



Institut Régional de
Formation aux Métiers
de Rééducation
et de Réadaptation
Pays de la Loire
MASSO-KINESITHÉRAPIE

Institut Régional de Formation aux Métiers de la Rééducation et Réadaptation
Pays de la Loire

54, rue de la Baugerie – 44230 SAINT-SEBASTIEN SUR LOIRE

ANALYSE DE LA MARCHE HUMAINE ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

-

REVUE SYSTEMATIQUE DE LA LITTERATURE

Céline JOSSE

Mémoire UE28

Semestre 8

Année scolaire : 2019-2020

AVERTISSEMENT

Les mémoires des étudiants de l'Institut Régional de Formation aux Métiers de la Rééducation et de la Réadaptation sont réalisés au cours de la dernière année de formation MK.

Ils réclament une lecture critique. Les opinions exprimées n'engagent que les auteurs. Ces travaux ne peuvent faire l'objet d'une publication, en tout ou partie, sans l'accord des auteurs et de l'IFM3R.

RESUME

L'intelligence artificielle est une technologie actuellement en plein essor, et ce dans de très nombreux domaines (finance, armée, jeux vidéos, etc.) dont la santé. Elle y est utilisée comme aide au diagnostic ou encore comme système de prédiction. Le machine learning et le deep learning sont deux sous domaines de l'intelligence artificielle utilisés actuellement pour l'analyse de la biomécanique du mouvement en général et de la marche en particulier. L'objectif de ce travail est d'étudier la capacité de cette technologie à reconnaître un sujet parmi un groupe et si elle peut être utilisée comme système de prédiction de l'évolution d'un individu. Pour répondre à ces interrogations, une revue systématique de la littérature à partir de l'interrogation de quatre bases de données scientifiques (PubMed, Science Direct, Pedro et IEEE Xplore) a été réalisée. Les articles inclus (n=9) dégagent une valeur ajoutée de l'utilisation de cette technologie dans l'analyse de la marche. Cependant, certaines réserves sont à observer au vu des limites méthodologiques rencontrées dans les articles inclus, et sur la généralisation des méthodes à une application clinique. Malgré ces considérations, l'intelligence artificielle apparaît comme un outil prédictif intéressant à prendre en compte. Elle constitue une évolution majeure dans le système de santé des années à venir.

ABSTRACT

Artificial intelligence is an emerging technique in a lots of domains like finance, army or video games. In health, artificial intelligence is used for diagnostic or in predictive purpose. Machine learning and deep learning are classically used to study motion and gait biomechanics. This work aimed to study the ability of artificial intelligence to recognize an individual gait pattern regarding its characteristics. Furthermore, we want to assess if this technology is able to foresee the evolution of a person. For that purpose, a systematic review was conducted. Four database were checked (PubMed, Science Direct, Pedro and IEEE Xplore). Based on nine studies retrieved, the results identify the benefit of artificial intelligence in gait assessment and prediction. However, we must be cautious because of some methodological issues. Further works are needed to assess the clinical potential of this technique.

MOTS CLES/KEY WORDS

Mots clés :

- intelligence artificielle
- marche humaine
- prédiction
- risque de chute

Key words :

- artificial intelligence
- forecast
- gait
- risk of fall

SOMMAIRE

Résumé et mots clés

Abstract and key words

1. Introduction	1
2. Cadre conceptuel.....	3
2.1 L'intelligence artificielle.....	3
2.1.1 Terminologie et définitions des approches de base	3
2.1.2 Les types d'intelligence artificielle	3
2.1.3 Le machine learning et le deep learning	4
2.1.4 L'intelligence artificielle en santé.....	7
2.2 L'intelligence artificielle et la marche humaine	9
2.2.1 Le cycle de marche.....	9
2.2.2 Les paramètres spatio-temporels.....	10
2.2.3 La cinématique articulaire	11
2.2.4 La signature individuelle à la marche.....	11
2.3 L'intelligence artificielle appliquée à l'analyse de la marche humaine	13
2.3.1 La création de clusters de patients	15
2.3.2 Le machine learning appliqué à l'analyse de la marche humaine	15
3. Problématique.....	16
4. Matériel et méthodes.....	17
4.1 Stratégie de recherche bibliographique.....	17
4.2 Sélection des articles.....	19
4.3 Extraction des données	21
4.4 Analyse méthodologique des articles	21
5. Résultats et analyse des résultats.....	21
5.1 Description générale des études retenues	21
5.2 Analyse méthodologique des articles retenus	26

5.3	Utilisation de l'intelligence artificielle dans le cas de la maladie de Parkinson	29
5.4	Utilisation de l'intelligence artificielle dans le cas du risque de chute chez le sujet âgé.....	31
5.5	Utilisation de l'intelligence artificielle dans le cas de la maladie de Huntington	34
6.	Discussion.....	34
6.1	Pertinence et limites des études incluses.....	34
6.1.1	Utilisation de l'intelligence artificielle dans le cas de la maladie de Parkinson	34
6.1.2	Utilisation de l'intelligence artificielle dans le cas du risque de chute chez le sujet âgé.....	36
6.2	Applicabilité des modèles d'intelligence artificielle	38
6.3	Regard critique sur la méthodologie de travail	40
7.	Conclusion	40
	Références	p41 à 49
	Annexes	pl à XVII

