
Projet Ker-EGI Kids

Création d'une base de référence pédiatrique du KErpape-Rennes-EMG
based-Gait-Index (Ker-EGI)

Centre de Kerpape

RAPPORT FINAL

(Mai 2026)

Table des matières

I.	Rappel du projet	2
1.	Contexte et besoins identifiés	2
2.	Objectifs généraux et spécifiques	3
3.	Définition des outils de mesure	4
II.	Protocole détaillé et méthodologie.....	4
1.	Type de recherche	4
2.	Population étudiée	5
3.	Déroulement de la recherche.....	5
3.1	Modalités de recrutement	5
3.2	Recueil du consentement.....	6
3.3	Déroulement de la procédure.....	8
4.	Matériel et usage.....	10
5.	Données recueillies	11
II.	Résultats obtenus et Analyses.....	11
III.	Valorisation et Perspectives	15

I. Rappel du projet

1. Contexte et besoins identifiés

Depuis plus de 30 ans, l'Analyse Quantifiée de la Marche (AQM) a fait ses preuves, tant dans la meilleure compréhension de la locomotion humaine, qu'auprès des patients ayant un patron de marche perturbé (Gonçalves et coll. 2022). En 2006, l'HAS définit l'AQM comme étant un examen indiqué pour quantifier des troubles complexes de la marche chez l'adulte et l'enfant ayant un grand intérêt en termes de bénéfices thérapeutiques (Saint-Pierre F., 2006).

Selon l'HAS (2006), l'analyse de la marche se distingue classiquement par :

- Une Analyse d'Observation de la Marche (AOM), représentant des mesures qualitatives issues de l'examen clinique médical et de l'examen vidéographique (2D) de celle-ci.
- L'Analyse Quantifier de la Marche (AQM) à proprement parlé, représentant des mesures quantitatives issues de données cinématiques, cinétiques, électromyographiques (EMG de surface : sEMG), et de leurs couts énergétiques.

Cependant, peu de centres ont accès à une AQM complète nécessitant un système de capture du mouvement 3D précis (le plus souvent composés de caméras infrarouges) et un temps d'ingénierie pour le traitement des données.

La configuration jugée idéale pour réaliser une AQM complète nécessite un système de capture du mouvement 3D précis (le plus souvent composés de caméras infrarouges) et, par conséquent, un temps d'ingénierie pour le traitement des données. Cependant, peu de centres ont accès à ces matériels et ces ressources humaines de haute technicité.

Le centre de Kerpape a la chance de disposer de matériel spécifique et dédié, permettant de réaliser une partie conséquente de cette analyse de la marche. Ainsi, nous collectons en plus des données médicales issues de l'examen clinique (mesures anthropométriques : taille, poids, longueurs des jambes) :

- Des données vidéographiques issues de 2 caméras (plan frontal et sagittal).
- Des paramètres spatio-temporels du mouvement recueillis par un tapis de capteurs de pression résistif GaitRite®.
- Des données électromyographiques de surface recueillies par le système EMG COMETA mesurant l'activité électrique des muscles des membres inférieurs et leur activation respective pendant le cycle de la marche.

En pédiatrie, la grande majorité des recherches concernent les enfants atteints de Paralyse Cérébrale (PC). Dans le cadre de leur suivi, les multiples analyses de la démarche, au travers d'une analyse de marche, permettent de mieux comprendre son évolution pendant la croissance et facilite le diagnostic des praticiens en complétant l'examen clinique, et les guide dans leurs démarches thérapeutiques (chirurgicales, médicamenteuses ou rééducatives). De plus, elle éprouve objectivement leurs résultats (suivi post-opératoire des chirurgies multi-sites notamment). L'analyse de marche est un critère de qualité dans la prise en charge des patients marchants.

Les données obtenues lors de l'analyse de marche au centre de Kerpape permettent d'appréhender la globalité du mouvement du système musculosquelettique des patients. Pour aider la lecture de ces données collectées, les praticiens utilisent des index validés (Gonçalves et coll., 2022) :

Les données vidéographiques sont analysées par l'Edinburgh Visual Gait Score (EVGS), index initialement décrit pour la prise en charge des patients PC (Read et coll. 1999). C'est une mesure validée, robuste et reproductible de la qualité de la marche dans la PC (Rathinam et al., 2014) (Read et al., 2003). Il est validé également pour une utilisation chez l'adulte avec une atteinte du système nerveux central (Bervet et al., 2013).

Les paramètres spatio-temporels issus du tapis GaitRite sont analysés grâce à son index propre : le Fonctionnal Ambulatory Profile (FAP), validé en 2005 (Thorpe et al., 2005).

