et la sécurité de la TMS pour améliorer les pratiques.
- ✓ **Soutien aux familles** : Informer et accompagner les parents sur les bénéfices et risques de la TMS.
- ✓ **Collaboration interdisciplinaire** : Renforcer la coordination entre la neurologie, la psychiatrie, la physiothérapie et la neurochirurgie pour élargir l'usage de la TMS à d'autres pathologies neuropsychiatriques (Accident Vasculaire Cérébral ou AVC, dépression, troubles du mouvement, trouble déficitaire de l'attention avec hyperactivité ou TDAH, trouble obsessionnel compulsif ou TOC, dystonie, syndrome de Gilles de la Tourette, etc.).

Ce rapport met en lumière le potentiel de la TMS comme solution innovante et sécuritaire pour les patients.es épileptiques en général, y compris chez les patients.es pédiatriques, tout en ouvrant la voie à d'autres applications neuropsychiatriques.

Introduction

L'épilepsie est l'une des maladies neurologiques les plus courantes, touchant environ 1 à 2 % de la population mondiale [1,2]. Cette maladie se caractérise par des crises récurrentes, principalement causées par un déséquilibre entre l'excitation et l'inhibition des neurones corticaux [3,4]. Il existe plusieurs types d'épilepsie, divisés en épilepsies généralisées et épilepsies focales [5].

Chez les enfants, l'épilepsie représente un défi majeur en raison de son impact significatif sur le développement neurocognitif et la qualité de vie. Près de 75 % des cas d'épilepsie débutent dans l'enfance, probablement en raison de l'immaturation des systèmes inhibiteurs du cerveau [1,6]. L'épilepsie pédiatrique se caractérise souvent par une charge importante de crises cliniques, lesquelles altèrent non seulement la qualité de vie, mais augmentent également les risques de complications graves telles que la mort subite inexplicable en épilepsie et l'état de mal épileptique [7]. De plus, l'épilepsie chez les enfants est associée à une large gamme de symptômes neurologiques chroniques ou à long terme [8]. Les crises peuvent être brèves et imperceptibles ou provoquer des secousses et des tremblements prolongés [8–10].

Malgré les progrès réalisés dans le développement des médicaments anticrises (MAC), environ 30 % des patients.es continuent à présenter des crises réfractaires, démontrant ainsi la nécessité de stratégies thérapeutiques alternatives, à la fois innovantes et personnalisées [1,4,11]. Ces traitements non pharmacologiques incluent des approches non invasives : la stimulation magnétique transcrânienne (ou TMS pour Transcranial Magnetic Stimulation), la stimulation du nerf vague (VNS pour Vagus Nerve Stimulation) ; et des approches invasives : la stimulation cérébrale profonde (DBS pour Vagus Nerve Stimulation), la stimulation cérébrale dynamique (RNS pour Responsive Neurostimulation) [12,12–19]. Parmi ces approches non invasives explorées ces dernières années, la TMS a émergé comme une option prometteuse pour étudier et traiter les dysfonctions neurologiques, notamment chez les enfants, offrant ainsi des perspectives prometteuses [19]. Cette approche, introduite en 1985, repose sur l'induction électromagnétique pour moduler l'excitabilité neuronale de manière ciblée et non invasive [8,20–23]. Contrairement aux interventions invasives comme la stimulation cérébrale profonde ou la résection chirurgicale, la TMS présenterait l'avantage d'être bien tolérée et adaptée à des populations pédiatriques plus vulnérables [18]. Cette modalité offrirait des moyens prometteurs pour moduler l'excitabilité cérébrale et traiter les troubles neurologiques [19] en utilisant, en particulier, des champs magnétiques pulsés qui déclenchent des courants électriques intracrâniens induisant la dépolarisation neuronale ou une hyperpolarisation selon la méthode et la fréquence utilisée [17].

La TMS, dans l'épilepsie, repose sur l'utilisation de trois formes principales de stimulation employées : la TMS à impulsion unique, la TMS à impulsions appariées, et la TMS répétitive (rTMS) [24,25]. Elle montrerait une efficacité substantielle dans le contrôle des crises chez de nombreux patients.es non réactifs aux médicaments antiépileptiques disponibles. En modulant l'excitabilité corticale, la TMS réduirait la fréquence des crises et améliorerait la qualité de vie des patients.es épileptiques [21]. Aussi, la TMS est utilisée pour évaluer l'excitabilité corticale dans diverses conditions épileptiques et pour étudier les effets des MAC sur le cerveau. En combinant la TMS avec l'électroencéphalographie (EEG), il serait possible de mesurer les réponses neuronales induites par la TMS tout en modulant l'excitabilité et la connectivité cérébrales. [13] De plus, dans la cartographie préopératoire du langage et des fonctions motrices, essentielle pour guider la planification

chirurgicale et minimiser les déficits postopératoires chez les enfants atteints de tumeurs cérébrales ou d'épilepsie pharmacorésistante, la stimulation magnétique transcrânienne naviguée (nTMS) serait devenue un outil de diagnostic préopératoire de routine pour ces patients, permettant une évaluation précise des zones cérébrales fonctionnelles [18].

Cela étant, les services de neurochirurgie et de neurologie du Centre hospitalier universitaire Sainte-Justine (CHUSJ), envisageant l'introduction de cette technologie dans leur pratique afin d'augmenter leurs potentiels diagnostique, pronostique et thérapeutique pour les patients atteints d'épilepsie, ont sollicité leur Unité d'évaluation des technologies et des modes d'intervention en santé (UETMIS) pour effectuer une évaluation de la TMS au sein de la population de personnes atteintes d'épilepsie, et plus spécifiquement, de la population pédiatrique.

Question décisionnelle

La question décisionnelle initiale de ce travail était la suivante : comment l'intégration de la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) dans les services de neurochirurgie et de neurologie du CHUSJ peut-elle être évaluée en termes de sécurité, d'efficacité, de bénéfices thérapeutiques et diagnostiques, ainsi que de gestion des risques pour les troubles neuropsychiatriques identifiés, tout en identifiant les défis à surmonter pour une mise en œuvre réussie basée sur les données probantes actuelles et les retours d'expérience contextuels ?

Cependant, au cours de la réalisation du mandat, cette question a été recentrée plus spécifiquement sur l'épilepsie. Cette réorientation s'explique par deux raisons principales : d'une part, une autre équipe menait simultanément un mandat spécifique aux troubles mentaux (psychiatrie), et d'autre part, le délai imparti et le nombre considérable d'articles retrouvés ont conduit à la décision de produire un rapport plus rapidement en nous concentrant sur l'épilepsie seulement. Ainsi, ultérieurement, ce travail pourrait être étendu aux autres troubles neuropsychiatriques préalablement identifiés et nécessitant davantage de prises de décisions telles que l'autisme, la dépression, le trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH), les troubles obsessionnels compulsifs (TOC), la réadaptation post-accident vasculaire cérébral (AVC), les troubles du mouvement (comme le syndrome de Gilles de la Tourette), etc.

Questions d'évaluation

Dans ce contexte, afin de fournir une évaluation complète et rigoureuse de la TMS, en prenant en considération les aspects de sécurité et d'efficacité, ainsi que les bénéfices, les risques, les défis et les perspectives contextuelles, les questions suivantes ont été abordées :

- ✓ Est-ce que la technologie de stimulation magnétique transcrânienne est sécuritaire pour un usage pédiatrique ?
- ✓ Pour quelles indications cliniques existe-t-il suffisamment d'évidence pour procéder à une utilisation clinique pédiatrique ?

- ✓ Quels seraient les défis (organisationnelles, formatifs, etc.), bénéfiques et risques quant à l'implantation de cette technologie ?

Méthodes

Dans le cadre de cette évaluation, nous avons examiné l'état actuel des connaissances scientifiques et recueilli des informations sur leurs pratiques de la TMS dans d'autres contextes d'établissements de santé au Québec.

La recherche des sources pertinentes a été effectuée, le 29 juillet 2024, en s'appuyant sur les bases de données bibliographiques Medline et Embase, accessibles via les services documentaires du CHUSJ. La littérature grise a été recherchée à travers les sites des UETMIS au Québec ainsi que deux d'agences nationales et internationales reconnues en évaluation des technologies de santé (la Haute autorité de santé et l'Institut national d'excellence en santé et en services sociaux). Contrairement à la recherche effectuée dans les bases de données bibliographiques indexées, qui portait sur l'ensemble des pathologies préalablement ciblées (voir section **Question décisionnelle**), cette recherche s'est concentrée uniquement sur l'épilepsie. Cette démarche a permis d'assurer une diversité des sources, garantissant une vision globale et nuancée. Pour une recherche étendue à travers toutes les ressources disponibles en médecine basée sur les preuves et pour identifier les études les plus pertinentes et fiables, notre stratégie de recherche a reposé sur des mots-clés et des équations adaptées à chaque moteur de recherche et base de données comme présenté respectivement ci-dessous pour PubMed, Embase et ALL Evidence-Based Medicine (EBM) Reviews.

#	Mot-clé	Requête
1	TMS	Transcranial Magnetic Stimulation[Mesh] OR Magnetics[Mesh] OR Magnetic Field Therapy[Mesh] OR "TMS"[tiab] OR "rTMS"[tiab] OR "magnetic stimulation*"[tiab] OR "noninvasive brain stimulation"[tiab] OR "noninvasive brain stimulation"[tiab] OR "non-invasive brain stimulation"[tiab] OR "non invasive brain stimulation*"[tiab] OR "repetitive transcranial brain stimulation"[tiab] OR "repetitive transcranial brain stimulation*"[tiab] OR "repetitive trans cranial brain stimulation*"[Title/Abstract] OR "Theta-Burst stimulation*"[tiab] OR electromagnetic stimulation*[TIAB] OR noninvasive neuromodulation*[TIAB] OR electromagnetic neuromodulation*[TIAB] OR non-invasive neuromodulation*[TIAB] OR transcranial magnet*[TIAB] OR transcranial electromagnet*[TIAB] OR transcranial electro-magnet*[TIAB] OR Trans-cranial electromagnet*[TIAB] OR Trans-cranial electro-magnet*[TIAB] OR magnetic field stimulation*[TIAB] OR "Stanford neuromodulation therap*"[Title/Abstract]
2	Troubles neuropsychiatriques	Movement Disorders [Mesh :noexp] OR movement disorder*[tiab] OR motor disorder*[tiab] OR motor dysfunct*[tiab] OR involuntary movement*[tiab] OR Stroke [Mesh] OR Stroke Rehabilitation [Mesh] OR cerebrovascular accident*[tiab] OR cerebro vascular accident* [tiab] OR cerebro-vascular accident* [tiab] OR CVA[tiab] OR stroke*[tiab] OR Tourette Syndrome[Mesh] OR tourette[tiab] OR Epilepsy [Mesh] OR epilep*[TIAB] OR convulsion*[TIAB] OR seizure*[TIAB]
3	Combinaison	1 AND 2
4	Filtre	(1 AND2) From : 2000-2025

#	Mots-clés et requêtes
1	transcranial magnetic stimulation/
2	magnetic field therapy.ti,ab,kf.
3	TMS.ti,ab,kf.
4	rTMS.ti,ab,kf.
5	"magnetic stimulation*".ti,ab,kf.
6	"noninvasive brain stimulation*".ti,ab,kf.
7	"non-invasive brain stimulation*".ti,ab,kf.
8	"repetitive transcranial brain stimulation*".ti,ab,kf.
9	"repetitive trans-cranial brain stimulation*".ti,ab,kf.
10	"theta-burst stimulation*".ti,ab,kf.
11	"electromagnetic stimulation*".ti,ab,kf.
12	"non-invasive neuromodulation*".ti,ab,kf.
13	"noninvasive neuromodulation*".ti,ab,kf.
14	"magnetic neuromodulation*".ti,ab,kf.
15	"electromagnetic neuromodulation*".ti,ab,kf.
16	"transcranial magnet*".ti,ab,kf.
17	"transcranial electromagnet*".ti,ab,kf.
18	"transcranial electro-magnet".ti,ab,kf.
19	"magnetic field stimulation*".ti,ab,kf.
20	"Stanford neuromodulation therap*".ti,ab,kf.
21	motor dysfunction/ (si tu veux ce qu'il y a dessous dans l'arborescence, n'oublie pas le exp)
22	"movement disorder?".ti,ab,kf.
23	Exp cerebrovascular accident/
24	"cerebrovascular accident".ti,ab,kf. (inclus dans le suivant) cva.ti,ab,kf
25	"cerebro?vascular accident".ti,ab,kf.
26	Gilles de la Tourette syndrome/
27	"tourette".ti,ab,kf.
28	Exp epilepsy/
29	"epilep* OR convulsion* OR seizure*".ti,ab,kf.
30	"stroke rehabilitation".ti,ab,kf.
31	"stroke*".ti,ab,kf.
32	21 or 22
33	23 or 24 or 25 or 30 or 31
34	26 or 27
35	28 or 29
36	32 or 33 or 34 or 35
37	magnetism/
38	1 or 2 or 37
39	3 or 4 or 5 or 6 or 7 or 8 or 9 or 10 or 11 or 12 or 13 or 14 or 15 or 16 or 17 or 18 or 19 or 20 or 38
40	36 and 39

Via Ovid, diverses bases de données dédiées à l'EBM ont simultanément été considérées dans notre recherche documentaire : « *Cochrane Database of Systematic Reviews, Cochrane Clinical Answers, Cochrane Central Register of Controlled Trials, Cochrane Methodology Register, American College of Physicians Journal, Database of Abstracts of Reviews of Effects, Health Technology Assessment et National Health Service Economic Evaluation Database* ».

#	Mots-clés et requêtes
1	transcranial magnetic stimulation/
2	magnetics/
3	magnetic field therapy/
4	1 or 2 or 3
5	(TMS or rTMS or "magnetic stimulation*" or "noninvasive brain stimulation" or "non-invasive brain stimulation*" or "Repetitive Transcranial Brain Stimulation*" or "Repetitive Trans-cranial Brain Stimulation*" or "Theta-burst stimulation*" or "electromagnetic stimulation*" or "noninvasive neuromodulation*" or "non-invasive neuromodulation*" or "magnetic neuromodulation*" or "electromagnetic neuromodulation*" or "Transcranial magnet*" or "transcranial electromagnet*" or "transcranial electro-magnet*" or "Trans-cranial magnet*" or "trans-cranial electromagnet*" or "trans-cranial electro-magnet*" or "magnetic field stimulation*" or "Stanford neuromodulation therap*").ti,ab,kf.
6	4 or 5
7	movement disorder/
8	"movement disorder*".ti,ab,kf.
9	cerebrovascular accident/
10	"stroke".ti,ab,kf.
11	"stroke rehabilitation".ti,ab,kf.
12	"cerebrovascular accident".ti,ab,kf.
13	"cerebro?vascular accident".ti,ab,kf.
14	epilepsy/
15	"epileps*".ti,ab,kf.
16	"epilep* OR convulsion* OR seizure*".ti,ab,kf.
17	Gilles de la tourette syndrome/
18	tourette.ti,ab,kf.
19	7 or 8 or 9 or 10 or 11 or 12 or 13 or 14 or 15 or 16 or 17 or 18
20	6 and 19

La sélection des articles s'est déroulée selon les principes des directives PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), en utilisant l'outil Covidence pour structurer et organiser le processus. Seules les études portant sur des populations humaines ont été retenues, excluant ainsi celles réalisées sur des animaux. Les travaux admissibles incluaient des recherches originales, qu'elles soient prospectives ou rétrospectives, des revues de la littérature avec ou sans méta-analyse, des rapports institutionnels et des évaluations répondant à des normes scientifiques rigoureuses. Tous les documents devaient être en lien direct avec l'objectif principal : évaluer l'utilisation de

la TMS dans le traitement des troubles neuropsychiatriques. La validation des articles a été réalisée de manière indépendante par deux professionnels de l'UETMIS, avec une médiation par un troisième expert en cas de désaccord.