1. Introduction

L'intelligence artificielle se définit comme un « *ensemble de théories et de techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence humaine* » (« Intelligence artificielle » s.d), ou plus techniquement comme « *un domaine de recherche visant à reproduire par des systèmes artificiels les diverses capacités cognitives de l'être humain* » (Wotton. D., 2018). Développée à partir des années 1950, cette technologie connaît actuellement un essor exponentiel. Des plateformes de prévisions financières aux jeux vidéo, en passant par les systèmes d'aide à la décision militaire, l'intelligence artificielle est retrouvée dans de nombreux domaines. Les bouleversements quotidiens qui en résultent rendent nécessaire une démocratisation des connaissances sur ce qu'est réellement l'intelligence artificielle. Ainsi, le gouvernement Finlandais a mis en place une plateforme en ligne de formation gratuite à destination de la population du pays (« A free online introduction to artificial intelligence for non-experts » s. d). Les cours ont été récemment rendus accessibles à toute personne dans le monde désirant s'informer et se former sur le sujet. La santé est elle aussi concernée, les avancées technologiques de plus en plus nombreuses entraînent une digitalisation croissante de ce domaine. Les applications de l'intelligence artificielle en médecine sont nombreuses : prédiction d'une pathologie et/ou de son évolution, recommandation de traitements personnalisés, systèmes d'aide à la décision diagnostique et/ou thérapeutique, chirurgie assistée, prévention, etc. (Inserm, 2018)

L'intelligence artificielle est présente dans tous les domaines de la santé et permet l'apport de bénéfices en termes de diagnostic, de personnalisation des traitements, d'économie ou de management (Horgan et al., 2019). Les premiers succès ont été obtenus en imagerie. Par exemple, une étude américaine de 2018 a mis en avant la capacité de l'intelligence artificielle à diagnostiquer le développement d'une rétinopathie chez des patients diabétiques (Abràmoff, et al., 2018 ; Demichelis, R., 2018a). A partir d'images de la rétine, le système de machine learning est capable de détecter les symptômes de la pathologie de façon spécifique et sensible. Ce logiciel, désormais autorisé à la commercialisation par la Federal and Drug Administration, suscite l'espoir de pouvoir anticiper la survenue de cette complication du diabète, et ainsi assurer un meilleur suivi aux patients concernés. Les succès de

l'intelligence artificielle dans l'imagerie sont nombreux, de telle façon qu'il est probable qu'elle soit intégrée à la routine clinique dans les années à venir (Horgan et al., 2019 ; Inserm, 2018). Dans les autres domaines médicaux, son usage permet d'ajuster les traitements médicamenteux, d'assurer un suivi à distance (Horgan et al., 2019), ou encore de suivre l'évolution de facteurs de risques (Miotto et al., 2017). Les derniers travaux sont axés sur l'utilisation de ces systèmes en tant qu'outils de prédiction. L'un des exemples les plus récents concerne la mise au point d'un système de réseau neuronal capable de prédire les chances de guérison de patients atteints d'un cancer colorectal suite à un traitement de radiochimiothérapie. L'objectif est d'estimer si le traitement est suffisant et ainsi d'éviter une intervention chirurgicale supplémentaire potentiellement inutile (Demichelis, R., 2018b). Par ailleurs, une équipe française de l'institut Mines-Télécom travaille sur l'utilisation du process mining dans le parcours de soins (l'MTech, 2019). Leur objectif est de proposer un système capable de créer des modèles de parcours typiques de patients atteints d'une pathologie donnée. A l'aide de ces graphes, ils espèrent pouvoir prédire les étapes de traitement et les évolutions possibles de la maladie afin d'anticiper et d'éviter les complications.

La robotique est « *un sous domaine spécifique de l'intelligence artificielle. Elle vise à augmenter l'autonomie des machines en les dotant de capacités perceptuelles, décisionnelles et d'action* » (Inserm, 2018). La chirurgie assistée par robot et les prothèses intelligentes en sont les exemples les plus connus. D'autres applications dérivées de la robotique peuvent être utilisées en kinésithérapie, c'est par exemple le cas du Lokomat®. Cet exosquelette robotisé des membres inférieurs est couramment employé dans la rééducation des déficits locomoteurs survenus dans le cadre de pathologies telles qu'une lésion de la moelle épinière ou encore d'un accident vasculaire cérébral (Hocoma, 2020). Une revue systématique parue en 2017 montre les effets bénéfiques à court terme de la thérapie locomotrice assistée par la robotique chez les patients présentant une lésion incomplète de la moelle spinale (Nam et al., 2017). Les patients ayant bénéficié d'un entraînement intensif sur le Lokomat® présentent une augmentation de la vitesse de marche, du périmètre de déambulation ou encore une amélioration de la force musculaire des membres inférieurs. L'utilisation des systèmes d'intelligence artificielle en kinésithérapie est à ce jour peu étudiée. Cependant, au vu des résultats prometteurs obtenus dans le

domaine médical, une transposition dans le domaine de la rééducation pourrait être envisagée avec succès.

2. Cadre conceptuel

2.1 L'intelligence artificielle

2.1.1 Terminologie et définitions des approches de base

L'intelligence artificielle est définie comme *« l'ensemble de théories et de techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence humaine »* (« Intelligence artificielle » s.d).

Son développement s'appuie sur deux approches : l'approche symbolique et l'approche numérique.

La première repose sur l'idée que le raisonnement est réalisé en appliquant des règles logiques. Durant les prémices, cette approche a permis de reproduire les mécanismes cognitifs experts. Ces systèmes s'appuient sur l'ensemble des connaissances médicales d'un domaine et sur le raisonnement de spécialistes pour aboutir à un diagnostic. Le but n'est pas de remplacer le médecin mais de, par exemple, l'épauler dans ses décisions (Inserm, 2018). Un exemple connu de ce système est le projet européen *Desiree*. Cette plateforme, basée sur une ontologie, est conçue pour aider le praticien dans le suivi de patientes atteintes d'un cancer du sein (« DESIREE project », 2020).