Les données électromyographiques (EMG de surface) sont analysées par le calcul d'un index : le Kerpape-Rennes-EMG-based-Gait-Index (Ker-EGI) défini par Bervet en 2012 (Bervet et coll. 2013 et 2014). Cet index a été conçu sur le modèle du Gait Déviation Index (Schwartz & Rozumalski, 2008), qui est l'index de référence (fiable, valide et reproductible) issu de la cinématique 3D. L'activité électrique de 7 muscles (tibialis anterior, soleus, gastrocnemius medialis, rectus femoris, vastus medialis, semitendinosus et gluteus medius) par membre inférieur est recueillie et comparée aux profils de référence d'un échantillon d'adultes valides.

Ces différentes analyses permettent de donner un tableau clinique neuromoteur plus complet dans le parcours de soins des patients.

L'index Ker-EGI n'a été référencé que pour des adultes (Bervet et coll., 2013 et 2014). Il est pourtant appliqué en pratique clinique dans le suivi des enfants. Son utilisation ne semble donc pas parfaitement adaptée car la base de données de référence actuelle n'a inclus que des participants adultes. L'objectif de recherche est donc la création d'une base de référence électromyographique de normalité pédiatrique nommée Ker-EGI Kids.

De plus, la variabilité inter-individuelle de la marche diminue au cours de l'enfance et de l'adolescence (Rygelová et al., 2023) (Voss et al., 2020), mais augmente en cas de problème neurologique. Aussi, la variabilité de la marche chez les enfants PC doit donc être interprétée en référence aux normes liées à l'âge (Prosser et al., 2022).

Nous souhaiterions établir cette référence de normalité de la marche pédiatrique pour le Ker-EGI Kids avec l'analyse de 120 enfants indemnes de toute pathologie de marche connue, âgés de 3 à 15 ans (Tulchin et al., 2009).

2. Objectifs généraux et spécifiques

OBJECTIF PRINCIPAL	Établir une base de référence chez l'enfant pour le Ker-EGI (index de quantification de la marche basé sur les profils d'activation musculaire des membres inférieurs), incluant à la fois le profil moyen et la variabilité autour du profil moyen.
OBJECTIFS SECONDAIRES	(1) Comparer la référence de normalité chez l'enfant pour le Ker-EGI Kids, à celle obtenue pour les adultes. (2) Valider le Ker-EGI Kids par confrontation à l'EVGS.
CRITERE DE JUGEMENT PRINCIPAL	Obtention d'un index de qualité avec une marge d'erreur de 10% maximum selon la méthodologie décrite par Tulchin et coll. (2009).
CRITERES DE JUGEMENT SECONDAIRES	(1) Comparaison de la référence de normalité chez l'enfant pour le Ker-EGI Kids, à celle obtenue pour les adultes. (2) Corrélation entre le Ker-EGI Kids et l'EVGS.

3. Définition des outils de mesure

- Pour le calcul du Ker-EGI, des enregistrements EMG à partir du système Cometa® du laboratoire de marche du centre de Kerpape ont été réalisés. COMETA conçoit et produit des dispositifs miniatures pour l'enregistrement de l'activité électrique du muscle (EMG) et également des centrales inertielles pour l'analyse de la cinématique du mouvement.
- Pour confirmer que la cinématique du groupe contrôle correspond bien à celle de référence, deux enregistrements vidéo (plan frontal et sagittal) ont été réalisés. Les vidéos ont ensuite été analysées via l'EVGS.
- Tapis GAITRite® : Ce système permet de quantifier les paramètres spatio-temporels de la marche. Cette évaluation ne nécessite aucune préparation du sujet. Il suffit de marcher sur la surface active pour obtenir immédiatement les caractéristiques détaillées de sa marche. Ce système est considéré comme le « gold standard » des systèmes d'analyse des paramètres spatio-temporels globaux (longueur et fréquence de pas, asymétrie des foulées, etc.).

II. Protocole détaillé et méthodologie

1. Type de recherche

Il s'agit d'une étude prospective, monocentrique, qui se déroulera au sein du laboratoire de marche du centre de Kerpape.

Les participants inclus sont des enfants sains, externes au centre de Kerpape et se déplaçant expressément au laboratoire de marche du centre de Kerpape, accompagnés d'un moins d'un des deux parents, pour participer au protocole de recherche.

Cette recherche s'inscrit donc dans le cadre d'une **Recherche Impliquant la Personne Humaine à risques et contraintes minimales (RIPH2)**, en accord avec l'arrêté du 12 avril 2018 fixant la liste des recherches mentionnées au 2° de l'article L. 1121-1 du code de la santé publique.