La reconnaissance par le comité de pilotage de la rareté des études portant sur la TMS chez les enfants a orienté notre stratégie vers une inclusion sans limites d'âge. Ainsi, des études sur des populations adultes ont été examinées pour identifier des données transférables à la population pédiatrique et évaluer leur pertinence contextuelle. Les critères de sélection spécifiques des études, les stratégies d'inclusion et d'exclusion, ainsi que les procédures de validation des données pour cette revue de la littérature sont décrites ci-dessous. Ces choix méthodologiques visaient à garantir une analyse rigoureuse, reproductible et exhaustive des études pertinentes.

Le critère central de sélection pour ce travail était l'inclusion des études axées exclusivement sur l'utilisation de la TMS dans le cadre de l'épilepsie. Les types d'études retenus comprenaient les études cas-témoins, les cohortes, les essais cliniques randomisés (ECR), ainsi que les analyses longitudinales, avec ou sans groupe contrôle. Les études originales rapportant plus de dix cas, les recherches qualitatives présentant un devis scientifique explicite, et les recommandations ou avis d'experts ont également été prises en compte. Par ailleurs, les études exploitant des données secondaires ont été incluses à condition que la publication soit la plus récente issue d'une base de données commune. En revanche, plusieurs types de publications ont été exclus. Il s'agissait notamment des études descriptives dépourvues de cadre analytique, des études de cas, des études rapportant des données dupliquées ou extraites sans une revue critique des méthodes, des études préliminaires ou pilotes, ainsi que des protocoles, résumés de conférences, affiches, brèves communications et points de vue. De plus, les études présentant des résultats agrégés sans distinction claire par pathologie ou technique ont été écartées. Enfin, les avis d'un seul expert ne s'appuyant pas sur une revue de la littérature ont également été exclus.

Sur la plateforme Covidence, une fois les doublons éliminés, une première sélection des études a été réalisée en nous basant sur les titres et résumés. Nous avons ensuite examiné les études retenues pour vérifier leur conformité à nos critères d'inclusion. Nous avons porté une attention particulière aux publications incluses dans des synthèses de littérature antérieures. Ainsi, nous avons exclu les études originales déjà couvertes par les synthèses jugées pertinentes qui ont été retenues pour ce travail afin d'éviter les redondances. Pour les études finalement retenues, nous avons effectué une évaluation critique approfondie de leur qualité méthodologique à l'aide de deux outils standardisés : la grille de Downs et Black [26] et la liste de contrôle pour l'évaluation critique des revues systématiques et des synthèses de recherche de l'Institut Joanna Briggs [27]. Nous avons ensuite exclu les études jugées de qualité insuffisante, garantissant ainsi que seules les preuves les plus robustes et méthodologiquement solides soient intégrées à ce travail. La grille de Downs et Black, particulièrement adaptée aux études cliniques, est un outil largement reconnu pour évaluer la qualité méthodologique des études randomisées et observationnelles (cohortes, cas-témoins, etc.). Elle comporte 27 critères répartis en cinq sections couvrant des aspects tels que la clarté de l'étude, la validité interne et externe, les biais potentiels, et la puissance statistique (voir **Figure 2**). De son côté, la liste de contrôle pour l'évaluation critique des

revues systématiques et des synthèses de recherche de l'Institut Joanna Briggs est spécifiquement conçue pour examiner la qualité méthodologique des revues systématiques et synthèses de recherche. Elle s'appuie sur un ensemble de 11 critères qui évaluent la rigueur scientifique, la fiabilité et la pertinence des synthèses pour la pratique clinique ou la recherche (voir **Figure 3**).

Pour compléter notre évaluation, nous avons organisé une collecte de données contextuelles et pratiques auprès de diverses institutions québécoises et internationales, notamment le Beth Israël Deaconess Medical Center, le Boston Children's Hospital, le Boston Medical Center, le Centre hospitalier de l'Université de Montréal (CHUM), Johns Hopkins, le Mass General Hospital, le Centre universitaire de santé McGill (CUSM), l'Université de Calgary et l'Université Laval. Cette collecte s'est appuyée sur un questionnaire structuré élaboré à l'aide de l'outil Microsoft Forms (voir **Annexe 1** joint dans un second document distinct accompagnant ce rapport). Ce questionnaire visait à recueillir les perspectives des spécialistes sur l'intégration de la TMS dans leur pratique quotidienne, en mettant en lumière les défis et opportunités associés à cette technologie. Une fois les réponses recueillies, nous avons extrait les données pertinentes en lien avec les questions de recherche et analysé les études sélectionnées selon les types de dispositifs utilisés, les techniques appliquées et les résultats obtenus, qu'ils soient positifs ou négatifs. Les informations ainsi recueillies ont été ensuite synthétisées sous forme de tableaux pour une présentation claire et accessible. Ces tableaux, qui intègrent également les données contextuelles et pratiques, sont présentés dans la section suivante.

Historique et principe de la TMS

La TMS repose sur le principe de l'induction électromagnétique découvert par Michael Faraday en 1831. Faraday a démontré qu'un courant électrique variable dans le temps crée un champ magnétique, qui peut à son tour induire un courant électrique dans un conducteur proche [10,28,29]. Ce principe a été appliqué pour la première fois au cerveau humain par D'Arsonval en 1896, qui a utilisé un champ magnétique pour provoquer des sensations de vertige et d'étourdissement [29–31].

L'ère moderne de la TMS a commencé en 1985 lorsque Anthony Barker et ses collègues ont développé le premier dispositif de TMS à Sheffield, au Royaume-Uni. Barker a prouvé scientifiquement l'influence de la stimulation magnétique sur le cortex moteur du cerveau humain [22,29,32]. Cependant, les premiers outils étaient lents à recharger et pouvaient surchauffer avec une utilisation répétée [10,29,33]. Depuis lors, la technologie TMS a évolué pour permettre des impulsions continues ou répétitives sur n'importe quelle partie du cortex. En 2002, l'Association canadienne de la santé a approuvé l'utilisation de la TMS répétitive (ou rTMS pour Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation) dans le traitement de la dépression résistante [8,29,34]. En 2008, la Food and Drug Administration (FDA) des États-Unis a également approuvé cette méthode pour traiter la dépression [29,35,36]. Aujourd'hui, la TMS est utilisée dans de nombreux pays pour traiter divers troubles psychologiques et neurologiques. Les appareils modernes permettent de modifier précisément les paramètres de stimulation pour s'adapter au mieux aux besoins thérapeutiques des patients. [10,29,33].

Elle utilise des champs magnétiques extracrâniens pour stimuler, exciter ou inhiber les neurones dans des régions cérébrales spécifiques. Le principe de base est de générer un champ magnétique dans une bobine placée sur le cuir chevelu, ce qui induit un courant électrique dans le cerveau. Ce courant électrique localisé stimule les neurones et modifie leur activité électrique, permettant ainsi de contrôler leur équilibre d'excitation et d'inhibition [37–39]. La rTMS, une variante de la TMS, consiste à délivrer des impulsions répétées pour moduler l'excitabilité du cortex. Elle se divise en deux types : la stimulation à basse fréquence (≤ 1 Hz) et à haute fréquence (> 5 Hz). Parmi les autres types de TMS, on trouve [25,42,43] : — la TMS à impulsion simple (ou spTMS pour Single-pulse TMS), qui est le protocole initial de TMS, permettant d'évaluer l'excitabilité des voies corticospinales en stimulant le cortex moteur et en mesurant la réponse électromyographique. Cette méthode est particulièrement utile pour l'étude des potentiels moteurs évoqués et constitue un outil précieux pour analyser le système moteur humain ; — la TMS à impulsion jumelée (ou ppTMS pour Paired-pulse TMS), consistant à administrer deux impulsions magnétiques séparées de quelques millisecondes à la même région cérébrale, permet d'évaluer l'excitabilité corticale ainsi que d'observer les modifications plastiques des circuits cérébraux ; et — le Theta Burst Stimulation (ou TBS), une forme récente de rTMS, consiste à délivrer trois impulsions à 50 Hz, espacées de 200 millisecondes, de manière continue ou intermittente.

En résumé, la TMS, technique non invasive, utilise des champs magnétiques pour moduler l'activité neuronale dans le cerveau, offrant possiblement un potentiel thérapeutique pour une variété de troubles neurologiques et psychiatriques [13,37,44] [4,8,34] comme l'épilepsie, la dépression, les troubles cognitifs post-AVC, la maladie d'Alzheimer, et d'autres troubles neuropsychiatriques. Ses effets dépendent des paramètres de stimulation, tels que la fréquence, l'intensité et la durée des impulsions, ainsi que de la forme et de la position de la bobine [12,41,45].

Résultats et Discussion

En combinant ces méthodes, cette évaluation a permis de garantir l'intégration des meilleures preuves disponibles, basées sur des approches solides, afin d'offrir une analyse scientifiquement valide et pertinente. Notre approche méthodologique rigoureuse a permis de notamment mieux organiser la recherche documentaire en l'intégrant aux données empiriques recueillies auprès des deux autres établissements ayant répondu au questionnaire. Cette combinaison a ensuite été analysée et synthétisée de manière systématique.

Le processus de sélection documentaire a débuté par l'identification des études pertinentes. Un total de **15 818 études** a été obtenu à partir de diverses bases de données. Aucune référence n'a été trouvée à partir d'autres sources, de la recherche de citations ou de la littérature grise. Après avoir appliqué des filtres (langue-français et anglais, études portant sur les humains) et éliminé les doublons, **9 472 études** pour une première évaluation ont été retenues. Ensuite, les titres et résumés de ces études ont été lus pour une première sélection. **9 093 études** ont été exclues à ce stade, car elles ne répondaient pas aux critères de pertinence. De plus, **4 études** n'ont pas pu être récupérées pour une évaluation plus approfondie. Les **375 études** restantes ont été

évaluées pour leur éligibilité dans le contexte de l'épilepsie et après une évaluation détaillée, **323 études** ont été exclues pour diverses raisons (voir **Figure 1** ci-dessous). Finalement, **52 études** ont été incluses dans la revue de la littérature et s'étaient de 2003 à 2024.

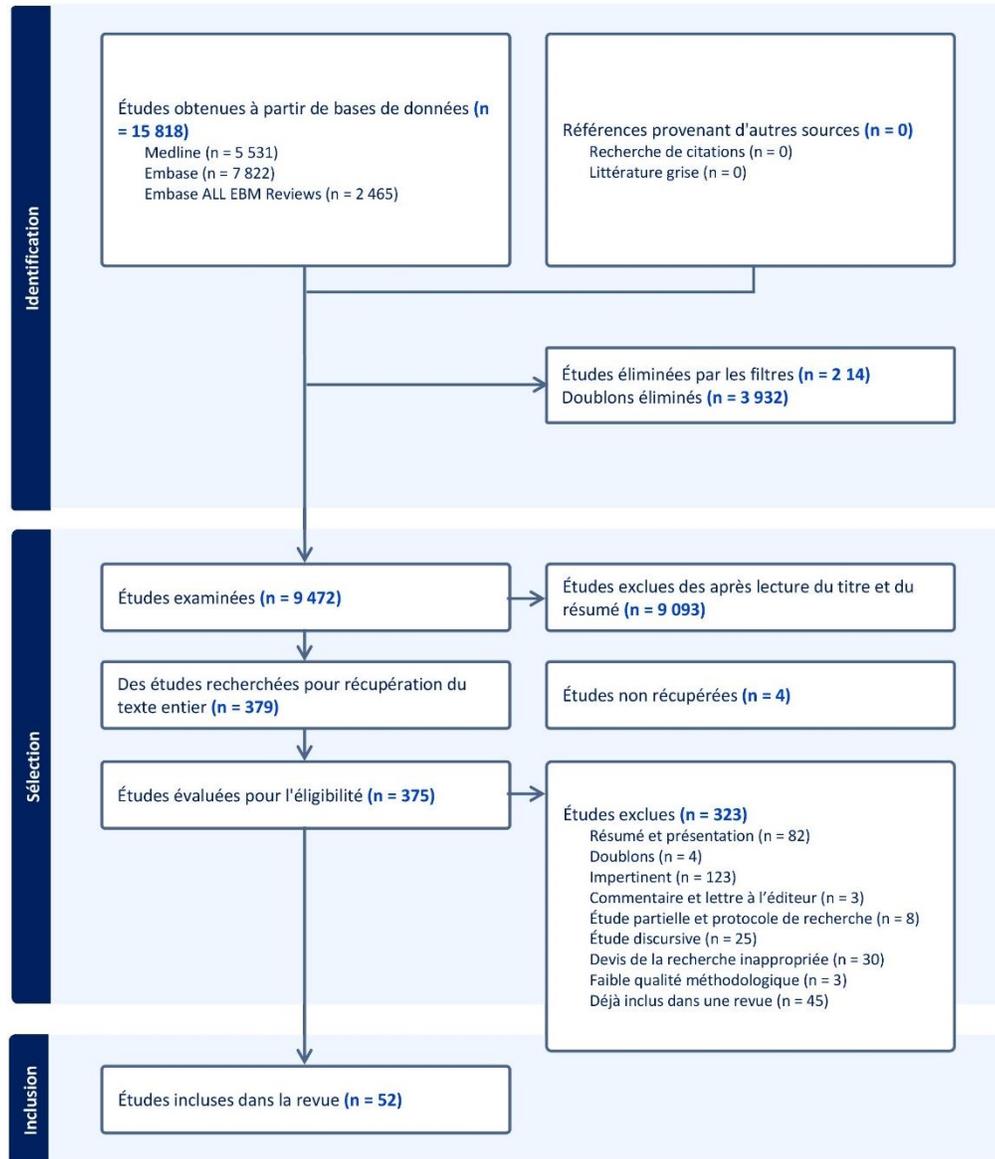


Figure 1 : Diagramme de flux PRISMA pour la sélection des études sur la TMS au CHUSJ

Ce processus de sélection documentaire selon le modèle PRISMA via la plateforme Covidence a permis de filtrer rigoureusement les études pour ne retenir que celles répondant aux critères de qualité et de pertinence.

Synthèse des recherches

Ce processus méthodique assure également que nos conclusions tirées de la revue de la littérature sont basées sur des données fiables et pertinentes. Ainsi, la catégorisation des études incluses a permis de regrouper les recherches selon leurs objectifs principaux et leurs domaines d'application, facilitant ainsi une compréhension globale des travaux sur la TMS dans le contexte de l'épilepsie. Trois catégories d'études ont été répertoriées : neuf études portant sur l'excitabilité corticale [5,46–53] dont plus de la moitié était des revues de la littérature [47–49,52,53] ; 34 études menées pour juger de l'efficacité et de la sécurité de la TMS [1,4,5,8,9,12,18,25,28,29,32,34,36,42,44,45,54–71] avec 28 revues de la littérature ou méta-analyses [4,5,8,9,12,28,29,32,34,36,42,44,45,54–59,61,63–67,69–71] et une recommandation [60] ; et sept études portant sur la cartographie à base de la TMS [10,15,72–76] dont deux lignes directrices sur la TMS [10,15].

Au total, dans ce travail, 34 études portant sur des revues de la littérature avec ou sans méta-analyses [4,5,8,9,12,28,29,32,34,36,40,42,44,45,47,48,52–59,61,63–67,69–71,77] et trois lignes directrices-recommandations d'avis d'experts [10,15,60] ont été incluses ainsi que 15 études de recherches originales [1,18,25,46,49–51,62,68,72–76,78]. Parmi elles, quelques études ont utilisé la combinaison TMS-EEG [40,77] ou en combinaison avec d'autres techniques [72,74,76]. Les tableaux suivants présentent les détails des caractéristiques des études incluses (voir **Tableau 1**) et de l'évaluation de leurs qualités méthodologiques (voir **Tableau 2 et Tableau 3**).