L'approche numérique base son raisonnement sur les données. Dans ce cas, l'algorithme apprend seul à partir d'une grande quantité de données et applique le principe essai-erreur pour, en finalité, réaliser la tâche de façon autonome. Un exemple connu de système basé sur l'approche numérique est l'algorithme entraîné à détecter les symptômes précurseurs de la rétinopathie chez des patients diabétiques (Abràmoff et al., 2018 ; Inserm, 2018).

2.1.2 Les types d'intelligence artificielle

Il existe deux courants d'intelligence artificielle : celle dite « forte » et l'autre dite « faible ».

L'intelligence artificielle « forte » a pour objectif la conception d'une machine autonome capable de raisonner comme un humain et donc de potentiellement le remplacer. Ces systèmes seraient capables d'apprentissage et d'adaptation (Inserm, 2018 ; Wotton, D., 2018).

L'intelligence artificielle dite « faible » est celle à la base de tous les systèmes retrouvés au quotidien. Le principe est de concevoir un procédé capable de reproduire un comportement spécifique pour remplacer l'homme. Les machines basées sur ce type d'intelligence artificielle sont performantes mais incapables d'apprendre et d'évoluer seules (Inserm, 2018 ; Wotton, D., 2018).

2.1.3 Le machine learning et le deep learning

L'intelligence artificielle est composée de deux sous-domaines qui se sont développés au fur et à mesure que l'usage de cette technologie s'est accru.

Le machine learning (aussi appelé apprentissage automatique) est un sous domaine de l'intelligence artificielle apparu dans les années 1980. Il s'intéresse aux capacités d'apprentissage des systèmes dans le but de reproduire un comportement, en concevant une machine en capacité d'apprendre de façon autonome à partir d'exemples (Wotton, D., 2018). L'objectif est d'obtenir des systèmes capables de mettre en évidence des patrons de classification d'éléments, et d'effectuer des prédictions à partir de données en se basant sur les statistiques, le forage de données (le deep mining), la reconnaissance de schémas et les analyses prédictives (Bastien, L., 2018a). Le machine learning est également un outil performant de fouille de données tout comme le process mining (l'MTech, 2019). L'entraînement des systèmes de machine learning nécessite l'accès à une grande quantité de données, le Big Data, dont cette science est dépendante (Bastien, L., 2018). L'apprentissage débute par une phase d'entraînement où la machine utilise une partie des données à sa disposition pour apprendre la tâche à accomplir. Elle passe ensuite par une étape de vérification où la seconde partie des données est utilisée pour permettre au système de valider ou non son apprentissage (Wotton, D., 2018). Les éléments présentés concernant le machine learning sont résumés par la Figure 1.