2. Population étudiée

TYPE DE POPULATION	NOMBRE
Enfants/Adolescents de 3 à 15 ans, indemnes de toute pathologie de marche connue	120

Critères d'inclusion :

- Enfant/adolescent de 3 à 15 ans ayant donné son accord, et dont les parents (ou le représentant légal) ont donné leur consentement pour la participation à cette étude.
- Affiliation à un régime de sécurité sociale ou bénéficiaire d'un tel régime.

Critères de non-inclusion :

- Toute pathologie connue affectant le patron de marche (membres inférieurs, membres supérieurs et rachis).
- Chirurgie orthopédique dans les antécédents médicaux.
- Trouble du comportement incompatible avec le recueil des données.

3. Déroulement de la recherche

3.1 Modalités de recrutement

Le recrutement des participants volontaires sains s'est fait via la diffusion d'une lettre d'appel à participation. Cette lettre a notamment été diffusée au personnel de Kerpape (plus de 600 salariés), par courrier électronique via la messagerie professionnelle, ou par distribution au sein des services. La participation était volontaire, aucune pression ni incitation n'ont été imposées aux professionnels.

La lettre d'appel à participation a pu être transmise à l'entourage ou circuler par bouche-à-oreille, la population à l'étude ne se limitant pas aux enfants du personnel.

La lettre contient le contact de l'investigateur. Les personnes volontaires ont ainsi pu directement prendre contact afin d'être informées de façon individuelle, complète et loyale, en termes compréhensibles, des objectifs et des contraintes de l'étude, des risques éventuels encourus, de leur droit de refuser de participer à l'étude ou de la possibilité de se rétracter à tout moment. Toutes ces informations figurent sur un document d'information qui leur a été remis. Ce document mentionne les différents moyens pour les personnes de contacter l'équipe de recherche afin de poser des questions et/ou de refuser la participation à l'étude (mail, téléphone, courrier postal).

Une affiche sera exposée au sein du centre de Kerpape pour aider au recrutement des

participants.



Illustration 1 : affiche exposée au centre de Kerpape pour faciliter le recrutement de participants

3.2 Recueil du consentement

Après un temps de réflexion, et après avoir pu poser toutes les questions nécessaires, si les participants étaient d'accord, le consentement de l'enfant/adolescent, des deux parents ou du représentant légal le cas échéant, a été demandé, ainsi que l'autorisation d'enregistrement vidéo de la passation sur le tapis de marche.

Au regard de l'Article L1122-2 du Code de la Santé Publique, pour les participants mineurs, l'obtention du consentement des deux parents, ou du représentant légal le cas échéant, a été obligatoire pour la participation à cette étude, les participants étant considérés comme des volontaires sains.

Le refus du participant mineur a primé sur l'accord des parents ou du représentant légal.

La signature du formulaire de consentement des participants mineurs est fonction de l'âge. Elle sera plus facilement obtenue pour les plus de 12 ans. Cette signature du mineur, apposée sur le document de consentement des parents n'est pas obligatoire, mais un rôle symbolique et permet surtout de responsabiliser les participants et plus notamment les adolescents.

Le formulaire de consentement a été signé en double exemplaire en présence de l'investigateur. Un exemplaire a été conservé par le participant. L'autre exemplaire est à conserver dans le classeur investigateur durant la durée de l'étude, puis à la fin de l'étude, l'ensemble des formulaires de consentements seront archivés dans une enveloppe scellée durant 15 ans.

Le formulaire de consentement a été signé avant la réalisation de tout acte nécessité par la recherche.

Qu'est-ce que j'ai le droit de faire ?



Illustration 2 : extrait de la note d'information destinées aux participants de 3 à 6 ans

NOTE D'INFORMATION DESTINÉE AUX PARTICIPANTS DE 7 à 10 ANS

Consentement

Qu'est-ce que le consentement ?

Un consentement c'est quand on s'engage entièrement à accepter ou à accomplir quelque chose. Le consentement permet de dire "oui" ou "non" et de faire respecter son choix.