Ces études se répartissent de manière hétérogène par année de publication, reflétant l'évolution de l'intérêt scientifique pour le sujet : **trois en 2024** [4,18,70], **deux en 2023** [8,40], **six en 2022** [1,12,25,45,50,74], **cinq en 2021** [51,65,68,69,78], **neuf en 2020** [5,34,44,46,49,53,61,66,76], **trois en 2019** [36,64,77], **cinq en 2018** [55,56,58,62,73], **une en 2017** [52], **sept en 2016** [15,29,32,57,59,63,72], **une en 2015** [71], **deux en 2014** [10,47], **une en 2013** [75], **une en 2012** [48], **deux en 2011** [9,60], **deux en 2007** [28,54], **une en 2004** [42], et **une en 2003** [67]. Ces données mettent en lumière une concentration des publications dans les années récentes, avec un pic en 2020, dont plusieurs revues de la littérature ou méta-analyses, correspondant probablement à une intensification des recherches sur la stimulation magnétique transcrânienne et son rôle dans le traitement de l'épilepsie.

Pour des informations détaillées sur les caractéristiques des études, veuillez consulter les annexes (**Annexe 2**) joint dans un second document distinct accompagnant ce rapport d'évaluation. Celui-ci inclut une description précise de chaque étude, comprenant le titre, l'objectif, le devis et les méthodes utilisées, les populations étudiées, les critères d'inclusion ainsi que les principaux résultats. En raison des différences dans la conception des études, les interventions et les résultats mesurés dans les 52 études, une méta-analyse étant inappropriée, nous avons donc opté pour une discussion narrative des 52 études dans cette évaluation. De plus, seules les études de qualité au moins « Passables », indépendamment de leur devis de recherche, ont été incluses après évaluation avec la grille d'analyse méthodologique appropriée.

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques des études sur la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) dans le contexte de l'épilepsie

Référence	But de l'étude	Population d'étude	Résultats principaux	Avis sur la TMS
<i>Études sur l'efficacité et la sécurité</i>				
Bae et al., 2007 [54]	Sécurité et tolérance de la rTMS	287 sujets épileptiques	Risque de crise de 1,4 %, céphalées fréquentes	Justifie des recherches supplémentaires
Boon et al., 2018 [55]	Neurostimulation pour l'épilepsie pharmacorésistante	568 résultats inclus	Données insuffisantes pour prouver l'efficacité de la rTMS	Bien tolérée, mais preuves insuffisantes
Carrette et al., 2016 [32]	rTMS pour l'épilepsie réfractaire	21 articles inclus	Efficace chez certains patients.es, surtout épilepsie néocorticale	Soutient l'utilisation de la rTMS
Cooper et al., 2018 [56]	rTMS pour l'épilepsie pharmacorésistante	12 articles inclus (246 participants)	Réduction de la fréquence des crises d'environ 30% et meilleure réponse avec bobine en forme de 8	Thérapie efficace pour les patients.es pédiatriques
de Goede et al., 2016 [57]	TMS dans l'épilepsie naïve aux médicaments	31 articles inclus	Excitabilité corticale accrue chez les patients.es épileptiques	TMS révèle une excitabilité accrue
Ebrahim & Tungu, 2022 [12]	Neuromodulation dans l'épilepsie du lobe temporal	14 articles inclus	Faibles preuves de l'efficacité de la TMS	Faible réponse à la TMS
Gefferie et al., 2023 [40]	Réponses EEG évoquées par TMS	14 articles inclus	Données insuffisantes pour biomarqueurs de l'épilepsie	Méthodologie standardisée nécessaire
Hemond & Fregni, 2007 [28]	rTMS pour divers troubles neurologiques	32 articles inclus	Résultats mitigés pour l'épilepsie	Plus d'études nécessaires
Hsu et al., 2011 [9]	Effets antiépileptiques de la rTMS	11 articles inclus	Taille d'effet significative pour la réduction des crises	Favorable pour l'épilepsie néocorticale
Kwon et al., 2018 [58]	Neuromodulation dans l'épilepsie	1 étude incluse pour la TMS	rTMS réduit les décharges épileptiformes	Plus d'études nécessaires
Larkin et al., 2016 [59]	Épilepsie post-traumatique résistante	11 articles inclus	Résultats mitigés pour la rTMS	Utilisation expérimentale
Lefaucheur et al., 2011 [60]	Recommandations sur la rTMS	4 études incluses	Céphalées transitoires, inconfort non spécifique	rTMS sûre, mais efficacité non prouvée
Mahajan et al., 2020 [61]	rTMS et qualité de vie pour l'épilepsie focale	35 études incluses	rTMS améliore la qualité de vie par rapport aux antiépileptiques	rTMS plus efficace pour la qualité de vie
Mishra et al., 2020 [34]	rTMS pour l'épilepsie pharmacorésistante	7 ECR inclus	Réduction significative des crises et des décharges épileptiformes	Effet bénéfique significatif
Mukherjee et al., 2018 [62]	rTMS à basse fréquence pour l'épilepsie focale	32 sujets (8-18 ans)	Aucune différence significative entre rTMS et stimulation factice	Pas d'effet antiépileptique significatif
Noohi & Amirsalari, 2016 [29]	Histoire et utilisations de la rTMS	n.d.	rTMS a un brillant avenir malgré les problèmes de sécurité	Utilisations thérapeutiques variées
Pang et al., 2022 [25]	Impact de la TMS sur l'activité épileptique	35 patients.es épileptiques, 18 témoins	Protocoles sp/ppTMS sûrs	Aucune différence significative dans la fréquence des crises
Pereira et al., 2016 [63]	Sécurité de la rTMS chez les épileptiques	46 publications incluses	Risque de crise de 2,9 %, céphalées fréquentes	rTMS sûre et tolérable

ECR : essais contrôlés randomisés, EEG : électroencéphalogramme, n.d. : non disponible, ppTMS : stimulation magnétique transcrânienne par paires de pulses (paired-pulse TMS), rTMS : stimulation magnétique transcrânienne répétitive, sp/ppTMS : stimulation magnétique transcrânienne simple et par paires de pulses (single-pulse/paired-pulse TMS), TMS : stimulation magnétique transcrânienne.

Tableau 1 (suite) : Synthèse des caractéristiques des études sur la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) dans le contexte de l'épilepsie

Référence	But de l'étude	Population d'étude	Résultats principaux	Avis sur la TMS
<i>Études sur l'efficacité et la sécurité (suite)</i>				
Rosenstock et al., 2024 [18]	Fonction du langage bihémisphérique	19 enfants (4-17 ans)	Amélioration de la fonction langagière chez 25 % des enfants	Technique faisable et sûre
San-juan et al., 2019 [64]	Neuromodulation pour l'état de mal épileptique	4 articles inclus	Tous les patients.es ont interrompu l'état de mal épileptique	Efficace sans effets indésirables
Schrader et al., 2004 [42]	Incidence des crises avec TMS	49 articles inclus	Risque de crise de 0,0 à 3,6 % pour ppTMS	Faible risque de crise
Somaa et al., 2022 [45]	TMS pour les maladies neurologiques	n.d.	rTMS réduit l'excitabilité corticale	Pas de recommandation thérapeutique
Starnes et al., 2019 [36]	Neurostimulation pour l'épilepsie pédiatrique	n.d.	TMS sûre mais efficacité non prouvée	Utilisation expérimentale
Stavropoulos et al., 2021 [65]	Neuromodulation pour l'état de mal épileptique	n.d.	Amélioration chez 3 patients.es sur 4	Efficace pour l'état de mal épileptique
Stultz et al., 2020 [66]	Sécurité de la TMS	59 articles inclus	Risque de crise inférieur à 1 %	TMS sûre pour les épileptiques
Tassinari et al., 2003 [67]	TMS et épilepsie	30 articles inclus	TMS fournit des informations sur les mécanismes épileptiques	Potentiel thérapeutique pour la rTMS
Tavakoli & Heidarpanah, 2023 [8]	Examiner l'efficacité et les effets indésirables de la rTMS sur l'épilepsie	27 études éligibles	La rTMS est tolérable et peut réduire les crises, mais son efficacité reste controversée	Efficacité controversée
Taylor et al., 2021 [68]	Recueillir des données sur les taux de crises d'épilepsie TMS	25 526 patients.es	Le risque de crise avec la rTMS est faible, mais plus élevé avec la bobine H de Brainsway	Risque de crise plus élevé avec la bobine H de Brainsway
Tremblay et al., 2019 [77]	Fournir un aperçu de la TMS-EEG	n.d.	La TMS-EEG a un potentiel clinique important pour l'épilepsie	Potentiel clinique important
VanHaerents et al., 2020 [44]	Revue des utilisations de la NIBS dans l'épilepsie	n.d.	La TMS et la tDCS montrent un grand bénéfice potentiel pour l'épilepsie	Grand bénéfice potentiel
Walton et al., 2021 [69]	Évaluer la rTMS pour l'épilepsie pharmacorésistante	241 participants	La rTMS est sûre et parfois efficace pour réduire les décharges épileptiformes	Preuves d'efficacité insuffisantes
Wang et al., 2024 [4]	Évaluer l'efficacité de la rTMS à basse fréquence pour l'épilepsie	1 224 patients.es	La rTMS réduit la fréquence des crises et améliore la fonction cognitive	Traitement d'appoint efficace
Yang et al., 2024 [70]	Comparer l'efficacité et la sécurité des interventions pour l'épilepsie réfractaire	28 819 patients.es	La rTMS et la tDCS ont un potentiel thérapeutique avec des profils de sécurité satisfaisants	rTMS n'est pas efficace et en change pas la fréquence des crises par rapport au placebo
Zeiler et al., 2015 [71]	Revue de la rTMS pour l'état de mal épileptique	21 patients.es	La rTMS peut contrôler les crises, mais son utilisation systématique n'est pas recommandée	Durabilité de la thérapie courte

n.d. : non disponible, **NIBS** : stimulation cérébrale non invasive (Non-Invasive Brain Stimulation), **rTMS** : stimulation magnétique transcrânienne répétitive, **TMS** : stimulation magnétique transcrânienne, **TMS-EEG** : stimulation magnétique transcrânienne couplée à l'électroencéphalographie, **tDCS** : stimulation transcrânienne à courant continu.

Tableau 1 (suite) : Synthèse des caractéristiques des études sur la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) dans le contexte de l'épilepsie

Référence	But de l'étude	Population d'étude	Résultats principaux	Avis sur la TMS
<i>Études sur l'excitabilité corticale</i>				
Andreasson et al., 2020 [46]	Excitabilité corticale chez les enfants épileptiques	55 enfants (3-18 ans)	Augmentation des seuils moteurs au repos après traitement antiépileptique	Utilisable comme outil pronostique
Bauer et al., 2014 [47]	Excitabilité corticale comme marqueur clinique	50 études incluses	EC peut prédire l'issue du traitement antiépileptique	Outil de diagnostic sûr
Brigo et al., 2012 [48]	Seuil moteur au repos dans les épilepsies généralisées	265 patients.es épileptiques, 424 témoins	Hyperexcitabilité corticale dans l'épilepsie myoclonique juvénile	Soutient l'hyperexcitabilité corticale
Hamed, 2020 [5]	Excitabilité corticale et médicaments antiépileptiques	40 adultes (18-50 ans)	Désinhibition corticale accrue dans l'hémisphère épileptique	TMS sûre et tolérable
Hamed et al., 2020 [49]	Applications TMS à des fins diagnostiques et thérapeutiques dans l'épilepsie	Revue de la littérature	TMS sûre, utile pour évaluer l'excitabilité corticale, les effets des antiépileptiques, et peut réduire les crises dans l'épilepsie réfractaire	TMS n'est pas recommandée pour traiter l'épilepsie du lobe temporal
Helling et al., 2022 [50]	Dynamique de l'excitabilité corticale	16 patients.es épileptiques, 7 témoins	Impact de la réduction des antiépileptiques sur l'excitabilité corticale	TMS-EMG montre des effets distincts
Hu et al., 2021 [51]	Excitabilité corticale dans l'épilepsie du lobe temporal	46 patients.es, 16 témoins	Hyperexcitabilité corticale motrice dans l'hémisphère ipsilatérale	Réseau épileptogène plus étendu
Lin & Wang, 2017 [52]	Neurostimulation pour l'épilepsie	n.d.	rTMS réduit l'excitabilité corticale	Plus d'études nécessaires
Tsuboyama et al., 2020 [53]	Résumer les protocoles TMS pour les antiépileptiques	70 articles inclus	La TMS a un potentiel diagnostique et thérapeutique dans l'épilepsie	Potentiel diagnostique et thérapeutique
<i>Études sur la cartographie</i>				
Babajani-Feremi et al., 2016 [72]	Cartographie du langage	9 patients.es épileptiques (15-37 ans)	Concordance entre CSM, hgECoG, IRMf et TMS	Outil précieux pour la cartographie préchirurgicale
Braden et al., 2022 [1]	Sécurité de la TMS chez les enfants	429 patients.es (0,16-64 ans)	Incidence de 5,8 % de crises, 10,6 % de douleurs	Protocole standard recommandé
Lefaucheur et al., 2014 [10]	Lignes directrices sur la rTMS	5 études incluses	Efficacité possible pour la rTMS dans l'épilepsie focale	Maintien dans le domaine de la recherche
Lefaucheur & Picht, 2016 [15]	Cartographie corticale préopératoire	n.d.	Profil de risque favorable pour la cartographie du langage	Technique valide et utile
Lehtinen et al., 2018 [73]	Cartographie du langage avec nTMS	20 patients.es (9-32 ans)	Sensibilité de 68 %, spécificité de 76 %	Clinique utile et sûre
Pasichnik et al., 2022 [74]	Latéralisation du langage chez les épileptiques	19 patients.es (9-22 ans)	Discordance entre IRMf et nTMS	Apporte des preuves complémentaires
Schramm et al., 2021 [78]	Cartographie motrice préopératoire	16 patients.es (0-17 ans)	Taux de réussite de 62,5 % pour MEPs	Technique faisable et efficace
Vitikainen et al., 2013 [75]	Comparer la nTMS et l'ECS pour la cartographie motrice	13 patients.es	La nTMS est fiable pour la localisation préchirurgicale du cortex moteur	Fiable pour la localisation préchirurgicale
Zhang et al., 2020 [76]	Évaluer la cartographie du langage multitâche par nTMS	16 patients.es	La nTMS multitâche est efficace et sûre pour la cartographie du langage avant chirurgie	Efficace et sûre pour la cartographie du langage

CSM : cartographie du cortex moteur, **ECS** : stimulation corticale électrique, **hgECoG** : électrocorticographie gamma élevée, **IRMf** : imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, **n.d.** : non disponible, **MEPs** : potentiels évoqués moteurs, **nTMS** : stimulation magnétique transcrânienne naviguée, **rTMS** : stimulation magnétique transcrânienne répétitive, **TMS** : stimulation magnétique transcrânienne, **TMS-EMG** : stimulation magnétique transcrânienne couplée à l'électromyographie.

Qualité méthodologique des études sélectionnées

La qualité méthodologique des études de la revue de la littérature, avec ou sans méta-analyse, a été évaluée selon les 11 critères de la grille d'évaluation critique de l'Institut Joanna Briggs (voir **Figure 2** et **Tableau 2** ci-dessous).

JBI CRITICAL APPRAISAL CHECKLIST FOR SYSTEMATIC REVIEWS AND RESEARCH SYNTHESSES

Reviewer _____ Date _____

Author _____ Year _____ Record Number _____

	Yes	No	Unclear	Not applicable
1. Is the review question clearly and explicitly stated?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Were the inclusion criteria appropriate for the review question?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Was the search strategy appropriate?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Were the sources and resources used to search for studies adequate?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Were the criteria for appraising studies appropriate?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Was critical appraisal conducted by two or more reviewers independently?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Were there methods to minimize errors in data extraction?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Were the methods used to combine studies appropriate?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. Was the likelihood of publication bias assessed?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. Were recommendations for policy and/or practice supported by the reported data?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11. Were the specific directives for new research appropriate?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Overall appraisal: Include Exclude Seek further info

Comments (Including reason for exclusion)

© JBI, 2020. All rights reserved. JBI grants use of these tools for research purposes only. All other enquiries should be sent to jbisynthesis@adelaide.edu.au.