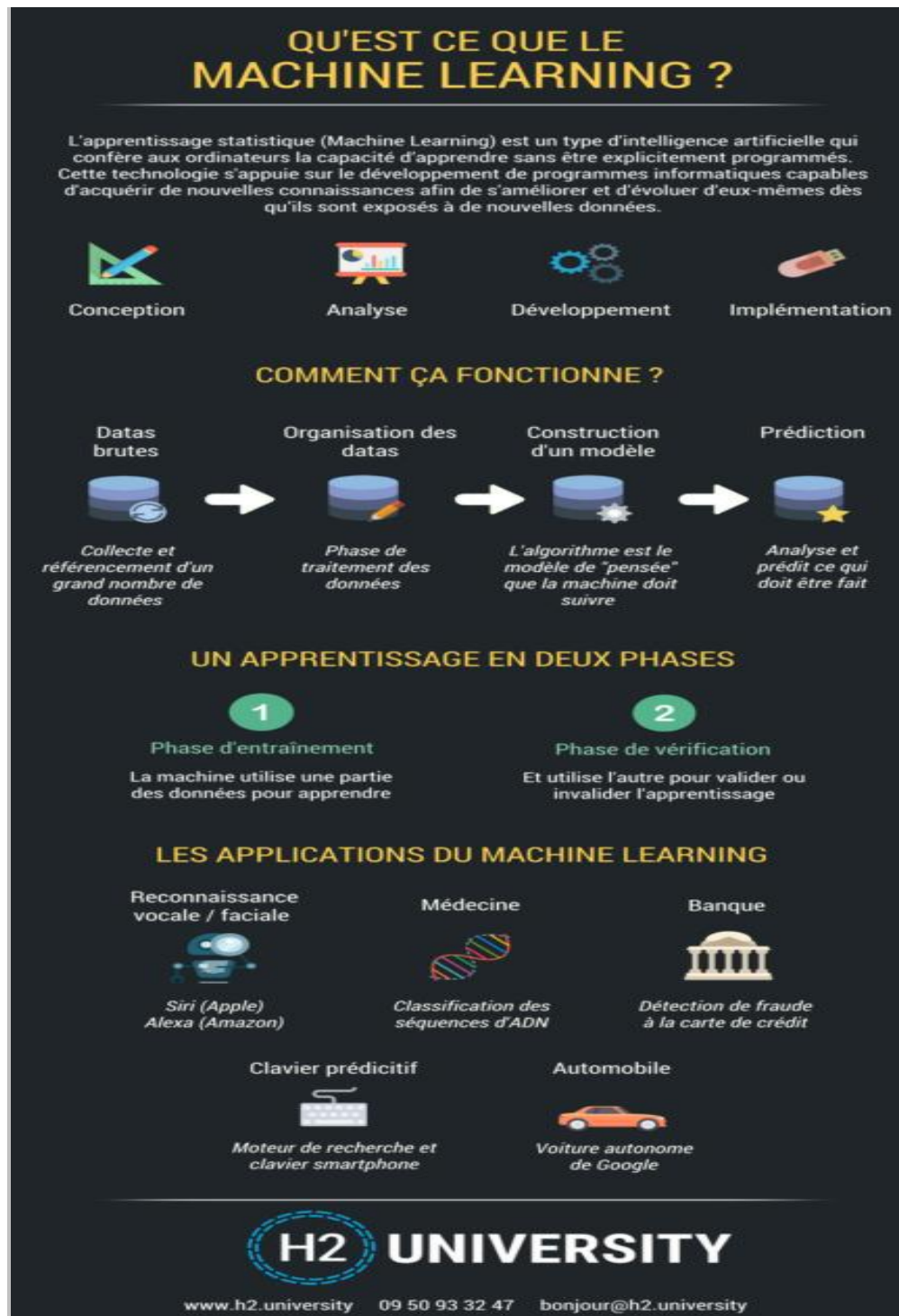


Figure 1 : définition, fonctionnement et usages du machine learning, tiré de Wotton, D. (2018).

Le deep learning (ou apprentissage profond) quant à lui, développé à partir des années 2010, est une évolution du machine learning. Il fonctionne comme les réseaux de neurones du cerveau humain. L'information traverse plusieurs couches successives de neurones artificiels et reliées entre-elles (Wotton, D., 2018). Plus le

nombre de neurones est important et plus le réseau est considéré comme profond. Le système peut être entraîné à sa tâche de façon supervisée ou non. Dans le premier cas, le réseau aboutit à une réponse qu'il va comparer à la réponse considérée comme correcte par l'homme. Si elles concordent, l'expérience est gardée en mémoire, si ce n'est pas le cas le réseau s'ajuste pour obtenir ce qui est attendu. Dans le cas de l'entraînement non supervisé, le système doit reconnaître des patrons de données pour apprendre par lui-même (Bastien, L., 2018b). Le deep learning est à ce jour déjà couramment utilisé dans le domaine de la santé : systèmes de détection de cancer (peau, colon et sein) ou encore de pathologies neurodégénératives (maladie d'Alzheimer) (Horgan et al., 2019). Les éléments présentés concernant le deep learning sont résumés par la Figure 2.

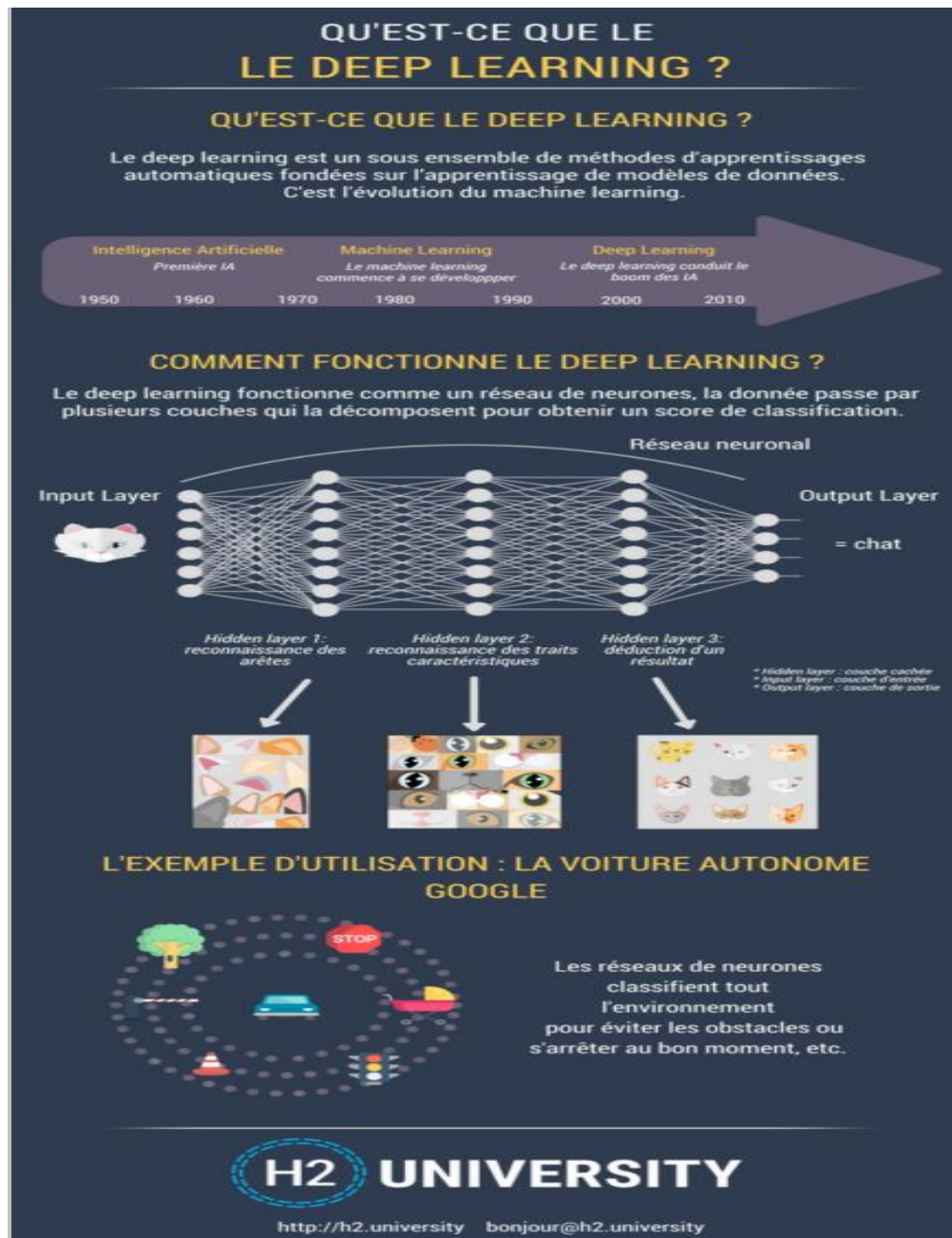


Figure 2: définition et fonctionnement du deep learning, tiré de Wotton, D. (2018).