Illustration 3 : extrait de la note d'information destinées aux participants de 7 à 10 ans

3.3 Déroulement de la procédure

Informations importantes

- Les enfants et leur(s) parent(s) / représentant légal ont été informés du protocole expérimental et le consentement est recueilli après un temps de réflexion
- Il a été demandé à au moins un des deux parents de rester durant la séance.
- Les enfants, accompagnés d'un des deux parents ne sont venus qu'une seule fois au laboratoire de marche du centre de Kerpape. Le temps complet d'expérimentation (préparation de l'enfant et d'enregistrement de sa marche) a duré au maximum 1 heure.
- Les électrodes imposent que les participants restent en sous-vêtements pour la séance de marche.
- L'analyse de la marche a été filmée depuis le début de la marche à la fin. Les enfants ont été invités à marcher 10x10 mètres et la captation par caméra a duré environ 10x10 secondes pour les participants, plus d'éventuels temps de pause entre chaque passage à la demande de l'enfant.

Electrodes

- Pour les plus jeunes enfants, la pose des électrodes et l'endroit où elles sont a été expliquée à l'aide d'une poupée.
- Préparation de la peau (rasage si nécessaire et nettoyage à l'alcool modifié).
- 28 électrodes de surface (type ECG) ont été placées sur le sujet selon les recommandations de la **SENIAM** (Surface Electromyography of the Non-Invasive

Assessment of Muscle -Hermens et coll., 2000-). Ces 28 électrodes correspondent à 2 côtés x 2 électrodes x 7 muscles enregistrés (tibialis anterior, soleus, gastrocnemius medialis, rectus femoris, vastus medialis, semi-tendinosus et gluteus médius).

- Des repères ont ensuite été tracés sur les jambes et le bassin à l'aide d'un crayon dermographique.



Illustration 4 : Représentation des muscles des membres inférieurs concernés par la pose des électrodes

Passages sur le tapis

Une fois équipé, l'enfant effectue 10 passages enregistrés individuellement (5 aller-retours). Les consignes données sont : « marche sur le tapis, au milieu, à ta vitesse de confort » (une démonstration et/ou un passage d'essai pourront être effectués).

Gestions de l'enregistrement vidéo

Les caméras synchronisées sont déclenchées uniquement pour filmer l'analyse de la marche (5 allers-retours) et les images sont anonymisées à la fin de chaque journée de passation grâce au script Python Deface (cf section 11.5).

Fin de la séance

Une fois les passages terminés, l'investigateur retire les électrodes et le participant est invité à se rhabiller.

Pour les plus jeunes enfants, un diplôme de réussite a été remis afin de rendre ludique la participation à la recherche.

Tableau 1 Tableau récapitulatif du déroulement de l'étude pour les participants.

Actes et procédures liées à la recherche	Pré-inclusion	Inclusion / Jour de la visite	Durée
Réception du courrier d'appel à participation (annexe 1)	X		
Prise de contact avec l'investigateur	X		

Vérification de l'éligibilité	X		
Présentation de l'étude			
Remise de la note d'information de l'étude			
Déplacement au CENTRE de Kerpape		X	
Signature du formulaire de consentement en présence de l'investigateur		X	Environ 1 heure
Recueil de données : Nom, prénom, âge, genre, taille, poids, longueurs des jambes		X	
Installation des 28 électrodes superficielles pour enregistrement EMG*		X	
5 Aller-Retours sur le tapis (10 x 10 secondes)*		X	
Enregistrement vidéo de l'analyse de la marche		X	
Remise du diplôme de réussite		X	

** Il est nécessaire que le participant soit en sous-vêtements pour permettre l'installation des électrodes et pour le passage sur le tapis.*

4. Matériel et usage

Tableau 2 : Matériel et usage

Matériel	Quantité	Description / référence	Usage
Electrodes pédiatriques	28	Electrodes ECG Kendall H124SG 30*24 mm Ref 31.1245.21	Recueil du signal EMG
Système EMG Cometa	1	Cometa - Biometrics France	Mesure de l'activité électrique des muscles des membres inférieurs et leur activation respective pendant le cycle de la marche.
Tapis GAITRite	1	GAITRite - Biometrics France	Quantification des paramètres spatio-temporels de la marche
Caméra	2	Logitech Brio Ultra 4k HD Pro Webcam	Enregistrement synchronisé en plan frontal et sagittal
Trépieds	2	Manfrotto 12BRC	Positionnement des caméras
Câblage	2	CableCreation™ USB 3.0 Active Extender	Branchement des caméras sur l'ordinateur
Ordinateur du laboratoire de marche	1	NA	Recueil et stockage des information, suppression des vidéos non-anonymisées
Script Python Deface	1	Open source	Anonymisation des vidéos

Processus d'utilisation :

1. Branchement des deux caméras sur l'ordinateur via le câble USB.
2. Installation des 28 électrodes de surface.
3. Enregistrement simultanée des caméras sur le disque dur de l'ordinateur.
4. En fin de séance, le fichier vidéo résultant est enregistré sur le disque dur local de l'ordinateur du laboratoire de marche, prévu à cet effet (accès sécurisé par un mot de passe et accès au laboratoire de marche sous clé).
5. Anonymisation des vidéos via le script python Deface.
6. Le fichier vidéo non-anonymisé est ensuite directement supprimé de l'ordinateur.