Critical Appraisal Checklist for Systematic Reviews and Research Syntheses - 1

Figure 2 : Grille d'évaluation critique de l'Institut Joanna Briggs des revues systématiques et des synthèses de recherches / **Source** [27]

Cinq études ont été évaluées comme « **Excellentes** » : celles de Wang et *al.* [4], Yang et *al.* [70], Walton et *al.* [69], Cooper et *al.* [56] et Hsu et *al.* [9], répondant aux 11 critères méthodologiques, témoignant d'une qualité optimale. Ces travaux présentent une rigueur exemplaire et fournissent des données hautement fiables et reproductibles. **Cinq** autres études ont été classées « **Très bonnes** » : Gefferie et *al.* [40], Pereira et *al.* [63], Zeiler et *al.* [71], Brigo et *al.* [48] et Bae et *al.* [54], ayant obtenu 9 ou 10 critères, indiquant une rigueur méthodologique élevée. Bien qu'elles ne remplissent pas tous les critères, elles se distinguent par une méthodologie rigoureuse et une robustesse suffisante pour appuyer des conclusions fiables. **Dix** études ont été classées « **Bonnes** », incluant celles de Soma et *al.* [45], Mahajan et *al.* [61], San-Juan et *al.* [64], Boon et *al.* [55], Larkin et *al.* [59], deGoede et *al.* [57], Carrette et *al.* [32], Lefaucheur et *al.* [60], Hemond et Fregni [28] et Schrader et *al.* [42], satisfaisant à 7 ou 8 critères, ce qui reflète une méthodologie solide, mais avec quelques lacunes. Elles sont néanmoins considérées comme fiables et leurs résultats peuvent être utilisés avec une certaine confiance pour des analyses ou recommandations cliniques.

L'étude d'Ebrahim et Tungu [12] a été la **seule** classée « **Moyenne** », répondant à seulement 4 critères, ce qui signalait plusieurs faiblesses méthodologiques majeures, limitant la portée de ses conclusions. Enfin, **16** études ont été qualifiées de « **Passables** », avec 5 ou 6 critères satisfaisants [5,8,10,15,29,34,36,44,47,52,53,58,65–67,77]. Ces études révèlent des insuffisances méthodologiques substantielles, comme un échantillonnage limité ou une gestion inadéquate des biais, affectant leur validité interne et externe. Leur interprétation nécessite donc une prudence particulière.

Globalement, les scores méthodologiques des études varient de 4/11 à 11/11, reflétant une hétérogénéité importante dans la rigueur des approches utilisées. Si les études classées « Excellentes » et « Très bonnes » constituent une base solide pour des analyses fiables et des recommandations cliniques, les travaux « Moyens » ou « Passables » demandent des validations supplémentaires et une triangulation avec des sources plus robustes pour éviter des conclusions biaisées.

Tableau 2 : Qualité méthodologique des revues de la littérature avec ou sans méta-analyse

Étude	Critère											Appréciation Globale
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Bae et al., 2007 [54]	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	Très bien
Bauer et al., 2014 [47]	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	Passable
Boon et al., 2018 [55]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Bien
Brigo et al., 2012 [48]	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	Très bien
Carrette et al., 2016 [32]	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓	Bien
Cooper et al., 2018 [56]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Excellent
de Goede et al., 2016 [57]	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓	Bien
Ebrahim & Tungu, 2022 [12]	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	Moyen
Gefferie et al., 2023 [40]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	Très bien
Hamed, 2020 [5]	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	Passable
Hemond & Fregni, 2007 [28]	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓	Bien
Hsu et al., 2011 [9]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Excellent
Kwon et al., 2018 [58]	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓	Passable
Larkin et al., 2016 [59]	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓	Bien
Lefaucœur et al., 2011 [60]	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓	Bien
Lefaucœur et al., 2014 [10]	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	Passable
Lefaucœur & Picht, 2016 [15]	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	Passable
Lin & Wang, 2017 [52]	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓	Passable
Mahajan et al., 2020 [61]	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	Bien
Mishra et al., 2020 [34]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Excellent

✓ : **Oui** (l'étude répond à ce critère d'évaluation de sa qualité méthodologique), ✗ : **Non** (l'étude ne répond pas à ce critère d'évaluation de sa qualité méthodologique).

Appréciation globale : Appréciation globale de la qualité méthodologique de l'étude — **Excellent** : 11/11, **Très bien** : 9 ou 10/11, **Bien** : 7 ou 8/11, **Passable** : 5 ou 6/11.

Tableau 2 (suite) : Qualité méthodologique des revues de la littérature avec ou sans méta-analyse

Étude	Critère											Appréciation Globale
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Noohi & Amirsalari, 2016 [29]	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	Passable
Pereira et al., 2016 [63]	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	Très bien
Schrader et al., 2004 [42]	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓	Bien
San-juan et al., 2019 [64]	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	Bien
Somaa et al., 2022 [45]	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	Bien
Starnes et al., 2019 [36]	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	Passable
Stavropoulos et al., 2021 [65]	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	Passable
Stultz et al., 2020 [66]	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	Passable
Tassinari et al., 2003 [67]	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	Passable
Tavakoli & Heidarpanah, 2023 [8]	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	Passable
Tremblay et al., 2019 [77]	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	Passable
Tsuboyama et al., 2020 [53]	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	Passable
VanHaerents et al., 2020 [44]	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	Passable
Wang et al., 2024 [4]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Excellent
Walton et al., 2021 [69]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Excellent
Yang et al., 2024 [70]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Excellent
Zeiler et al., 2015 [71]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	Très bien

✓ : Oui (l'étude répond à ce critère d'évaluation de sa qualité méthodologique), ✗ : Non (l'étude ne répond pas à ce critère d'évaluation de sa qualité méthodologique).

Appréciation globale : Appréciation globale de la qualité méthodologique de l'étude — **Excellent :** 11/11, **Très bien :** 9 ou 10/11, **Bien :** 7 ou 8/11, **Passable :** 5 ou 6/11.

Quant aux études de recherche originale incluses, évaluées selon la grille de Downs et Black, les scores varient entre 9/19 et 25/32 (voir **Figure 3** et **Tableau 3**), révélant également une diversité notable dans la rigueur des méthodes employées comme pour les revues de la littérature avec ou sans méta-analyse. Cela souligne également l'importance de contextualiser les conclusions selon la qualité de chacune de ces études.

Downs, Black

Appendix

Checklist for measuring study quality

Reporting

1. *Is the hypothesis/aim/objective of the study clearly described?*

yes	1
no	0

2. *Are the main outcomes to be measured clearly described in the Introduction or Methods section?*

If the main outcomes are first mentioned in the Results section, the question should be answered no.

yes	1
no	0

3. *Are the characteristics of the patients included in the study clearly described?*

In cohort studies and trials, inclusion and/or exclusion criteria should be given. In case-control studies, a case-definition and the source for controls should be given.

yes	1
no	0

4. *Are the interventions of interest clearly described?*

Treatments and placebo (where relevant) that are to be compared should be clearly described.

yes	1
no	0

5. *Are the distributions of principal confounders in each group of subjects to be compared clearly described?*

A list of principal confounders is provided.

yes	2
partially	1
no	0

6. *Are the main findings of the study clearly described?*

Simple outcome data (including denominators and numerators) should be reported for all major findings so that the reader can check the major analyses and conclusions. (This question does not cover statistical tests which are considered below).

yes	1
no	0

7. *Does the study provide estimates of the random variability in the data for the main outcomes?*

In non normally distributed data the inter-quartile range of results should be reported. In normally distributed data the standard error, standard deviation or confidence intervals should be reported. If the distribution of the data is not described, it must be assumed that the estimates used were appropriate and the question should be answered yes.

yes	1
no	0

8. *Have all important adverse events that may be a consequence of the intervention been reported?*

This should be answered yes if the study demonstrates that there was a comprehensive attempt to measure adverse events. (A list of possible adverse events is provided).

yes	1
no	0

9. *Have the characteristics of patients lost to follow-up been described?*

This should be answered yes where there were no losses to follow-up or where losses to follow-up were so small that findings would be unaffected by their inclusion. This should be answered no where a study does not report the number of patients lost to follow-up.

yes	1
no	0

10. *Have actual probability values been reported (e.g. 0.035 rather than <0.05) for the main outcomes except where the probability value is less than 0.001?*

yes	1
no	0

External validity

All the following criteria attempt to address the representativeness of the findings of the study and whether they may be generalised to the population from which the study subjects were derived.

11. *Were the subjects asked to participate in the study representative of the entire population from which they were recruited?*

The study must identify the source population for patients and describe how the patients were selected. Patients would be representative if they comprised the entire source population, an unselected sample of consecutive patients, or a random sample. Random sampling is only feasible where a list of all members of the relevant

Figure 3 : Grille d'évaluation de Downs et Black / Source [26]

population exists. Where a study does not report the proportion of the source population from which the patients are derived, the question should be answered as unable to determine.

yes	1
no	0
unable to determine	0

12. *Were those subjects who were prepared to participate representative of the entire population from which they were recruited?*

The proportion of those asked who agreed should be stated. Validation that the sample was representative would include demonstrating that the distribution of the main confounding factors was the same in the study sample and the source population.

yes	1
no	0
unable to determine	0

13. *Were the staff, places, and facilities where the patients were treated, representative of the treatment the majority of patients receive?*

For the question to be answered yes the study should demonstrate that the intervention was representative of that in use in the source population. The question should be answered no if, for example, the intervention was undertaken in a specialist centre unrepresentative of the hospitals most of the source population would attend.

yes	1
no	0
unable to determine	0

Internal validity - bias

14. *Was an attempt made to blind study subjects to the intervention they have received ?*

For studies where the patients would have no way of knowing which intervention they received, this should be answered yes.

yes	1
no	0
unable to determine	0

15. *Was an attempt made to blind those measuring the main outcomes of the intervention?*

yes	1
no	0
unable to determine	0

16. *If any of the results of the study were based on "data dredging", was this made clear?*

Any analyses that had not been planned at the outset of the study should be clearly indicated. If no retrospective unplanned subgroup analyses were reported, then answer yes.

yes	1
no	0
unable to determine	0

17. *In trials and cohort studies, do the analyses adjust for different lengths of follow-up of patients, or in case-control studies, is the time period between the intervention and outcome the same for cases and controls ?*

Where follow-up was the same for all study patients the answer should yes. If different lengths of follow-up were adjusted for by, for example, survival analysis the answer should be yes. Studies where differences in follow-up are ignored should be answered no.

yes	1
no	0
unable to determine	0

18. *Were the statistical tests used to assess the main outcomes appropriate?*

The statistical techniques used must be appropriate to the data. For example non-parametric methods should be used for small sample sizes. Where little statistical analysis has been undertaken but where there is no evidence of bias, the question should be answered yes. If the distribution of the data (normal or not) is not described it must be assumed that the estimates used were appropriate and the question should be answered yes.

yes	1
no	0
unable to determine	0

19. *Was compliance with the intervention/s reliable?*

Where there was non compliance with the allocated treatment or where there was contamination of one group, the question should be answered no. For studies where the effect of any misclassification was likely to bias any association to the null, the question should be answered yes.

yes	1
no	0
unable to determine	0

20. *Were the main outcome measures used accurate (valid and reliable)?*

Figure 3 (suite) : Grille d'évaluation de Downs et Black / Source [26]

For studies where the outcome measures are clearly described, the question should be answered yes. For studies which refer to other work or that demonstrates the outcome measures are accurate, the question should be answered as yes.

yes	1
no	0
unable to determine	0

Internal validity - confounding (selection bias)

21. Were the patients in different intervention groups (trials and cohort studies) or were the cases and controls (case-control studies) recruited from the same population?

For example, patients for all comparison groups should be selected from the same hospital. The question should be answered unable to determine for cohort and case-control studies where there is no information concerning the source of patients included in the study.

yes	1
no	0
unable to determine	0

22. Were study subjects in different intervention groups (trials and cohort studies) or were the cases and controls (case-control studies) recruited over the same period of time?

For a study which does not specify the time period over which patients were recruited, the question should be answered as unable to determine.

yes	1
no	0
unable to determine	0

23. Were study subjects randomised to intervention groups?

Studies which state that subjects were randomised should be answered yes except where method of randomisation would not ensure random allocation. For example alternate allocation would score no because it is predictable.

yes	1
no	0
unable to determine	0

24. Was the randomised intervention assignment concealed from both patients and health care staff until recruitment was complete and irrevocable?

All non-randomised studies should be answered no. If assignment was concealed from patients but not from staff, it should be answered no.

yes	1
no	0
unable to determine	0

25. Was there adequate adjustment for confounding in the analyses from which the main findings were drawn?

This question should be answered no for trials if: the main conclusions of the study were based on analyses of treatment rather than intention to treat; the distribution of known confounders in the different treatment groups was not described; or the distribution of known confounders differed between the treatment groups but was not taken into account in the analyses. In non-randomised studies if the effect of the main confounders was not investigated or confounding was demonstrated but no adjustment was made in the final analyses the question should be answered as no.

yes	1
no	0
unable to determine	0

26. Were losses of patients to follow-up taken into account?

If the numbers of patients lost to follow-up are not reported, the question should be answered as unable to determine. If the proportion lost to follow-up was too small to affect the main findings, the question should be answered yes.

yes	1
no	0
unable to determine	0

Power

27. Did the study have sufficient power to detect a clinically important effect where the probability value for a difference being due to chance is less than 5%?

Sample sizes have been calculated to detect a difference of x% and y%.

	Size of <i>smallest</i> intervention group	
A	<n ₁	0
B	n ₁ -n ₂	1
C	n ₁ -n ₄	2
D	n ₁ -n ₆	3
E	n ₁ -n ₈	4
F	n ₈ +	5

Figure 3 (suite) : Grille d'évaluation de Downs et Black / Source [26]

Les études avec des scores élevés, classées « Excellent » ou « Très bien », se distinguent par leur rigueur méthodologique et leur prise en compte des critères essentiels. Par exemple, l'étude de Braden et al. [1], avec un score de 19/19, a été évaluée comme « Excellent » pour une étude descriptive, reflétant une méthodologie

remarquablement solide. De manière similaire, les études de Andreasson et *al.* [46], Hu et *al.* [51] et Schramm et *al.* [78], obtenant respectivement 16/19 pour une étude de suivi longitudinale, 17/19 pour une étude prospective transversale, et 16/19 pour une étude rétrospective, se sont distinguées par une rigueur méthodologique notable malgré des limitations mineures. Ces travaux constituent une base fiable pour des analyses approfondies et des conclusions robustes.

Les études classées avec des scores « Bien » ou « Assez bien » ont révélé une méthodologie globalement solide, mais comportant certaines lacunes. Les études de Mukherjee et *al.* [62] (25/32), Lehtinen et *al.* [73] (15/19), et Taylor et *al.* [68] (14/19) appartiennent à la catégorie « Bien ». Bien qu'elles présentent une conception méthodologique adéquate, plusieurs critères clés sont restés non satisfaisants, limitant légèrement leur portée. Par ailleurs, les travaux de Babajani-Feremi et *al.* [72], Hamed et *al.* [49], Pang et *al.* [25] et Vitikainen et *al.* [75] ont été classés comme « Assez bien » avec des scores respectifs de 13/19, 18/27, 18/27 et 13/19 reflétant une méthodologie acceptable, mais marquée par des insuffisances importantes dans des domaines critiques, tels que la gestion des biais et la validité externe.

Enfin, les études aux scores faibles, classées comme « Passable », ont révélé des insuffisances méthodologiques notables. Parmi celles-ci, l'étude de Helling et *al.* [50] avec un score de 14/27, l'étude de Pasichnik et *al.* [74] avec un score 9/19, l'étude de Rosenstock et *al.* [18] avec un score de 11/19, et celle de Zhang et *al.* [76] avec 9/19, présentaient des limites importantes, notamment un manque de détails sur des critères essentiels tels que la validité externe, le contrôle des biais, et la puissance statistique. Ces faiblesses compromettent la fiabilité de leurs conclusions et nécessitent une interprétation prudente ainsi qu'un recours à des sources complémentaires plus robustes.