2.1.4 L'intelligence artificielle en santé

Comme dans de nombreux autres domaines, l'intelligence artificielle occupe une place importante dans la santé où ses applications sont nombreuses : pose de diagnostic, système de prédiction pour une aide à la décision médicale, personnalisation des traitements ou encore suivi des patients (Saria et al., 2018).

L'imagerie médicale est le premier domaine où l'intelligence artificielle a été exploitée avec succès et celui où les impacts à court terme sont les plus importants. En 2018, une équipe de chercheurs américains a mis au point un logiciel d'analyse d'images capable de détecter les signes précurseurs de la rétinopathie chez des patients diabétiques avec un taux de précision de 90%. Le but est de déceler les profils à risque et d'orienter les patients vers un suivi adapté de façon précoce (Abràmoff et al., 2018 ; Demichelis, R., 2018a). Globalement, les systèmes utilisés présentent une efficacité sensiblement comparable à celle des médecins spécialistes, cependant leur usage permet une diminution des erreurs de diagnostic (Saria et al., 2018). Un autre exemple plus récent encore concerne la détection et le diagnostic des tumeurs cérébrales. Le système utilisé associe une imagerie optique et un algorithme d'intelligence artificielle. L'imagerie permet d'éclairer les zones du cerveau puis d'acquérir des images qui seront analysées par un réseau de neurones profond. Cela offre un gain de temps et d'efficacité dans la pose du diagnostic. En effet, l'algorithme testé a établi un diagnostic correct dans 94,6% des cas contre 93,9% pour les médecins (Garcia, V., 2020). Enfin, cette capacité à aider le médecin dans la pose d'un diagnostic est également utilisée dans les services d'urgences. Le système, basé sur l'approche symbolique, permet de créer une ontologie qui est un ensemble structuré de concepts et de leurs relations. Ce schéma permet de porter à la connaissance du médecin les informations et ainsi de l'aider dans sa prise de décision (Inserm, 2018).

L'intelligence artificielle est à ce jour également utilisée comme outil de prédiction dans la pratique médicale. Ainsi, une équipe française a mis au point un réseau neuronal capable de prédire les chances de guérison de patients atteints d'un cancer colorectal et ayant reçu un traitement de radiochimiothérapie. Grâce à ce système, il est possible d'évaluer si les patients sont en rémission suite au traitement ou s'il est nécessaire de leur proposer une intervention chirurgicale (Demichelis, R., 2018b). En 2018, une équipe française a combiné l'utilisation du machine learning et du process mining dans le but de créer un outil capable de représenter sous forme d'un simple graphique le parcours de soins « type » d'un patient (traitements médicamenteux, évolution, complications) pour une pathologie donnée. Celui-ci peut alors être utilisé par le médecin pour situer son patient, prédire son évolution probable et ainsi anticiper et éviter les potentielles complications (l'MTech, 2019).

L'aide au diagnostic et à la prédiction permise par l'intelligence artificielle ouvre une nouvelle perspective d'un ajustement plus fin des traitements et donc de l'émergence d'une médecine plus personnalisée. Ainsi, dans le cas d'un cancer, l'utilisation du machine learning peut permettre de proposer les combinaisons thérapeutiques les plus bénéfiques pour le patient. Dans cette même optique, l'intelligence artificielle peut être utilisée dans la réalisation d'études cliniques afin de proposer de nouveaux traitements médicamenteux. L'outil de prédiction peut également être utile dans le suivi à distance des patients (exemple : suivi du rythme cardiaque), permettant ainsi de détecter les individus les plus fragiles et donc les plus à même de développer des complications (Horgan et al., 2019).

Les exemples d'utilisation de l'intelligence artificielle présentés précédemment sont issus d'applications médicales. Elles visent à répondre à des enjeux de santé publique (oncologie, diabétologie, etc.). Cependant, se pose la question d'un usage de cette technologie dans le domaine de la rééducation, notamment pour l'analyse de la marche humaine, tâche motrice fréquemment affectée dans le cas de pathologies diverses.

2.2 L'intelligence artificielle et la marche humaine

2.2.1 Le cycle de marche

La marche physiologique est classiquement divisée en deux temps : une phase d'appui où le pied de référence est au sol et une phase oscillante où le pied de référence est en l'air. Certains auteurs considèrent que la marche se divise en trois temps : la phase d'appui, la phase de double appui et la phase oscillante.

La phase d'appui représente 60% du cycle de marche et est elle-même divisée en cinq phases. La première, appelée le contact initial (initial contact) correspond au moment où le talon de la jambe de référence se pose au sol. S'en suit la réponse d'appui au sol (loading response), le pied se pose à plat et le sujet se met en charge. Le milieu de phase d'appui (mid stance) correspond à l'avancée du train porteur et la fin de phase d'appui (terminal stance) au décollement du talon de la jambe de référence. La phase d'appui se termine par la phase pré-oscillante (pre-swing) où le talon de la jambe opposée se pose, ce qui correspond au contact initial (Figure 3).