5. Données recueillies

Les données suivantes ont été recueillies dans le cadre de cette étude :

- Nom, prénom, âge, genre, taille, poids, longueurs des jambes.
- Données indirectement collectées, issues des enregistrements : paramètres cinématiques en 2D, paramètres spatio-temporels et patrons d'activation musculaire.
- Afin d'obtenir une analyse complète de la marche, il a été nécessaire de filmer les enfants marchants sur le tapis à l'aide de 2 caméras (plan frontal et sagittal). Après chaque journée de passation, ces vidéos ont été anonymisées grâce à un script python «Deface» qui s'appuie sur une détection de visage «centerface» développé par le groupe de recherche «Optimization, Robotics & Biomechanics» (ORB) de l'Université de Heidelberg. Si des visages sont trouvés, l'image est modifiée et un filtre « flou gaussien » est appliqué à l'endroit des visages. Le traitement a été effectué localement sur l'ordinateur du laboratoire de marche exécutant le script, aucune donnée n'a été envoyée à une tierce partie, ce qui garantit la confidentialité des données traitées.

II. Résultats obtenus et Analyses

Pour créer notre base pédiatrique du Ker-EGI nous souhaitons solliciter au maximum 120 enfants volontaires de 3 à 15 ans indemnes de toute pathologie de marche connue, n'ayant subi aucune pathologie affectant le ou les membres inférieurs dans les 6 mois précédents le recueil des données, sur une période de 1 an. Les enfants ne pouvant se déplacer sur Kerpape que les mercredi après-midi et pendant les vacances scolaires, nous avons prolongé de 1 an notre période d'inclusion (jusqu'en avril 2026).

Actuellement nous avons inclus 110 enfants volontaires, dont un refus et un qui a dû être exclu des résultats du fait d'un bilan sub-normal qui a été présenté au médecin référent. Nous avons donc au total 108 enfants volontaires : 57 garçons et 51 filles de 8.56 ans d'âge moyen (figure 1). Le nombre total de passages enregistrés et analysables est de 1031 avec une moyenne de 9.54 par enfant (figure 2).

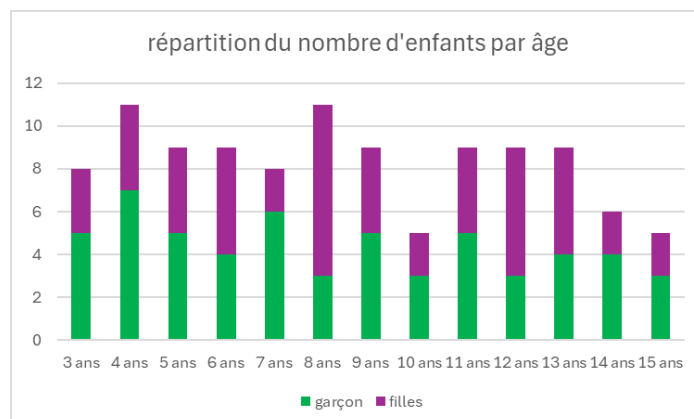


Figure 1 : Répartition des 108 enfants volontaires par genre et par âge

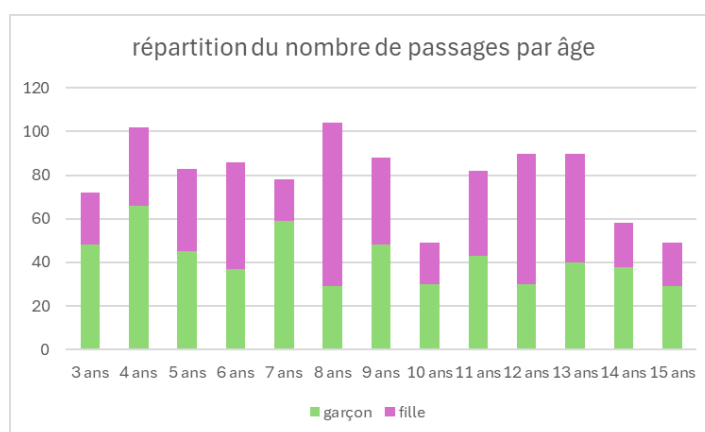


Figure 2 : Répartition des passages par genre et par âge

La campagne de mesure s'est déroulée entre avril 2024 et août 2025 et les enregistrements ont uniquement eu lieu au centre Mutualiste de Kerpape (CMKerpape). Au vu de nos premiers résultats nous avons décidé de ne pas poursuivre les inclusions.