En somme, si les études « Excellent » et « Très bien » se démarquent par leur robustesse et leur capacité à fournir des données fiables et reproductibles, celles évaluées comme « Bien » ou « Assez bien » restent exploitables, mais doivent être interprétées avec une certaine réserve. En revanche, les études « Passables », quant à elles, présentent des limitations méthodologiques significatives, réduisant leur utilité pour appuyer des recommandations sans validations supplémentaires.

Tableau 3 : Qualité méthodologique des études de recherche originale

Étude	Critère																											Score	Appréciation Globale
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
Andreasson et al., 2020 [46]	1	1	1	1	n.a.	1	1	n.a.	n.a.	1	1	1	n.a.	n.a.	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0	1	3	16/19	Très bien
Babajani-Feremi et al., 2016 [72]	1	1	1	1	n.a.	1	1	n.a.	n.a.	1	1	1	n.a.	n.a.	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0	0	1	13/19	Assez bien
Braden et al., 2022 [1]	1	1	1	1	n.a.	1	1	n.a.	n.a.	1	1	1	n.a.	n.a.	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1	1	5	19/19	Excellent
Hamed et al., 2020 [49]	1	1	1	1	0	1	1	n.a.	n.a.	1	0	0	n.a.	n.a.	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	1	1	1	n.a.	n.a.	0	1	2	18/27	Assez bien
Helling et al., 2022 [50]	1	1	1	1	0	1	1	n.a.	n.a.	0	0	0	n.a.	n.a.	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	1	1	1	n.a.	n.a.	0	0	0	14/27	Passable
Hu et al., 2021 [51]	1	1	1	1	n.a.	1	1	n.a.	n.a.	1	1	1	n.a.	n.a.	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0	1	4	17/19	Très bien
Lehtinen et al., 2018 [73]	1	1	1	1	n.a.	1	1	n.a.	n.a.	1	1	1	n.a.	n.a.	n.a.	1	n.a.	0	n.a.	1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1	0	3	15/19	Bien
Mukherjee et al., 2018 [62]	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2	25/32	Bien
Pang et al., 2022 [25]	1	1	1	1	2	1	1	n.a.	n.a.	1	0	0	n.a.	n.a.	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	1	1	1	n.a.	n.a.	0	0	0	18/27	Assez bien
Pasichnik et al., 2022 [74]	1	1	1	1	n.a.	1	0	n.a.	n.a.	0	0	1	n.a.	n.a.	n.a.	1	n.a.	0	n.a.	1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0	1	0	09/19	Passable
Rosenstock et al., 2024 [18]	1	1	1	1	n.a.	1	1	n.a.	n.a.	1	0	0	n.a.	n.a.	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0	1	0	11/19	Passable
Schramm et al., 2021 [78]	1	1	1	1	n.a.	1	1	n.a.	n.a.	1	1	1	n.a.	n.a.	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1	1	2	16/19	Très bien
Taylor et al., 2021 [68]	1	1	1	1	n.a.	1	1	n.a.	n.a.	1	1	0	n.a.	n.a.	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0	1	2	14/19	Bien
Vitikainen et al., 2013 [75]	1	1	1	1	n.a.	1	1	n.a.	n.a.	0	1	1	n.a.	n.a.	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0	1	1	13/19	Assez bien
Zhang et al., 2020 [76]	1	1	1	1	n.a.	1	0	n.a.	n.a.	0	0	0	n.a.	n.a.	n.a.	1	n.a.	0	n.a.	1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0	1	1	9/19	Passable

Qualité globale (Items : 1 à 10), Validité externe (Items :11 à 13), Biais des résultats (Items : 14 à 20), Biais de confusion et sélection (Item : 21 à 26), Puissance (Item : 27) ; Score : Score de qualité obtenu et n.a. : non applicable.
 Maximum de points par Item : 1 : 1/1 pt ; 2 : 1/1 pt ; 3 : 1/1 pt ; 4 : 1/1 pt ; 5 : 2/2 pts ; 6 : 1/1 pt ; 7 : 1/1 pt ; 8 : 1/1 pt ; 9 : 1/1 pt ; 10 : 1/1 pt ; 11 : 1/1 pt ; 12 : 1/1 pt ; 13 : 1/1 pt ; 14 : 1/1 pt ; 15 : 1/1 pt ; 16 : 1/1 pt ; 17 : 1/1 pt ; 18 : 1/1 pt ; 19 : 1/1 pt ; 20 : 1/1 pt ; 21 : 1/1 pt ; 22 : 1/1 pt ; 23 : 1/1 pt ; 24 : 1/1 pt ; 25 : 1/1 pt et 27 : 5/5 pts.
 Maximum de points pour les études descriptives (de prévalence et autres sans comparateur) = 19 (Excellent : 19/19, Très bien : 16 à 18/19, Bien : 14 ou 15/19, Assez bien : 12 ou 13/19, Passable : 9 à 11/19).
 Maximum de points pour les études analytiques (de cohorte et cas-témoins) = 27 (Excellent : 27/27, Très bien : 24 à 26/27, Bien : 20 à 24 /27, Assez bien : 16 à 19/27, Passable : 13 à 15/27).
 Maximum de points pour les études analytiques (d'essais randomisés) = 32 (Excellent : 32/32, Très bien : 26 à 31/32, Bien : 21 à 25/32, Assez bien : 17 à 20/32, Passable : 15 ou 16/32).

Utilisation de la TMS dans l'épilepsie : efficacité, sécurité, modulation de l'excitabilité corticale et cartographie

Parmi ces applications thérapeutiques, la TMS a montré des résultats prometteurs dans le traitement de l'épilepsie pharmacorésistante [9,32,34,56,69,70]. Les résultats ont révélé que les études de haute qualité méthodologique mettent en évidence de possibles bénéfices de la rTMS pour réduire la fréquence des crises chez les patients.es atteints.es d'épilepsie pharmacorésistante. La méta-analyse Hsu et *al.* [9] a inclus 11 études portant sur 164 participants et a révélé une réduction significative des crises, notamment pour les patients.es souffrant d'épilepsie néocorticale ou de dysplasie corticale (taille d'effet : 0,71). La rTMS à basse fréquence (≤ 1 Hz) a démontré un effet antiépileptique favorable, bien que temporaire. Quant à celle de Mishra et *al.* [34], elle a montré une réduction significative de la fréquence des crises et des décharges épileptiformes. Toutefois, cette étude présentait un biais de publication et l'efficacité n'a été notée que dans une seule étude en Chine portant sur 60 patients.es. De plus, la méta régression a révélé que ces effets bénéfiques diminuent avec le temps, soulignant la nature à court terme de la rTMS.

Dans leur méta-analyse, Cooper et *al.* [56] ont exploré l'effet de la rTMS à basse fréquence chez des patients.es jeunes (< 21 ans), montrant une meilleure efficacité pour cette population, mais avec des effets thérapeutiques plus modestes (30% de réduction des crises). Une stimulation ciblée et l'utilisation de bobines en forme de 8 ont été associées à de meilleurs résultats. En somme, ces types d'études, jugés d'excellente qualité dans ce travail, suggèrent que la rTMS peut être une option thérapeutique efficace et complémentaire pour l'épilepsie pharmacorésistante, mais des traitements répétés ou des protocoles optimisés pourraient être nécessaires pour prolonger ses bénéfices. En revanche, les études de synthèse de la littérature et originales de moindre qualité méthodologique que les précédentes sur le même sujet [5,12,25,36,45,55] ont produit des résultats moins concluants. Bien que la TMS soit parfois bien tolérée, ces travaux ont révélé des preuves insuffisantes ou incertaines quant à son efficacité.

L'évaluation de la sécurité de la TMS chez les patients.es épileptiques a révélé un profil globalement favorable à travers les études incluses [1,8,18,36,42,44,54,60,63–66,68–71]. Ces études, dont 13 sont des revues de littérature ou méta-analyses [8,36,42,44,54,63–66,69–71] et recommandations [60], rapportent un faible risque de crises induites (se situant entre 1 et 6 % dans la période immédiatement post-traitement chez des patients épileptiques) et des effets secondaires mineurs, comme les céphalées ou les étourdissements.

Bae et *al.* [54] ont inclus 28 études regroupant 287 participants et ont constaté que les crises induites par la rTMS étaient rares (1,4 %), avec des effets secondaires légers fréquents, tels que des céphalées (9,6 %). Aucun état de mal épileptique n'a été rapporté. Pereira et *al.* [63] en examinant 46 études et 446 patients.es, ont confirmé les conclusions de Bae et *al.* [54], rapportant que 85 % des effets secondaires étaient légers, tandis que le risque global de crises restait faible (2,9 %). De plus, ils ont conclu que la rTMS est presque aussi sûre chez les patients.es épileptiques que chez les individus non épileptiques. Aussi, dans une revue exhaustive de la littérature sur la rTMS et ses indications thérapeutiques, Lefaucheur et *al.* [60] ont montré que la rTMS est une méthode sûre pour les patients.es épileptiques, bien que son efficacité dans le traitement des

épilepsies ne soit pas encore clairement établie. De même, dans une vaste cohorte pédiatrique (500 études TMS), Braden et *al.* [1] ont signalé une incidence de crises de 5,8 %, souvent chez des patients.es présentant une épilepsie réfractaire ou une réduction des antiépileptiques. Quant à Taylor et *al.* [68], qui ont étudié les taux de crises induites par la rTMS chez des patients.es à travers une enquête sur les quatre fabricants d'appareils de TMS les plus utilisés (Brainsway, Magstim, MagVenture et Neuronetics), ils sont parvenus à estimer que le risque absolu de crise avec la rTMS est faible, avec un taux global de crises de 0,31 pour 10 000 séances [95 % IC : 0,18 ; 0,48] et de 0,71 pour 1 000 patients.es [95 % IC : 0,42 ; 1,11]. Toutefois, le traitement générique par bobine H de Brainsway semble être associé à un risque relatif plus élevé que le traitement générique par bobine en forme de 8.

En ce qui concerne l'efficacité et la sécurité combinées, Walton et *al.* [69] ont évalué les données portant sur l'utilisation de la rTMS chez les personnes atteintes d'épilepsie pharmacorésistante et leurs résultats ont montré que la rTMS est sûre et, dans certains cas, efficace pour réduire les décharges épileptiformes à l'EEG. Cependant, les preuves de l'efficacité de la rTMS pour réduire les crises sont encore insuffisantes en raison de la variabilité des rapports techniques et des résultats. Aussi, Yang et *al.* [70] ayant réalisé une revue systématique et une méta-analyse en réseau pour comparer l'efficacité et la sécurité de différentes interventions dans le traitement de l'épilepsie réfractaire, ont montré que l'effet de la rTMS n'est pas efficace et en change pas la fréquence des crises par rapport au placebo. Cependant, les thérapies médicamenteuses étaient plus efficaces pour réduire la fréquence des crises. Enfin, Zeiler et *al.* [71], avec leur revue systématique sur l'utilisation de la rTMS dans le traitement de l'état de mal épileptique et de l'état de mal épileptique réfractaire, ont souligné que la rTMS peut avoir un impact potentiel sur le contrôle des crises, bien que la durabilité de la thérapie soit de courte durée. Ces études, évaluées de « Bien » à « Excellent », soutiennent que la rTMS, lorsqu'elle est utilisée dans des conditions appropriées, est une intervention sûre, même pour des populations cliniquement complexes comme les enfants.

En outre, neuf études menées sur l'excitabilité corticale ont également utilisé la TMS comme outil pour explorer les mécanismes sous-jacents de l'épilepsie et évaluer les effets des traitements, notamment les antiépileptiques [5,46–53] dont cinq revues de la littérature avec ou sans méta-analyse. Des travaux de meilleure qualité méthodologique ont démontré l'utilité de la TMS pour évaluer l'excitabilité corticale [46,48,51], guider les interventions chirurgicales et explorer la latéralisation du langage [10,15,72–76,78].

L'étude de Andreasson et *al.* [46] menée auprès de 55 enfants épileptiques a évalué les seuils moteurs au repos (rMT) et l'inhibition intracorticale à l'aide de la TMS avant et après l'administration d'antiépileptiques. Les résultats ont montré une augmentation significative des seuils moteurs après traitement, particulièrement avec des médicaments tels que le valproate. Cela indique une réduction de l'excitabilité corticale liée à l'efficacité des traitements. Ces données suggèrent que la TMS pourrait fournir des biomarqueurs utiles pour suivre la réponse aux antiépileptiques (pronostique). Similairement, la revue systématique et méta-analyse de 14 essais incluant 265 patients.es épileptiques et 424 témoins de Brigo et *al.* [48] a mis en évidence une hyperexcitabilité cortico-spinale spécifique à l'épilepsie myoclonique juvénile, tout en soulignant l'absence de preuves suffisantes pour d'autres sous-types d'épilepsie

généralisée idiopathique. Quant à Hamed et *al.* [49], dans leur étude cas-témoins impliquant 40 patients.es atteints.es d'épilepsie du lobe temporal et 20 témoins, les chercheurs ont observé des différences significatives dans l'inhibition intracorticale et les périodes de silence cortical. Les patients.es épileptiques présentaient une hyperexcitabilité corticale, corrélée à la gravité de leurs crises, ce qui a mis en évidence l'impact des antiépileptiques sur les mécanismes d'inhibition intracorticale et confirmé un usage potentiel de la TMS pour explorer ces dynamiques. Aussi, Hu et *al.* [51] ayant examiné 46 patients.es atteints.es d'épilepsie unilatérale du lobe temporal et 16 témoins ont noté que les patients.es épileptiques avaient présenté une hyperexcitabilité motrice corticale significative, en particulier ceux ayant des crises tonico cloniques bilatérales.

En comparant la TMS à d'autres techniques comme l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) et l'électrocorticographie gamma élevée (hgECoG), Babajani-Feremi et *al.* [72] ont montré une concordance élevée dans la cartographie du langage. La TMS est apparue comme un outil complémentaire efficace pour identifier les zones linguistiques critiques. Chez des patients.es pédiatriques subissant une chirurgie de l'épilepsie, la cartographie langagière par TMS naviguée a montré une sensibilité de 68 % et une spécificité de 76 %, démontrant sa fiabilité en complément des approches conventionnelles comme la stimulation corticale directe [73]. Cependant, son utilisation seule présente un taux élevé de faux positifs : 24 % des patients pourraient avoir une évaluation erronée de leur zone du langage, et dans 32 % des cas, aucune conclusion ne pourrait être tirée. De plus, Schramm et *al.* [78] ayant évalué l'applicabilité de la nTMS dans la chirurgie pédiatrique de l'épilepsie, ont montré que la cartographie motrice basée sur la TMS naviguée est faisable et efficace chez les patients.es pédiatriques épileptiques. Aucun effet indésirable n'a été observé pendant ou après les cartographies, et aucune crise n'a été provoquée. L'étude conclut que la nTMS est une méthode bien tolérée pour cartographier le cortex moteur chez les patients.es pédiatriques épileptiques. Enfin, dans la revue des applications cliniques de la nTMS pour la cartographie motrice et du langage, Lefaucheur et Picht [15] soulignent que la cartographie motrice préopératoire par nTMS est une technique valide et utile pour optimiser la planification chirurgicale et réduire le risque de déficit moteur postopératoire. Dans leur étude, la cartographie du langage par nTMS a également révélé un profil de risque favorable, sans occurrence de crises induites, ce qui, selon les auteurs, justifie son utilisation systématique en pratique clinique. Tous ces résultats soutiennent l'efficacité et la sécurité de la TMS naviguée pour la cartographie du langage et motrice selon certaines conditions, pouvant offrir des outils précieux pour la planification chirurgicale et la préservation des fonctions critiques chez les patients.es épileptiques. Il est à noter que la moitié des études de cette catégorie a été évaluée comme « Assez bien » à « Très bien » [72,73,75,78] — toutes étant des recherches originales — , tandis que l'autre moitié a été jugée « Passable » [10,15,74,76] dont deux étaient des lignes directrices [10,15].