La phase oscillante correspond au moment où le pied de la jambe de référence ne touche pas le sol. Ce moment représente 40% du cycle de marche et est divisé en une phase d'oscillation initiale (initial swing), une phase de milieu d'oscillation (mid swing) et une phase terminale (terminal swing) (Figure 3).

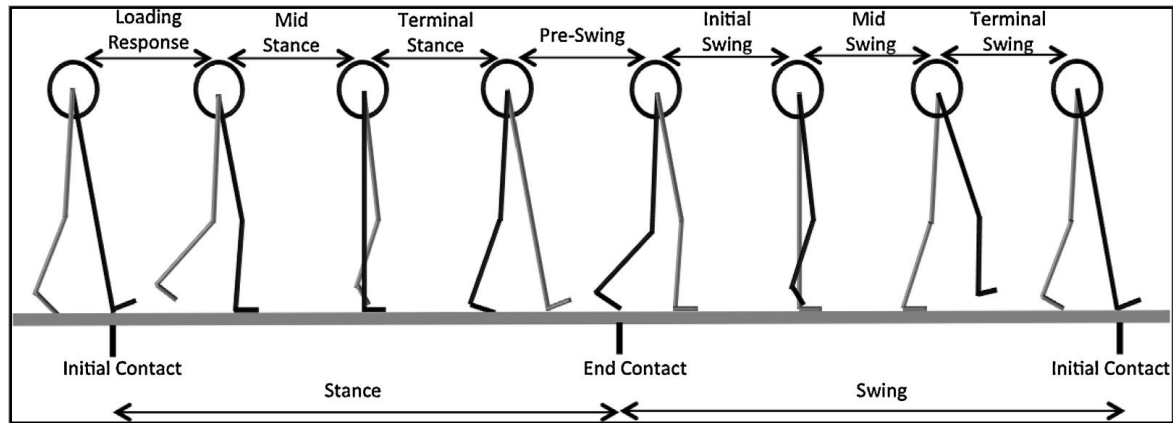


Figure 3 : description des phases et sous phases du cycle de la marche humaine physiologique d'après Caldas et al. (2017).

2.2.2 Les paramètres spatio-temporels

Les paramètres de la marche permettent de caractériser celle-ci en termes de temps et d'espace. Dans la marche physiologique ces paramètres sont symétriques.

Il existe quatre paramètres spatiaux importants à considérer (Baker, R., 2013 ; Pélisser, J. & Brun, V., 1994) :

- La longueur du pas correspond à la distance entre les deux talons du sujet lors du temps de double appui.
- La hauteur des orteils correspond à la distance entre les orteils et le sol.
- La largeur du pas correspond à l'écartement entre les pieds et est légèrement inférieure à la largeur du bassin de l'individu.
- L'angle du pas, compris en moyenne entre 10 et 15°.

Les paramètres temporels sont au nombre de trois (Baker, R., 2013 ; Pélisser, J. & Brun, V., 1994) :

- La cadence du pas correspond au nombre de pas par minute. Ce premier paramètre est un bon indicateur de la dépense énergétique de la marche.

- La vitesse de marche correspond au rapport de la distance parcourue par unité de temps.
- Le dernier paramètre est la durée d'appui. Celle-ci est divisée en appui unipodal (80% du temps de la marche) et en appui bipodal (20% du temps de marche).

2.2.3 La cinématique articulaire

La cinématique correspond à « *la mesure dans les trois plans de l'espace des variations angulaires au niveau des différentes articulations ou segments corporels concernés. Ces données permettent d'identifier les défauts de marche pour chaque articulation/segment, dans chaque plan et à chaque instant du cycle de marche* » (Armand et al., 2015). L'analyse de la cinématique d'une articulation se fait dans les trois plans de l'espace (frontal, transversal et sagittal). Dans chacun d'entre eux, les mouvements sous l'effet des activations musculaires sont représentés graphiquement, permettant également d'obtenir les angles articulaires.

Par exemple, dans le cas de la cheville, celle-ci présente des mouvements de varus/valgus dans le plan frontal, de rotation dans le plan transversal et de flexion/extension dans le plan sagittal. Un exemple d'analyse cinématique de cette articulation est présentée en Figure 4.

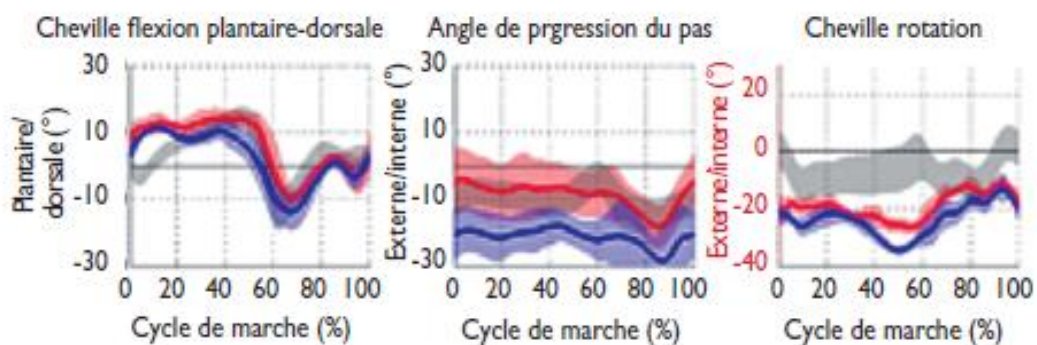


Figure 4 : analyse cinématique de la cheville lors d'une activité de marche (Armand et al., 2015).