La vitesse de marche ayant une grande influence sur les paramètres notamment cinématique de celle-ci, nous l'avons recueillie pour chacun des enfants. Comme nous pouvions nous y attendre la vitesse moyenne augmente avec l'âge pour les filles et les garçons (figure 3).

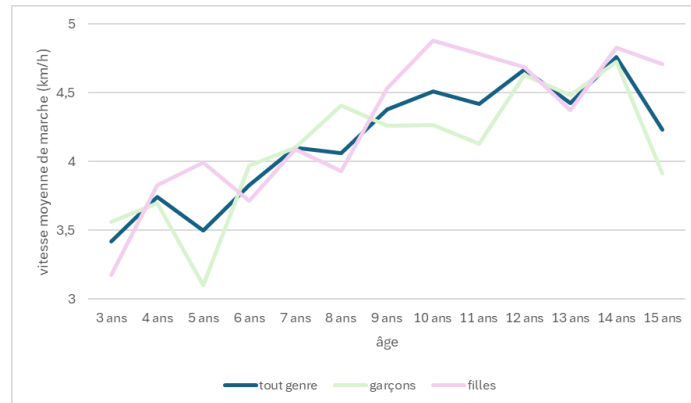


Figure 3 : Variation de la vitesse moyenne de marche en fonction du genre et de l'âge

Nos résultats intermédiaires présentés en septembre dernier sur une base intermédiaire comprenant 40 enfants se confirment. En effet, comme attendu également, avec une base de 108 enfants, les patrons d'activations musculaires sont identiques chez les enfants et les adultes, mais ce sont bien les écarts à la moyenne qui sont plus larges chez l'enfant que chez l'adulte (figure 4).

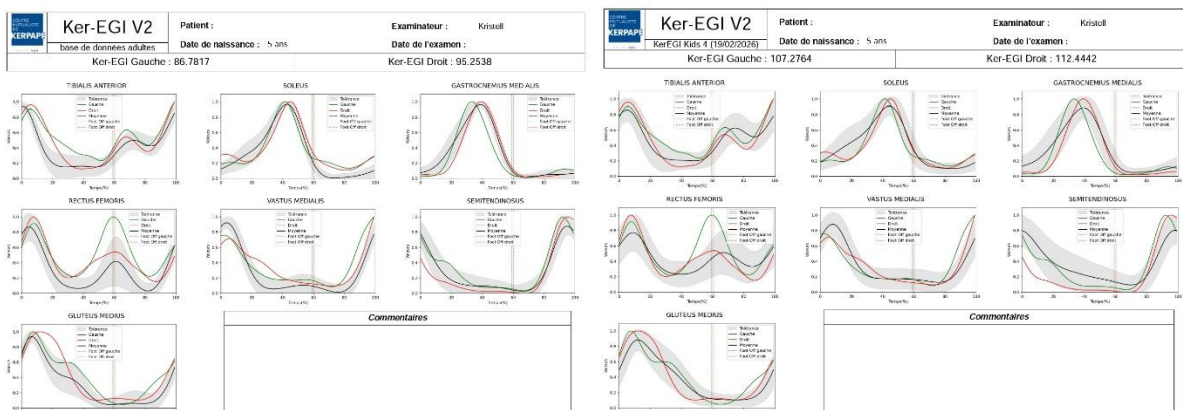


Figure 4 : Patrons d'activation musculaire d'un enfant sain de 5 ans sur base adulte à gauche et sur base pédiatrique à droite

D'autre part, les scores du Ker-EGI Kids sont systématiquement meilleurs que ceux calculés avec la base adulte (figure 5)