Par ailleurs, selon le type d'épilepsie, diverses études se sont concentrées spécifiquement sur les patients.es présentant : l'épilepsie focale [12,46,49–51,62,75] dont celle du lobe temporal [12,49,51] ; sur l'état de mal épileptique [64,65,71] ; l'épilepsie réfractaire [1,4,5,9,32,34,36,55,56,58,59,61,69,70] ; l'épilepsie en général [4,5,8,10,12,15,25,28,29,34,36,40,42,44–48,50–54,57,58,60,61,63–72,74–78]. Ces études fournissent des informations précieuses sur les différentes formes d'épilepsie,

leurs caractéristiques spécifiques et les approches thérapeutiques adaptées, contribuant ainsi à une meilleure compréhension et gestion de cette maladie complexe.

TMS pour un usage pédiatrique

Les résultats des études sur la TMS et son utilisation pédiatrique ont montré une diversité d'applications et de considérations de sécurité. Par exemple, Andreasson et *al.* [46] ont rapporté que la TMS est sécuritaire pour les enfants atteints d'épilepsie d'apparition récente, avec une augmentation des seuils moteurs au repos après traitement antiépileptique. Ils avaient, pour ce faire, dans leur étude, utilisé la TMS à impulsion unique et appariée avec la version eXimia NBS et Nexstim Ltd., démontrant que cette technologie est sécuritaire pour les enfants. De même, Braden et *al.* [1] ont examiné la sécurité de la TMS naviguée avec des dispositifs de Nexstim Plc. chez les enfants atteints d'épilepsie ou de tumeur cérébrale. L'étude a montré que la cartographie fonctionnelle par TMS a été réussie chez plus de 90 % des patients.es, avec une incidence de 5,8 % de crises et de 10,6 % de douleurs au site de stimulation. Leur étude souligne bien que généralement sécuritaire, certaines contre-indications absolues et relatives doivent être prises en compte, telles que la présence de matériaux ferromagnétiques dans la tête ou l'utilisation de certains médicaments psychotropes. Ces études ont mis en lumière l'importance de la personnalisation des protocoles de TMS en fonction des caractéristiques individuelles des patients.es pédiatriques pour maximiser les bénéfices thérapeutiques tout en minimisant les risques [1,46].

D'autres recherches, comme celles de Cooper et *al.* [56] et Lehtinen et *al.* [73], ont identifié des facteurs prédictifs et des défis spécifiques à l'utilisation de la TMS chez les enfants. Cooper et *al.* [56] ont mené une recherche sur l'efficacité de la rTMS chez les jeunes patients.es, en particulier ceux âgés de 21 ans ou moins. Leur étude a révélé que la rTMS pourrait être efficace chez les jeunes patients.es, en particulier ceux âgés de 21 ans ou moins, et que l'utilisation de bobines en forme de huit est associée à de meilleures réponses au traitement. Lehtinen et *al.* [73] ayant comparé la cartographie du langage par TMS naviguée (nTMS) à la stimulation corticale directe chez des patients.es pédiatriques et adultes subissant une chirurgie de l'épilepsie, avaient conclu que la nTMS est cliniquement utile et sûre chez les enfants. Toutefois, ils ont souligné les défis liés à la préparation et aux pauses nécessaires pour les enfants, qui tolèrent généralement moins bien la douleur induite par le stimulus. Ces études montrent encore une fois que, bien que la TMS soit prometteuse pour le traitement de divers troubles neurologiques chez les enfants, des ajustements spécifiques et une attention particulière aux besoins individuels sont essentiels pour assurer la sécurité et l'efficacité du traitement [56,73].

Ces résultats, dans leur ensemble, issus d'études classées « Excellent » ou « Très bien », illustrent les multiples bénéfices de la TMS chez les enfants, notamment dans la modulation de l'excitabilité corticale, la cartographie fonctionnelle et le traitement de l'épilepsie (voir **Tableau 4**). Cependant, des études mettent également en lumière la nécessité d'une personnalisation des protocoles en fonction des besoins individuels des patients.es, afin de maximiser l'efficacité tout en minimisant les risques [1,8,36,56,62,66,73,77,78].

Tableau 4 : Caractéristiques des études sur la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) dans une population pédiatrique

Auteur et année	Type de technologie	Sécuritaire pour usage pédiatrique ?	Autre
Andreasson et al., 2020 [46]	TMS à impulsion unique et appariée réalisée avec Nexstim Ltd., Helsinki, Finlande	Oui	n.d.
Braden et al., 2022 [1]	TMS navigué réalisée avec Nexstim Plc., Helsinki, Finlande et Nexspeech ; Nexstim Inc., Atlanta, GA, États-Unis	Oui*	<p>Contre-indications absolues : matériau ferromagnétique dans la tête, lignes intracardiaques, augmentation de la pression intracrânienne, implant cochléaire sensible, neurostimulation</p> <p>Contre-indications relatives : pompes à médicaments implantées, dérivations ventriculo-péritonéales programmables, maladie systémique grave, médicaments antipsychotiques (clozapine, olanzapine et quétiapine), médicaments contre l'anxiété (alprazolam), médicaments antidépresseurs (bupropion, antidépresseurs tricycliques), médicaments traitant les troubles obsessionnels compulsifs (clomipramine).</p>
Cooper et al., 2018 [56]	n.d.	Oui	<p>Facteurs prédictifs : âge moyen ≤ 21 ans, la rTMS s'est révélée significativement plus efficace et la bobine en forme de 8 était associée à une meilleure réponse au traitement</p>
Lehtinen et al., 2018 [73]	nTMS réalisée avec la version Nexstim eXimia NBS 3.2.2 et Nexstim NBS 4.3 avec un module NEX-SPEECH (Nexstim Oy, Helsinki, Finlande).	Oui	<p>Défis : préparation et pauses nécessaires pour les enfants. En moyenne, les enfants supportent moins bien la douleur induite par le stimulus, et sa minimisation est particulièrement importante pour eux, ainsi que pour les patients.es plus âgés ayant des troubles cognitifs importants</p>
Mukherjee et al., 2018 [62]	rTMS à basse fréquence (0,3 Hz) sur vertex administrée avec Magstim Rapid2 et bobine en forme de 8	Non	<p>Contre-indications : interactions médicamenteuses</p>
Pasichnik et al., 2022 [74]	Nexstim 4.3/5.1 (Nexstim, Finlande) avec bobine en forme de huit	Oui	n.d.
Schramm et al., 2021 [78]	Nexstim eXimia NBS version 4.3, Nexstim Plc	Oui	<p>Facteurs prédictifs : âge et nombre d'électrodes</p>
Starnes et al., 2019 [36]	n.d.	Oui	<p>Risques : crises, maux de tête légers</p> <p>Défis : séances répétées nécessaires</p>

* : population à prédominance pédiatrique, **TMS** : stimulation magnétique transcrânienne, **NBS** : stimulation cérébrale naviguée (Navigated Brain Stimulation), **n.d.** : non disponible, **GA** : Georgia (État des États-Unis), **rTMS** : stimulation magnétique transcrânienne répétitive, **nTMS** : stimulation magnétique transcrânienne Naviguée, **Hz** : Hertz (unité de fréquence).

Tableau 4 (suite) : Caractéristiques des études sur la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) dans une population pédiatrique

Auteur et année	Type de technologie	Sécuritaire pour usage pédiatrique ?	Autre
Stultz et al., 2020 [66]	n.d.	Oui	<p>Principaux facteurs de risque associés aux crises liées à la TMS : maladie cardiaque, augmentation de la pression intracrânienne, médicaments qui abaissent le seuil épileptogène, consommation de cocaïne et autres drogues épileptogènes</p> <p>Autres facteurs de risque (situations) associés aux crises liées à la TMS : antécédents personnels de crise-accident vasculaire cérébral-épilepsie-commotions cérébrales, antécédents familiaux de tumeurs cérébrales, troubles de l'alimentation, maladies neurologiques avec seuil épileptogène altéré, manque de sommeil, la consommation excessive de caféine/stimulants/cocaïne, consommation du MDMA, consommation de théophylline, sevrage alcoolique, sevrage des benzodiazépines, troubles électrolytiques (diminution du sodium, modification de la glycémie), autres médicaments qui abaissent le seuil épileptogène, dépression, troubles démyélinisants (comme la sclérose en plaques), fièvre</p>
Tavakoli & Heidarpanah, 2023 [8]	n.d.	Oui	n.d.
Tremblay et al., 2019 [77]	n.d.	Oui	<p>Facteurs d'influence : médicaments, position/l'angle de la bobine, intensité de stimulation et conditions de contrôle, nombreux troubles cliniques</p> <p>Défis : artefacts EEG, standardisation des analyses</p>

TMS : stimulation magnétique transcrânienne, **MDMA** : 3,4-méthylène-dioxyméthamphétamine (aussi connu sous le nom d'ecstasy), **n.d.** : non disponible, **EEG** : électroencéphalogramme.

Ces ajustements, comme le montre le tableau ci-dessus, incluent la prise en compte des contre-indications, l'utilisation de dispositifs adaptés, et une gestion optimisée de la douleur et du confort chez les jeunes patients.es. Une exception notable à l'efficacité perçue de la TMS est l'étude prospective randomisée, contrôlée en double aveugle de Mukherjee et *al.* [62]. Cette recherche, réalisée en milieu hospitalier, avait évalué l'utilisation de la rTMS à basse fréquence (0,3 Hz) appliquée au vertex chez 32 patients.es pédiatriques atteints.es d'épilepsie focale. En utilisant le dispositif Magstim Rapid2 avec une bobine en forme de huit, l'étude n'a trouvé aucun effet antiépileptique significatif entre la rTMS et la stimulation factice. Cependant, comme précédemment souligné, son succès repose sur une approche individualisée et une attention particulière aux spécificités de cette population.

En outre, les études sur la population pédiatrique ont révélé que la mise en œuvre de la TMS nécessite une formation spécialisée pour les cliniciens et professionnels de santé afin de garantir une utilisation sûre et efficace de la technologie [66,77]. De plus, ces études ont montré que l'installation de la TMS nécessite des équipements spécifiques et des infrastructures adaptées, ce qui peut représenter un investissement important pour les établissements de santé. Un des principaux avantages de la TMS est sa non-invasivité, ce qui la rend attrayante pour les patients.es pédiatriques et réduit les risques associés aux procédures invasives. Chez la population pédiatrique, les études ont montré qu'elle permet une cartographie possiblement suffisante des fonctions corticales, ce qui est crucial pour les interventions chirurgicales et le traitement de l'épilepsie [1,46,56,73,74]. Les principaux risques, bien que faibles, identifiés par ces auteurs, incluent la possibilité de crises, en particulier chez les patients.es épileptiques, ainsi que des effets secondaires tels que les maux de tête et les douleurs locales, qui sont courants, mais généralement transitoires et bien tolérés [1,36].

En conclusion, les études sur la population pédiatrique ont montré que, la TMS est une technologie prometteuse et généralement sécuritaire pour un usage pédiatrique, avec des applications cliniques potentielles dans le traitement de l'épilepsie et la cartographie motrice et du langage. Cependant, des défis organisationnels et formatifs doivent être surmontés pour une implantation réussie, et les risques doivent être soigneusement gérés [1,10,15,34,36,46,56,60,66,72,73].

Utilisation de la TMS dans les établissements de santé étudiés

Seuls deux établissements situés au Québec — l'Université Laval et le CHUM — en plus du nôtre ont participé à cette évaluation. Ces établissements incluent respectivement leur département ou service suivant : l'École des Sciences de la réadaptation ; le département de psychiatrie spécialisé dans la neuromodulation ; et les cliniques des maladies neurovasculaires et neuro-inflammatoires. Les trois professionnels ayant répondu à l'enquête se distinguent par leurs rôles variés, notamment neurologue, professeur agrégé-chercheur, et infirmière clinicienne. Le tableau suivant (voir **Tableau 5**) présente les principaux résultats des données collectées auprès de ces trois établissements participants. Bien que le taux de réponse à l'enquête soit limité, ces cas offrent un aperçu contextuel et des perspectives comparatives intéressantes. La durée moyenne consacrée par les répondants pour remplir l'enquête a été de 25 minutes, avec une variation allant de 18 à 37 minutes.

Tableau 5 : Comparaison des caractéristiques et pratiques de la TMS dans différents établissements

Catégories	CHUM	Université Laval	CHUSJ
		<i>Technologie, Population et Pathologie</i>	
Département/Service	Psychiatrie - Neuromodulation	École des Sciences de la réadaptation	Neurologie
Rôle du participant	Infirmière clinicienne	Professeur agrégé et chercheur	Clinicien des maladies neurovasculaires et neuro-inflammatoires
Technologie et équipement	Magventure (2012) Theta burst (2, 20 Hz) Brainsway (2021) 20 Hz	Magstim	n.a.
Pathologies traitées	Troubles de l'humeur, TOC	Lombalgie, réadaptation AVC, Cartographie fonctionnelle motrice, Cartographie fonctionnelle langagière	Réadaptation AVC
Population cible	Adultes	Adultes	Enfants et adolescents (6-18 ans)
Pertinence pédiatrique	R.A.S.	Potentiellement sous conditions (respect des lignes directrices pour pédiatrie)	R.A.S.
Risques et défis pédiatriques	Adaptations nécessaires, rassurer parents	R.A.S.	Pas de risques additionnels
Effets indésirables observés	Céphalée, sensibilité locale	Céphalée, maux de cou, étourdissement, spasme musculaire, nausée, acouphène	Céphalée, humeur transitoire, inconfort local
		<i>Pratiques cliniques</i>	
Durée d'une session	30 minutes	40-45 minutes (20 minutes de stimulation)	n.d.
Fréquence des sessions	1/jour (L-V) ou accéléré (3/jour)	10 séances de rTMS pendant 8 semaines (dans l'essai clinique)	n.d.
Nombre de sessions/an	3 300	1 400 (140 participants, 10 sessions chacun) Essai pilote en cours	n.a.
Nombre de patients.es au cours de l'année écoulée	Des centaines	Une dizaine de patients.es et quelques dizaines de participants sains.es (études fondamentales)	n.a.
Évaluation de l'efficacité	Échelles de notation	Échelles douleur/incapacité fonctionnelle	n.a.

AVC : accident vasculaire cérébral ; CHUM : Centre hospitalier de l'Université de Montréal ; CHUSJ : Centre hospitalier universitaire Sainte-Justine ; L-V : lundi au vendredi ; n.a. : non applicable ; n.d. : non disponible ; R.A.S. : Rien à signaler ; rTMS : stimulation magnétique transcrânienne répétitive ; TMS : stimulation magnétique transcrânienne ; TOC : trouble obsessionnel compulsif.