2.2.4 La signature individuelle à la marche

Le mouvement en général et la marche en particulier semblent être au premier abord des activités standardisées et donc réalisées de façon similaire d'un individu à

l'autre. Cependant, des études récentes mettent en évidence qu'il existe une variabilité inter-individuelle dans la réalisation d'une tâche motrice. Celle-ci vient du fait que n'importe quel geste n'est jamais effectué exactement de la même façon entre deux individus. Ceci s'explique par la notion de redondance du système neuromoteur, qui elle-même introduit la notion qu'un même résultat peut être obtenu par plusieurs coordinations musculaires différentes (« Le mouvement humain » 2019).

Une étude (Hug et al., 2019) met en avant l'existence d'une variabilité d'activation musculaire entre les individus lors d'une même activité de marche. Les mesures électromyographiques réalisées montrent des profils d'activation musculaire variables, notamment sur certains muscles comme le *biceps femoris*. Ainsi, sur la Figure 5, nous pouvons observer une bouffée d'activation de ce muscle chez les participants 5, 21 et 51 mais pas chez l'individu 15. Nous pouvons en complément observer que l'intensité de celle-ci varie entre les trois sujets.

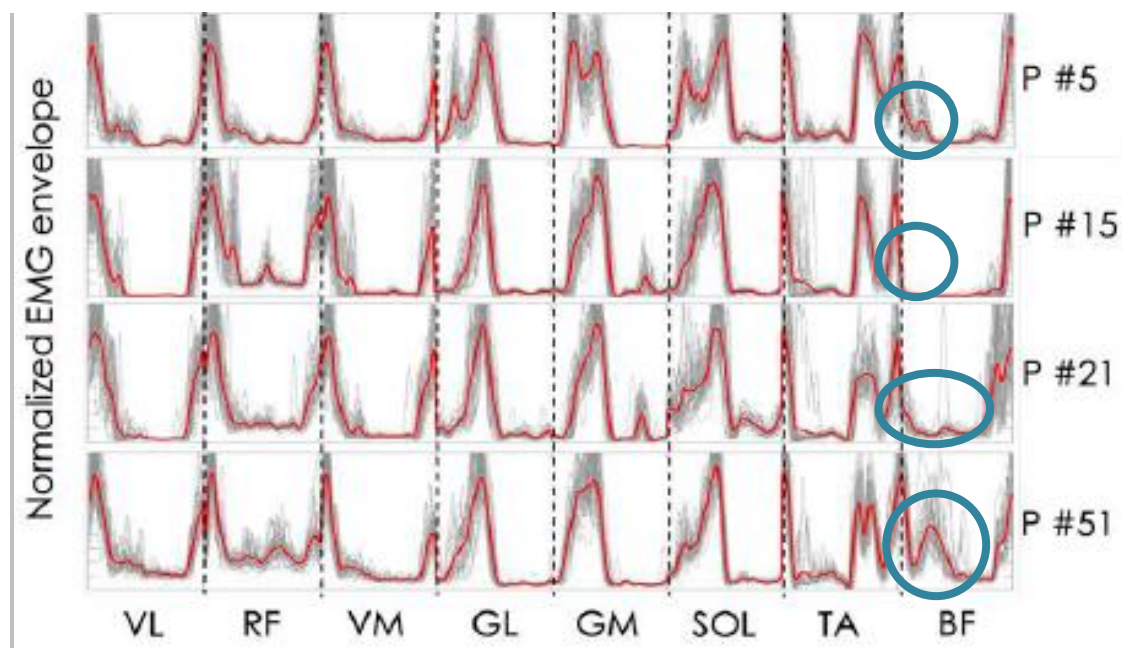


Figure 5 : profil d'activation musculaire lors d'une activité de marche (Hug et al., 2019).

La réalisation d'un mouvement quel qu'il soit est le résultat de la mise en jeu et de la coordination d'articulations et de muscles. Les dernières études convergent toutes vers la même conclusion : il existe une signature individuelle au mouvement. Chaque individu met en jeu une stratégie qui lui est propre pour produire l'activité motrice (Hug, F., 2018). Trois théories sont privilégiées à l'heure actuelle pour expliquer

l'existence de cette signature individuelle. La première se base sur les différences anatomiques et mécaniques spécifiques à chaque individu. La seconde quant à elle considère l'existence de stratégies de coordination musculaire uniques. La dernière résulte d'un mélange des deux premières théories. Pour confirmer l'existence d'une telle signature, deux critères doivent être remplis : d'une part la reproductibilité de cette particularité dans le temps et d'autre part le fait que cette signature soit spécifique à une personne et qu'elle ne soit pas retrouvée chez une autre. Les études réalisées permettent d'affirmer qu'une signature individuelle au mouvement et plus particulièrement à la marche existe bel et bien. En revanche, son origine ainsi que sa potentielle variation avec l'âge restent actuellement à l'étude (Hug et al., 2019).

2.3 L'intelligence artificielle appliquée à l'analyse de la marche humaine

L'analyse de la marche est un outil important dans la pratique clinique. Ainsi, elle donne des indications sur les capacités fonctionnelles de l'individu et permet également de mettre en place un suivi après une intervention chirurgicale, ou à la suite d'une rééducation (Caldas et al., 2017). Cet examen permet d'identifier les modifications des paramètres de marche qu'elles soient primaires (successives à une pathologie) ou secondaires (stratégies compensatoires des défauts primaires). La compréhension de ces troubles de la marche est un outil essentiel à prendre en compte pour les propositions thérapeutiques et leur suivi (Armand et al., 2015). Il existe un lien évident entre la qualité de marche d'un individu et son équilibre. Ainsi, l'examen de la marche est un outil pouvant être utilisé dans la prévention des chutes.