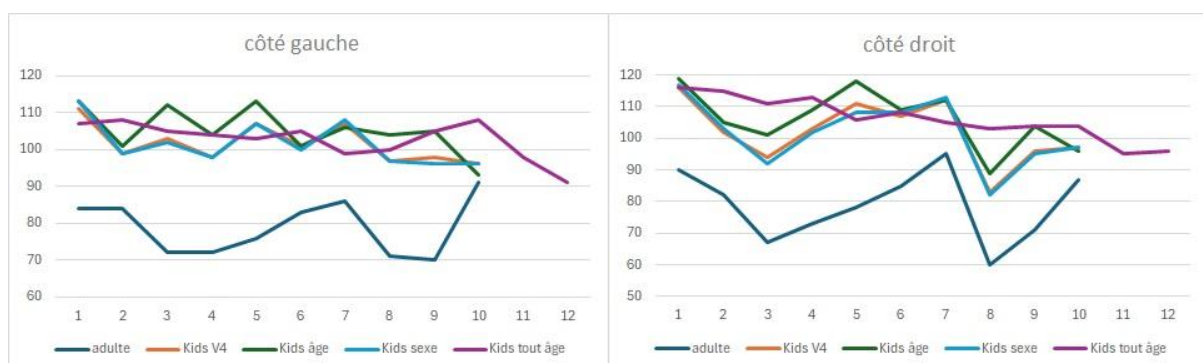


Figure 5 : Score du Kert-EGI et des Ker-EGI Kids côté gauche à gauche et droit à droite d'un enfant sain de 5 ans – base adulte ; base pédiatrique ; base 5 ans ; base filles ; « meilleur passage » pour chaque base âge sauf 5 ans

Enfin, nous avons comme hypothèse que l'âge de l'enfant, comme indicateur du développement neuro-moteur de celui-ci pouvait influencer le patron d'activation musculaire à la marche et par la même le calcul du Ker-EGI Kids. Il semblerait que non (figures 5, 6 & 7).

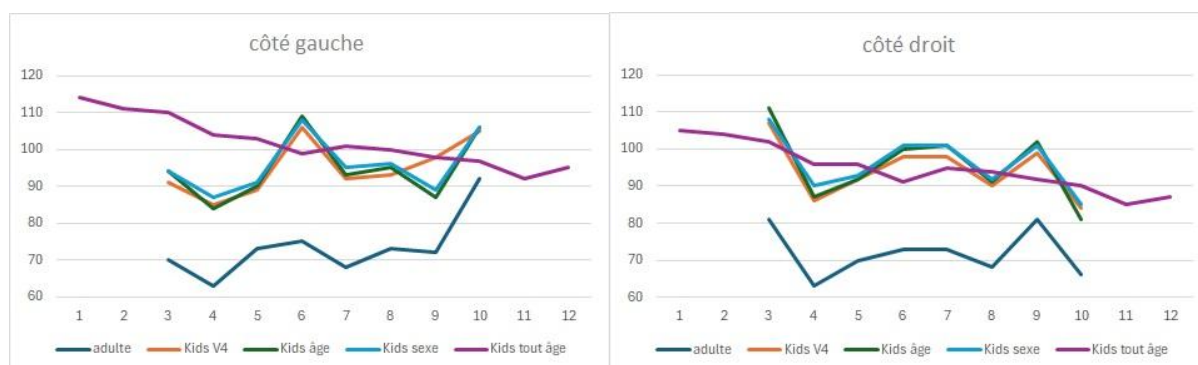


Figure 6 : Score du Kert-EGI et des Ker-EGI Kids côté gauche à gauche et droit à droite d'un enfant sain de 6 ans – base adulte ; base pédiatrique ; base 6 ans ; base garçon ; « meilleur passage » pour chaque base âge sauf 6 ans

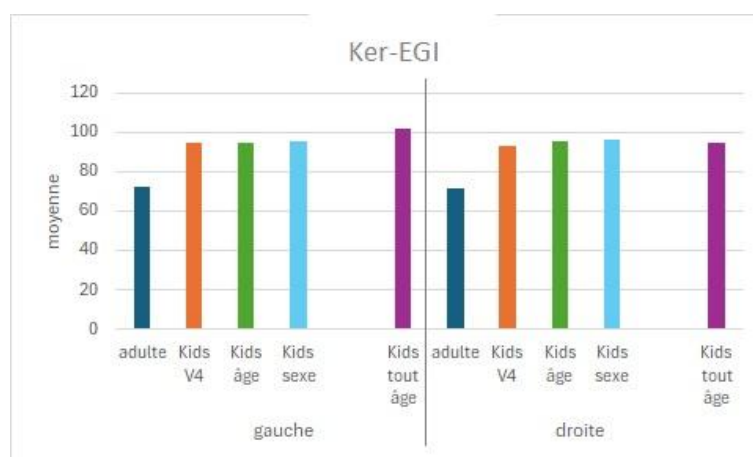


Figure 7 : Moyenne des scores du Ker-EG et des Ker-RGI Kids : base adulte ; base pédiatrique ; base 6 ans ; base garçon ; « meilleur passage » pour chaque base âge sauf 6 ans

Il nous faut encore affiner nos résultats afin d'en connaître le poids statistique.