Tableau 5 (suite) : Comparaison des caractéristiques et pratiques de la TMS dans différents établissements

Catégories	CHUM	Université Laval	CHUSJ
		<i>Sécurité et Évaluation des Risques</i>	
Mesures de sécurité	Présence permanente d'une infirmière	Formation des intervenants par l'équipe de recherche, procédure en cas de convulsion et/ou évanouissement mise en place et affichée dans le local	Dépistages de contre-indications (les mêmes que pour une IRM) incluant la présence d'implants métalliques divers, sélection des patients.es
Critères d'éligibilité	n.d.	Dépendent des pathologies et des études	AVC ischémique subaigu ou chronique, AVC hémorragique subaigu ou chronique
Contre-indications	Implants crâniens ferromagnétiques, antécédents de traumatisme crânien avec perte de conscience, antécédents de toxicomanie dans les trois à six mois précédant le traitement	Implants métalliques ferreux crâniens, stimulateur cardiaque (« <i>pacemaker</i> ») et pompes implantées, grossesses, antécédents personnels d'épilepsie, lésion cérébrale focale, étude en douleur	Implants métalliques ferreux crâniens, stimulateur cardiaque et pompes implantées, antécédents personnels d'épilepsie
Minimisation des risques	Tests de contrôle (exemple : EEG, IRM) avant les traitements, recherches et consultations des dossiers provenant d'autres établissements (exemple : neurologie, neuropsychologie, etc.)	Positionnement d'une électrode sur le trapèze comme suggéré par les guides de sécurité et arrêt immédiat de la séance si des réponses à la stimulation migre de la main vers le trapèze, mise en place d'une procédure en cas de convulsion ou d'évanouissement, bouchons fournis aux participants pendant la stimulation, explication de tous les risques aux participants dans un feuillet d'information	Personnalisation du protocole de stimulation, sélection des patients.es
		<i>Facilitateurs et Défis</i>	
Facilitateurs de la TMS	Expertise, recherche, promotion innovation, nombre d'infirmières dédiées à la neuromodulation	Aide FCI Leader	Développement clinique
Difficultés ou défis	<i>Service</i> : renforcer la collaboration interéquipes, réunions régulières, accès rapide aux ressources en urgence <i>Patient.e</i> : tolérance variable, ajustements protocoles, retards, non-respect des règles	Aucun	R.A.S.
Autres informations	Concentration sur la sécurité et rassurer le ou la patient.e	R.A.S.	Acquisition récente, peu d'expérience

AVC : accident vasculaire cérébral ; CHUM : Centre hospitalier de l'Université de Montréal ; CHUSJ : Centre hospitalier universitaire Sainte-Justine ; EEG : électroencéphalogramme ; FCI : Fonds de convergence et d'innovation ; IRM : imagerie par résonance magnétique ; n.a. : non applicable ; n.d. : non disponible ; R.A.S. : rien à signaler ; TMS : stimulation magnétique transcrânienne.

L'enquête réalisée a permis de collecter des données détaillées sur les dispositifs, pathologies et pratiques liées à la TMS. Les dispositifs utilisés différaient selon les centres : le CHUM utilise Magventure (depuis 2012) et Brainsway (depuis 2021), avec des caractéristiques telles que le TBS à des fréquences de 2 Hz et 20 Hz. Les pathologies traitées variaient également : des troubles de l'humeur, le TOC, la lombalgie, les cartographies fonctionnelles motrice et langagière, et la réadaptation AVC. La durée des sessions est de 30 minutes par patient.e au CHUM (pratique clinique), et de 40 à 45 minutes à l'Université Laval (recherche en laboratoire), incluant l'installation et la confirmation des paramètres. Une étude pilote à l'Université Laval utilise un paradigme TBS de 5 minutes de stimulation. En termes de fréquence, le CHUM propose une session par jour du lundi au vendredi, avec des options de traitement accéléré (3 sessions par jour). L'Université Laval prévoit dans ses essais cliniques 10 séances de rTMS sur 8 semaines. Le volume annuel est significatif : 3 300 sessions au CHUM contre 1 400 à l'Université Laval, où 140 participants ont effectué chacun 10 sessions. Un essai pilote à l'Université Laval recrute actuellement une dizaine de participants atteints d'aphasies secondaires à un AVC. Le nombre de patients.es traités.es est de plusieurs centaines au CHUM et une dizaine de patients.es et quelques dizaines de participants sains à l'Université Laval.

L'évaluation de l'efficacité des traitements reposait sur des échelles de notation au CHUM et sur des échelles spécifiques à la douleur et à l'incapacité fonctionnelle à l'Université Laval. Les mesures de sécurité ont inclus la présence permanente d'une infirmière au CHUM, ainsi que la formation des intervenants et des protocoles d'urgence à l'Université Laval. Malgré l'absence actuelle d'utilisation de la TMS chez les enfants dans ces établissements, l'Université Laval, au moment de cette évaluation, considérait cette option pertinente pour des populations pédiatriques, à condition de respecter des lignes directrices strictes.

Les effets indésirables rapportés dans ces établissements comprenaient des céphalées, une sensibilité au site de stimulation, un inconfort local, des douleurs au cou, des étourdissements, des spasmes musculaires, des nausées et des acouphènes. Ces observations sont conformes aux résultats de la revue de la littérature scientifique précédemment présentés dans ce rapport. De même les contre-indications incluant les implants crâniens ferromagnétiques, les antécédents de traumatisme crânien et de toxicomanie au CHUM, les implants métalliques ferreux, stimulateurs cardiaques et pompes implantées, grossesses, et l'épilepsie corroborent les données de la littérature. Pour minimiser les risques, le CHUM procède à des tests préalables (EEG, IRM), tandis que l'Université Laval garantit un positionnement précis des électrodes et fournit des bouchons d'oreilles aux participants, en les informant des risques via un feuillet explicatif.

Les principaux défis mis en lumière par cette enquête portent sur l'adaptation des protocoles aux besoins individuels, la tolérance variable des patients.es et la coordination entre équipes multidisciplinaires. Malgré ces obstacles, les priorités majeures restent la sécurité et l'efficacité des traitements, avec un engagement constant dans l'amélioration des pratiques, qu'il s'agisse de contextes adultes ou pédiatriques. Enfin, pour l'introduction réussie de la TMS, les facilitateurs identifiés par les participants via cette enquête incluaient : l'expertise, le nombre d'infirmières dédiées, la collaboration, les données et projets de recherche au CHUM et le soutien financier à l'Université Laval.

Conclusion et recommandations

Ce rapport a évalué l'utilisation de la TMS dans le traitement de l'épilepsie, en se concentrant sur son efficacité, sa sécurité et ses perspectives cliniques, notamment chez les enfants. La population cible comprend les patients.es épileptiques, en particulier les enfants et adolescents, avec des sous-groupes spécifiques tels que l'épilepsie pharmacorésistante, l'épilepsie focale, l'épilepsie du lobe temporal et l'état de mal épileptique. Les interventions examinées ont inclus diverses modalités de TMS, notamment la stimulation à impulsion unique, à impulsions appariées et répétitives, appliquées à l'aide de dispositifs comme Nexstim, Magstim, Magventure et Brainsway. Les protocoles de stimulation étudiés se répartissaient généralement entre les basses fréquences (≤ 1 Hz) et les hautes fréquences (> 5 Hz).

Les traitements comparateurs ont inclus les MAC, les interventions chirurgicales et d'autres techniques de neuromodulation, tels que la stimulation cérébrale profonde. Les groupes de contrôle ont été constitués de patients.es recevant des traitements factices ou standards. Les principaux résultats analysés comprenaient : l'efficacité (réduction de la fréquence des crises, amélioration de la qualité de vie et modulation de l'excitabilité corticale), la sécurité (incidence des effets secondaires et risques de crises induites par la TMS), des bénéfices diagnostiques (cartographie fonctionnelle préopératoire et évaluation de l'excitabilité corticale), et des défis cliniques (personnalisation des protocoles, gestion des contre-indications et formation des cliniciens).

Compte tenu du coût relativement faible de cette technologie en termes de dépenses de soins pour les patients.es [44,58], ainsi que des données de la littérature et de la pratique recueillies et de la qualité méthodologique des études incluses dans cette évaluation, nous recommandons de :

1. Intégrer la TMS au CHUSJ

Mettre en place la TMS comme une option thérapeutique complémentaire ou adjuvante pour les patients.es pédiatriques atteints.es d'épilepsie, en particulier ceux souffrant d'épilepsie pharmacorésistante. La TMS pourrait également être utilisée pour la cartographie fonctionnelle motrice et du langage (exemple de la cartographie préopératoire chez les enfants candidats à une chirurgie de l'épilepsie). Aussi, l'accès à des appareils adaptés, notamment les bobines en forme de 8, est essentiel pour maximiser les bénéfices de cette technologie. La TMS présente un potentiel significatif sur les plans thérapeutique, diagnostique et pronostique.

Impact attendu : Amélioration de la sécurité, de l'efficacité des diagnostics, des traitements et des pronostics.

2. Former les cliniciens et le personnel

Mettre en place des formations pour les cliniciens et le personnel de santé sur les protocoles d'utilisation de la TMS. Ces formations doivent inclure la gestion des contre-indications et des mesures de sécurité rigoureuses (tests préalables comme EEG et IRM, protocoles d'urgence en cas de crises induites), la prévention et la prise en charge des effets secondaires.

Impact attendu : Renforcement des compétences des équipes médicales pour une utilisation optimale de la TMS.

3. Adapter les protocoles aux besoins individuels

Personnaliser les protocoles de TMS en fonction des caractéristiques des patients.es, notamment l'âge, le type d'épilepsie et la tolérance au traitement. Utiliser des dispositifs et des paramètres spécifiques pour maximiser les bénéfices et réduire les risques. Par ailleurs, établir un suivi à long terme des patients.es pour évaluer les bénéfices durables et identifier d'éventuelles limites (effets transitoires ou nécessité de répéter les protocoles).

Impact attendu : Réduction des risques liés aux effets secondaires et aux crises induites.

4. Documenter les pratiques cliniques

Collecter systématiquement des données sur l'efficacité et la sécurité de la TMS chez les populations pédiatriques (réduction de la fréquence des crises, amélioration de la qualité de vie, effets secondaires). Ces données permettront une réévaluation continue des protocoles et leur ajustement en fonction des retours d'expérience et des nouvelles études.

Impact attendu : Production de données probantes pour appuyer l'adoption et l'expansion de la TMS.

5. Informer et soutenir les familles

Communiquer avec les parents pour leur expliquer les bénéfices et les risques liés à la TMS et leur proposer un accompagnement psychologique et éducatif pour les aider à comprendre et gérer le traitement.

Impact attendu : Renforcement de la confiance des familles et meilleure adhésion au traitement.

6. Renforcer la collaboration interdisciplinaire

Pour une prise en charge fluide et complète des patients.es, intégrer la TMS dans les pratiques cliniques du CHUSJ via des réunions régulières entre les équipes de neurologie, psychiatrie, physiothérapie et neurochirurgie. Une meilleure coordination permettra d'optimiser les suivis et de considérer l'expansion de la TMS à d'autres indications.

Impact attendu : Amélioration de la continuité des soins, optimisation des pratiques cliniques et élargissement des perspectives d'utilisation de la TMS grâce à une meilleure synergie entre les équipes interdisciplinaires.

Effectivement, certaines données issues de cette évaluation suggèrent également que la TMS pourrait être envisagée pour le traitement d'autres pathologies neuropsychiatriques, telles que l'AVC, l'aphasie post-AVC, les ataxies cérébelleuses, la démence secondaire, les troubles de l'humeur, la dépression, la dysphagie post-AVC, la dystonie, la maladie d'Alzheimer, la maladie de Huntington, la maladie de Parkinson, la schizophrénie, la sclérose en plaques, le syndrome de Gilles de la Tourette, le TDAH, la thérapie de sevrage tabagique, le TOC, le traumatisme crânien, le tremblement essentiel, les troubles du mouvement, les troubles du spectre autistique, et d'autres [10,37,60,77]. Toutefois, quelle que soit la pathologie, il serait également pertinent de considérer l'utilisation d'un auto-questionnaire pour la sélection des candidats à la TMS [60].

Toutes ces recommandations visent à maximiser les bénéfices cliniques de la TMS, tout en assurant la sécurité des patients.es et en favorisant une meilleure collaboration entre les équipes.

Références

1. Braden AA, Weatherspoon SE, Boardman T, et al. Image-guided TMS is safe in a predominately pediatric clinical population. *Clin Neurophysiol.* 2022;137:193-206. doi:10.1016/j.clinph.2022.01.133
2. Vlachos I, Kugiumtzis D, Tsalikakis DG, Kimiskidis VK. TMS-induced brain connectivity modulation in Genetic Generalized Epilepsy. *Clin Neurophysiol.* 2022;133:83-93. doi:10.1016/j.clinph.2021.10.011
3. Shorvon SD. The causes of epilepsy: Changing concepts of etiology of epilepsy over the past 150 years. *Epilepsia.* 2011;52(6):1033-1044. doi:10.1111/j.1528-1167.2011.03051.x
4. Wang Z, Zhang X, Meiduo G, Song M, Wang S. Time-effectiveness of low-frequency rTMS for epilepsy and improvement in cognitive function in patients: A systematic review and meta-analysis. *Epilepsy Res.* 2024;199:107277. doi:10.1016/j.eplepsyres.2023.107277
5. Hamed SA. Cortical excitability in epilepsy and the impact of antiepileptic drugs: transcranial magnetic stimulation applications. *Expert Rev Neurother.* 2020;20(7):707-723. doi:10.1080/14737175.2020.1780122
6. Stafstrom CE, Carmant L. Seizures and Epilepsy: An Overview for Neuroscientists. *Cold Spring Harb Perspect Med.* 2015;5(6):a022426. doi:10.1101/cshperspect.a022426
7. Kalsner J, Cross JH. New epilepsy treatment in children: upcoming strategies and rewind to ancient times and concepts. *Paediatr Child Health.* 2018;28(10):474-479. doi:10.1016/j.paed.2018.07.008
8. Tavakoli H, Heidarpanah A. A Literature Review of the Efficacy of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation on Epilepsy. *Iran J Child Neurol.* 2023;17(1):9-28. doi:10.22037/ijcn.v17i2.38752
9. Hsu WY, Cheng CH, Lin MW, Shih YH, Liao KK, Lin YY. Antiepileptic effects of low frequency repetitive transcranial magnetic stimulation: A meta-analysis. *Epilepsy Res.* 2011;96(3):231-240. doi:10.1016/j.eplepsyres.2011.06.002
10. Lefaucheur JP, André-Obadia N, Antal A, et al. Evidence-based guidelines on the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS). *Clin Neurophysiol.* 2014;125(11):2150-2206. doi:10.1016/j.clinph.2014.05.021
11. Balestrini S, Sander JW. Transcranial magnetic stimulation as a biomarker of treatment response in children with epilepsy. *Dev Med Child Neurol.* 2020;62(7):770-770. doi:10.1111/dmcn.14496
12. Ebrahim AA, Tungu A. Neuromodulation for temporal lobe epilepsy: a scoping review. *Acta Epileptol.* 2022;4(1):25. doi:10.1186/s42494-022-00086-0
13. Kimiskidis VK, Valentin A, Kälviäinen R. Transcranial magnetic stimulation for the diagnosis and treatment of epilepsy. *Curr Opin Neurol.* 2014;27(2):236-241. doi:10.1097/WCO.000000000000071
14. Labar D, Dean A. Neurostimulation therapy for epilepsy. *Curr Neurol Neurosci Rep.* 2002;2(4):357-364. doi:10.1007/s11910-002-0011-8
15. Lefaucheur JP, Picht T. The value of preoperative functional cortical mapping using navigated TMS. *Neurophysiol Clin Neurophysiol.* 2016;46(2):125-133. doi:10.1016/j.neucli.2016.05.001
16. Lopez MR, Kanner AM. Neuropsychiatric Treatments for Epilepsy: Nonpharmacological Approaches. *Semin Neurol.* 2022;42(02):182-191. doi:10.1055/s-0042-1742582
17. Mosilhy EA, Alshial EE, Eltaras MM, et al. Non-invasive transcranial brain modulation for neurological disorders treatment: A narrative review. *Life Sci.* 2022;307:120869. doi:10.1016/j.lfs.2022.120869
18. Rosenstock T, Schneider H, Neymeyer ML, et al. Analysis of bihemispheric language function in pediatric neurosurgical patients using repetitive navigated transcranial magnetic stimulation. *J Neurosurg Pediatr.* 2024;34(1):19-29. doi:10.3171/2024.2.PEDS23598
19. Salehinejad MA, Siniatchkin M. Safety of noninvasive brain stimulation in children. *Curr Opin Psychiatry.* 2024;37(2):78-86. doi:10.1097/YCO.0000000000000923
20. Aderinto N, Olatunji G, Muili A, et al. A narrative review of non-invasive brain stimulation techniques in neuropsychiatric disorders: current applications and future directions. *Egypt J Neurol Psychiatry Neurosurg.* 2024;60(1):50. doi:10.1186/s41983-024-00824-w
21. Alqahtani F, Imran I, Pervaiz H, et al. Non-pharmacological Interventions for Intractable Epilepsy. *Saudi Pharm J.* 2020;28(8):951-962. doi:10.1016/j.jsps.2020.06.016
22. Barker AT, Jalinous R, Freeston IL. Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex. *Lancet Lond Engl.* 1985;1(8437):1106-1107. doi:https://sci-hub.se/10.1016/s0140-6736(85)92413-4
23. Rotenberg A. Prospects for Clinical Applications of Transcranial Magnetic Stimulation and Real-Time EEG in Epilepsy. *Brain Topogr.* 2010;22(4):257-266. doi:10.1007/s10548-009-0116-3
24. Kobayashi M, Pascual-Leone A. Transcranial magnetic stimulation in neurology. *Lancet Neurol.* 2003;2(3):145-156. doi:10.1016/S1474-4422(03)00321-1
25. Pang S, D'Ambrosio S, Battaglia G, et al. The impact of Transcranial Magnetic Stimulation (TMS) on seizure course in people with and without epilepsy. *Clin Neurophysiol Pract.* 2022;7:174-182. doi:10.1016/j.cnp.2022.05.005
26. Downs SH, Black N. The feasibility of creating a checklist for the assessment of the methodological quality both of randomised and non-randomised studies of health care interventions. *J Epidemiol Community Health.* 1998;52(6):377-384. doi:10.1136/jech.52.6.377
27. Joanna Briggs Institute. Critical Appraisal Checklist for Systematic Reviews and Research Syntheses. Published online 2017. https://jbi.global/sites/default/files/2019-05/JBI_Critical_Appraisal_Checklist_for_Systematic_Reviews2017_0.pdf
28. Hemond CC, Fregni F. Transcranial Magnetic Stimulation in Neurology: What We Have Learned From Randomized Controlled Studies. *Neuromodulation.* 2007;10(4):333-344. doi:10.1111/j.1525-1403.2007.00120.x