Malgré tout, nous utilisons dès à présent la base pédiatrique dans nos bilans d'analyse de marche. Cela nous permet d'avoir des résultats d'analyse plus en adéquation avec les spécificités pédiatriques et facilite leurs interprétations pour l'équipe médicale et paramédicale en charge de l'enfant (figures 8 & 9).

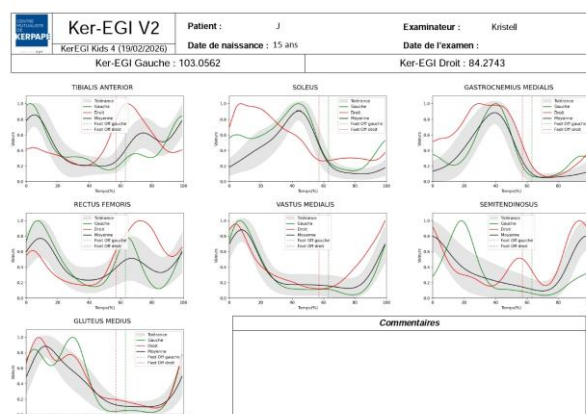
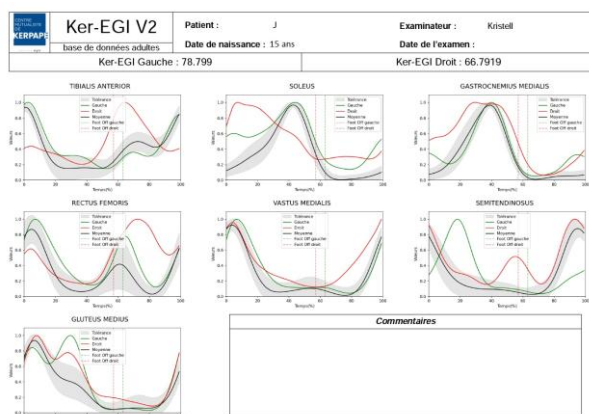


Figure 8 : Ker-EGI pour une patiente de 15 ans sur la base adulte à gauche et la base pédiatrique à droite

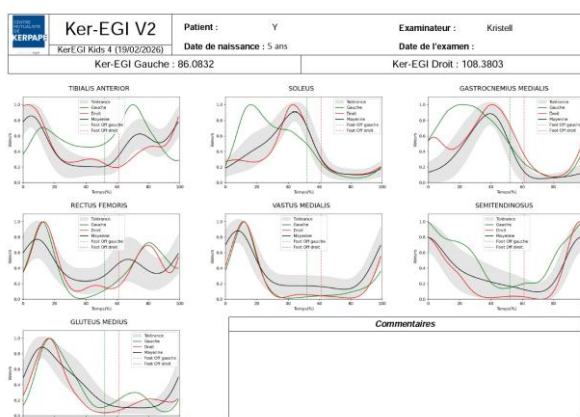
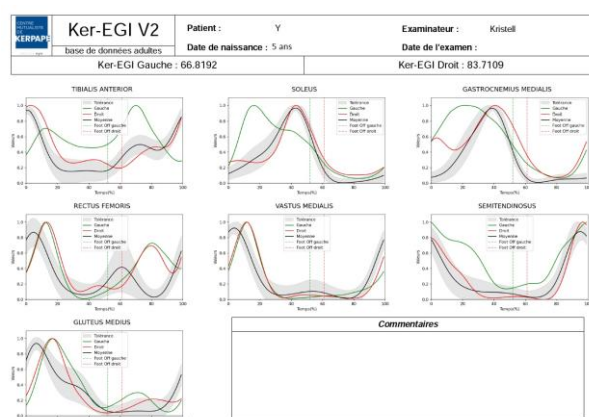


Figure 9 : Ker-EGI pour un patient de 5 ans sur la base adulte à gauche et la base pédiatrique à droite

Il nous reste à finir de traiter nos résultats et à les tester statistiquement pour finaliser ce projet d'ici la fin de l'année 2026.

III. Valorisation et Perspectives

Nous sommes donc toujours en cours de finalisation de nos résultats que nous espérons pouvoir soumettre à des revues scientifiques internationales avec comité de lecture. Nous avons également en projet de présenter nos résultats en congrès dès que possible.

En parallèle nous travaillons sur la possibilité de diffuser nos bases de données (adulte et pédiatrique) en Open Source « protégé » afin de permettre à d'autres équipes de bénéficier de notre travail et de faire vivre le Ker-EGI et le Ker-EGI Kids.