29. Noohi S, Amirjalali S. History, Studies and Specific Uses of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (rTMS) in Treating Epilepsy. *Iran J Child Neurol.* 2016;10(1):1-8. Accessed December 30, 2024. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4815479/>
30. Al-Otaibi FA, Hamani C, Lozano AM. Neuromodulation in Epilepsy. *Neurosurgery.* 2011;69(4):957-979. doi:10.1227/NEU.0b013e31822b30cd
31. Frye RE, Rotenberg A, Ousley M, Pascual-Leone A. Transcranial Magnetic Stimulation in Child Neurology: Current and Future Directions. *J Child Neurol.* 2008;23(1):79-96. doi:10.1177/0883073807307972
32. Carrette S, Boon P, Dekeyser C, et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation for the treatment of refractory epilepsy. *Expert Rev Neurother.* 2016;16(9):1093-1110. doi:10.1080/14737175.2016.1197119
33. Al-Sultan F, Al-Zahrani A, Al-Kahtani F, Al-Thaqib A, Al-Mousa A, Bashir S. The future of transcranial magnetic stimulation in neuroscience and neurology in the Middle East. *Eur Rev Med Pharmacol Sci.* 2019;23(10).
34. Mishra A, Maiti R, Mishra BR, Jena M, Srinivasan A. Effect of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation on Seizure Frequency and Epileptiform Discharges in Drug-Resistant Epilepsy: A Meta-Analysis. *J Clin Neurol.* 2020;16(1):9-18. doi:10.3988/jcn.2020.16.1.9
35. Gonsalvez I, Spagnolo P, Dworetzky B, Baslet G. Neurostimulation for the treatment of functional neurological disorder: A systematic review. *Epilepsy Behav Rep.* 2021;16:100501. doi:10.1016/j.ebr.2021.100501
36. Starnes K, Miller K, Wong-Kisiel L, Lundstrom BN. A Review of Neurostimulation for Epilepsy in Pediatrics. *Brain Sci.* 2019;9(10):283. doi:10.3390/brainsci9100283
37. Afifi SY. A new era of current and future treatment applications of transcranial magnetic stimulation. *Egypt J Neurol Psychiatry Neurosurg.* 2024;60(1):54. doi:10.1186/s41983-024-00825-9
38. Weiler M, Stieger KC, Long JM, Rapp PR. Transcranial Magnetic Stimulation in Alzheimer's Disease: Are We Ready? *eNeuro.* 2020;7(1). doi:10.1523/ENEURO.0235-19.2019
39. Zimmerman M, Hummel FC. Non-Invasive Brain Stimulation: Enhancing Motor and Cognitive Functions In Healthy Old Subjects. *Front Aging Neurosci.* 2010;2. doi:10.3389/fnagi.2010.00149
40. Gefferie SR, Jiménez-Jiménez D, Visser GH, et al. Transcranial magnetic stimulation-evoked electroencephalography responses as biomarkers for epilepsy: A review of study design and outcomes. *Hum Brain Mapp.* 2023;44(8):3446-3460. doi:10.1002/hbm.26260
41. Yang Y, Han Y, Wang J, et al. Effects of altered excitation–inhibition imbalance by repetitive transcranial magnetic stimulation for self-limited epilepsy with centrottemporal spikes. *Front Neurol.* 2023;14. doi:10.3389/fneur.2023.1164082
42. Schrader LM, Stern JM, Koski L, Nuwer MR, Engel J. Seizure incidence during single- and paired-pulse transcranial magnetic stimulation (TMS) in individuals with epilepsy. *Clin Neurophysiol.* 2004;115(12):2728-2737. doi:10.1016/j.clinph.2004.06.018
43. Allen CH, Kluger BM, Buard I. Safety of Transcranial Magnetic Stimulation in Children: A Systematic Review of the Literature. *Pediatr Neurol.* 2017;68:3-17. doi:10.1016/j.pediatrneurol.2016.12.009
44. VanHaerents S, Chang BS, Rotenberg A, Pascual-Leone A, Shafi MM. Noninvasive Brain Stimulation in Epilepsy. *J Clin Neurophysiol.* 2020;37(2):118. doi:10.1097/WNP.0000000000000573
45. Somaa FA, de Graaf TA, Sack AT. Transcranial Magnetic Stimulation in the Treatment of Neurological Diseases. *Front Neurol.* 2022;13. doi:10.3389/fneur.2022.793253
46. Andreasson AC, Sigurdsson GV, Pegenius G, Thordstein M, Hallböök T. Cortical excitability measured with transcranial magnetic stimulation in children with epilepsy before and after antiepileptic drugs. *Dev Med Child Neurol.* 2020;62(7):793-798. doi:10.1111/dmcn.14490
47. Bauer PR, Kalitzin S, Zijlmans M, Sander JW, Visser GH. Cortical excitability as a potential clinical marker of epilepsy: a review of the clinical application of transcranial magnetic stimulation. *Int J Neural Syst.* 2014;24(02):1430001. doi:10.1142/S0129065714300010
48. Brigo F, Storti M, Benedetti MD, et al. Resting motor threshold in idiopathic generalized epilepsies: A systematic review with meta-analysis. *Epilepsy Res.* 2012;101(1):3-13. doi:10.1016/j.epilepsyres.2012.03.020
49. Hamed SA, Tohamy AM, Mohamed KO, el Mageed Abd el Zaher MA. The Effect of Epilepsy and Antiepileptic Drugs on Cortical Motor Excitability in Patients With Temporal Lobe Epilepsy. *Clin Neuropharmacol.* 2020;43(6):175. doi:10.1097/WNF.0000000000000412
50. Helling RM, Shmueli S, Bauer PR, Tolner EA, Visser GH, Thijs RD. Tracking cortical excitability dynamics with transcranial magnetic stimulation in focal epilepsy. *Ann Clin Transl Neurol.* 2022;9(4):540-551. doi:10.1002/acn3.51535
51. Hu L, Yin H, Yang L, et al. Cortical Excitability in Temporal Lobe Epilepsy with Bilateral Tonic-Clonic Seizures. *Can J Neurol Sci.* 2021;48(5):648-654. doi:10.1017/cjn.2020.267
52. Lin Y, Wang Y. Neurostimulation as a promising epilepsy therapy. *Epilepsia Open.* 2017;2(4):371-387. doi:10.1002/epi4.12070
53. Tsuboyama M, Kaye HL, Rotenberg A. Review of Transcranial Magnetic Stimulation in Epilepsy. *Clin Ther.* 2020;42(7):1155-1168. doi:10.1016/j.clinthera.2020.05.016
54. Bae EH, Schrader LM, Machii K, et al. Safety and tolerability of repetitive transcranial magnetic stimulation in patients with epilepsy: a review of the literature. *Epilepsy Behav.* 2007;10(4):521-528. doi:10.1016/j.yebeh.2007.03.004
55. Boon P, De Cock E, Mertens A, Trinka E. Neurostimulation for drug-resistant epilepsy: a systematic review of clinical evidence for efficacy, safety, contraindications and predictors for response. *Curr Opin Neurol.* 2018;31(2):198. doi:10.1097/WCO.0000000000000534

56. Cooper YA, Pianka ST, Alotaibi NM, et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation for the treatment of drug-resistant epilepsy: A systematic review and individual participant data meta-analysis of real-world evidence. *Epilepsia Open*. 2018;3(1):55-65. doi:10.1002/epi4.12092
57. de Goede AA, ter Braack EM, van Putten MJAM. Single and paired pulse transcranial magnetic stimulation in drug naïve epilepsy. *Clin Neurophysiol*. 2016;127(9):3140-3155. doi:10.1016/j.clinph.2016.06.025
58. Kwon CS, Ripa V, Al-Awar O, Panov F, Ghatan S, Jetté N. Epilepsy and Neuromodulation—Randomized Controlled Trials. *Brain Sci*. 2018;8(4):69. doi:10.3390/brainsci8040069
59. Larkin M, Meyer RM, Szuflița NS, et al. Post-Traumatic, Drug-Resistant Epilepsy and Review of Seizure Control Outcomes from Blinded, Randomized Controlled Trials of Brain Stimulation Treatments for Drug-Resistant Epilepsy. *Cureus*. 2016;8(8). doi:10.7759/cureus.744
60. Lefaucheur JP, André-Obadia N, Poulet E, et al. Recommandations françaises sur l'utilisation de la stimulation magnétique transcrânienne répétitive (rTMS) : règles de sécurité et indications thérapeutiques. *Neurophysiol Clin Neurophysiol*. 2011;41(5):221-295. doi:10.1016/j.neucli.2011.10.062
61. Mahajan UV, Parker JJ, Williams NR, et al. Adjunctive repetitive transcranial magnetic stimulation delivers superior quality of life for focal epilepsy compared to anti-epileptic drugs: A meta-analytic utility prediction study. *Brain Stimul Basic Transl Clin Res Neuromodulation*. 2020;13(2):430-432. doi:10.1016/j.brs.2019.12.006
62. Mukherjee N, Sinha VK, Goyal N, Mondal G, Srikanthie U. Efficacy of Adjunctive low frequency (0.3 Hz) rTMS over vertex in localization related epilepsy in Children and adolescent: A Randomized double-blinded sham controlled study. *Indian Journal of Psychiatry*. https://www.researchgate.net/publication/355020540_efficacy_of_adjunctive_low_frequency_03_hz_rtms_over_vertex_in_localization_related_epilepsy_in_children_and_adolescent_a_randomized_double-blinded_sham_controlled_study. 2018.
63. Pereira LS, Müller VT, Gomes M da M, Rotenberg A, Fregni F. Safety of repetitive transcranial magnetic stimulation in patients with epilepsy: A systematic review. *Epilepsy Behav*. 2016;57:167-176. doi:10.1016/j.yebeh.2016.01.015
64. San-juan D, Dávila-Rodríguez DO, Jiménez CR, et al. Neuromodulation techniques for status epilepticus: A review. *Brain Stimul Basic Transl Clin Res Neuromodulation*. 2019;12(4):835-844. doi:10.1016/j.brs.2019.04.005
65. Stavropoulos I, Pak HL, Valentin A. Neuromodulation in Super-refractory Status Epilepticus. *J Clin Neurophysiol*. Published online November 2021:494. Accessed December 30, 2024. https://journals.lww.com/clinicalneurophys/abstract/2021/11000/neuromodulation_in_super_refractory_status.6.aspx
66. Stultz DJ, Osburn S, Burns T, Pawlowska-Wajswol S, Walton R. Transcranial Magnetic Stimulation (TMS) Safety with Respect to Seizures: A Literature Review<p>. *Neuropsychiatr Dis Treat*. 2020;16:2989-3000. doi:10.2147/NDT.S276635
67. Tassinari CA, Cincotta M, Zaccara G, Michelucci R. Transcranial magnetic stimulation and epilepsy. *Clin Neurophysiol*. 2003;114(5):777-798. doi:10.1016/S1388-2457(03)00004-X
68. Taylor JJ, Newberger NG, Stern AP, et al. Seizure risk with repetitive TMS: Survey results from over a half-million treatment sessions. *Brain Stimul Basic Transl Clin Res Neuromodulation*. 2021;14(4):965-973. doi:10.1016/j.brs.2021.05.012
69. Walton D, Spencer DC, Nevitt SJ, Michael BD. Transcranial magnetic stimulation for the treatment of epilepsy. *Cochrane Database Syst Rev*. 2021;(4). doi:10.1002/14651858.CD011025.pub3
70. Yang Y, Shangquan Y, Wang X, et al. The efficacy and safety of third-generation antiseizure medications and non-invasive brain stimulation to treat refractory epilepsy: a systematic review and network meta-analysis study. *Front Neurol*. 2024;14. doi:10.3389/fneur.2023.1307296
71. Zeiler FA, Matuszczak M, Teitelbaum J, Gillman LM, Kazina CJ. Transcranial Magnetic Stimulation for Status Epilepticus. *Epilepsy Res Treat*. 2015;2015(1):678074. doi:10.1155/2015/678074
72. Babajani-Feremi A, Narayana S, Rezaie R, et al. Language mapping using high gamma electrocorticography, fMRI, and TMS versus electrocortical stimulation. *Clin Neurophysiol*. 2016;127(3):1822-1836. doi:10.1016/j.clinph.2015.11.017
73. Lehtinen H, Mäkelä JP, Mäkelä T, et al. Language mapping with navigated transcranial magnetic stimulation in pediatric and adult patients undergoing epilepsy surgery: Comparison with extraoperative direct cortical stimulation. *Epilepsia Open*. 2018;3(2):224-235. doi:10.1002/epi4.12110
74. Pasichnik A, Tsuboyama M, Jannati A, et al. Discrepant expressive language lateralization in children and adolescents with epilepsy. *Ann Clin Transl Neurol*. 2022;9(9):1459-1464. doi:10.1002/acn3.51594
75. Vitikainen AM, Salli E, Lioumis P, Mäkelä JP, Metsähonkala L. Applicability of nTMS in locating the motor cortical representation areas in patients with epilepsy. *Acta Neurochir (Wien)*. 2013;155(3):507-518. doi:10.1007/s00701-012-1609-5
76. Zhang X, Zhang G, Yu T, et al. Multitask preoperative language mapping in epilepsy surgery: A combination of navigated transcranial magnetic stimulation and extra-operative electrical cortical stimulation. *J Clin Neurosci*. 2020;79:259-265. doi:10.1016/j.jocn.2020.07.029
77. Tremblay S, Rogasch NC, Premoli I, et al. Clinical utility and prospective of TMS–EEG. *Clin Neurophysiol*. 2019;130(5):802-844. doi:10.1016/j.clinph.2019.01.001
78. Schramm S, Mehta A, Auguste KI, Tarapore PE. Navigated transcranial magnetic stimulation mapping of the motor cortex for preoperative diagnostics in pediatric epilepsy. *J Neurosurg Pediatr*. 2021;28(3):287-294. doi:10.3171/2021.2.PEDS20901