Actuellement, le *gold standard* est l'analyse quantifiée de la marche qui se réalise dans des laboratoires spécialisés avec un équipement particulier (Armand et al., 2015 ; Caldas et al., 2017). Celle-ci permet de mesurer l'ensemble des paramètres précédemment présentés (cinétique, cinématique et activation musculaire), permettant ainsi une évaluation plus précise qu'une analyse clinique simple (Armand et al., 2015).

Le machine learning est à ce jour utilisé dans l'analyse de la biomécanique du mouvement humain en général, et de la marche en particulier. Les systèmes employés combinent des outils d'acquisition de données avec un algorithme

d'intelligence artificielle. Les capteurs sans fils et le *support vector machine* sont respectivement les outils les plus utilisés dans les études. Le champ des pathologies étudiées est large : maladie de Parkinson, accident vasculaire cérébral, paralysie cérébrale, arthrose ou encore amputation de membre inférieur (Halilaj et al., 2018). Comme explicité précédemment, le machine learning peut être exploité pour reconnaître un individu à sa marche selon différents critères (Hug, F., 2018). L'utilisation de l'intelligence artificielle facilite l'analyse de la marche, la demande en systèmes performants et de plus en plus miniaturisés est de ce fait croissante. Son utilisation a permis de démontrer qu'il existe des patrons de marche spécifiques aux individus. Ces schémas peuvent être révélateurs de l'état émotionnel ou de l'état de fatigue du sujet (Caldas et al., 2017). Il semblerait également qu'il existe des modèles de locomotion spécifiques au genre et à l'âge (Caldas et al., 2017). De nombreuses pathologies entraînent des altérations de la marche. L'utilisation des algorithmes d'intelligence artificielle permet de faire la différence entre une marche physiologique et une marche altérée, par l'analyse des paramètres cinétiques (angles articulaires) et cinématiques (force de réaction au sol) (Caldas et al., 2017).

Les études actuelles se concentrent sur l'évaluation des angles articulaires, des phases de la marche et des paramètres spatio-temporels. La mesure des angles articulaires n'est pas ce qui est le plus souvent réalisé avec les algorithmes. Cependant plusieurs études mettent en avant que leur mesure constitue un bon outil pour la reconnaissance entre les individus. Les phases de la marche, et plus particulièrement le contact initial et la fin de la phase d'appui, sont les paramètres les plus souvent utilisés dans l'analyse de la marche avec l'intelligence artificielle. Ces deux moments du cycle de marche sont ceux dont l'analyse est la plus reproductible. Les types de capteurs utilisés et leur positionnement ne sont pour le moment pas standardisés, cependant il semble qu'un positionnement au niveau du pied et/ou de la jambe donne de meilleurs résultats. Il ressort également que la précision de la détection de la phase ainsi que son délai sont satisfaisants dans le cas d'une marche physiologique. En situation pathologique, la mesure est toujours possible mais avec une précision diminuée et un temps de réponse allongé. Concernant le recueil des paramètres spatio-temporaux, la cadence et la vitesse de marche sont les deux critères les plus souvent pris en compte dans les études (Caldas et al., 2017).

2.3.1 La création de clusters de patients

L'intelligence artificielle, et plus particulièrement le machine learning, est un outil intéressant à utiliser lors du regroupement de patients en clusters à partir de certaines de leurs particularités. Cette capacité a été exploitée au cours d'une étude auprès de patients présentant un asthme. Le système utilisé dans ce travail a réussi à rassembler les patients en sous-groupes selon leur type d'asthme. Ceci a alors permis de proposer à chaque cluster un traitement personnalisé et adapté aux particularités pathologiques du groupe (Saria et al., 2018).

Cette volonté de classer les patients selon les particularités de leur pathologie est également appliquée aux altérations de la marche et ce depuis de nombreuses années. Ainsi, des études de 2008 et 2014 menées sur des patients hémiplésiques à la suite d'un accident vasculaire cérébral, ont démontré qu'il est possible de rassembler les individus en sous-groupes selon leur patron de marche. Le but est de proposer un traitement personnalisé à chaque problématique de marche (Kinsella & Moran, 2008 ; Manca et al., 2014). L'usage des algorithmes d'intelligence artificielle pourrait être une stratégie intéressante afin de faciliter la création de ces « clusters de marche ». Par exemple, selon une revue publiée par Caldas et al. (2017), les algorithmes sont en capacité de détecter des variations du schéma de marche selon la fatigue ou encore la présence d'une pathologie altérant la locomotion.

2.3.2 Le machine learning appliqué à l'analyse de la marche humaine

Des travaux menés ces dernières années ont utilisé l'approche par machine learning dans le cadre de l'analyse de la marche. Les résultats mettent en avant qu'il est possible de reconnaître un individu lorsqu'il se déplace selon la force qu'il exerce au sol ou selon le mouvement de sa silhouette Hug, F. (2018). Une étude menée en France a obtenu de bons résultats en termes de reconnaissances d'individus à partir de leur schéma de marche (Hug et al., 2019). Dans ce protocole, quatre-vingts individus ont été inclus pour réaliser des tâches de marche sur tapis roulant et de pédalage. Lors du premier jour de mesure, l'activité de huit muscles est enregistrée par électromyographie lors de ces deux activités motrices. Les données ont ensuite été analysées grâce à un système de machine learning. Les résultats obtenus ont permis de faire ressortir des stratégies d'activation musculaire spécifiques à chaque

individu et donc d'identifier des signatures individuelles. Les sujets ont réalisé le même protocole un mois plus tard. Il ressort alors que le système d'intelligence artificielle était capable d'identifier chaque individu selon ses particularités à la marche dans 99% des cas. Il est donc possible de conclure qu'un algorithme de machine learning est en capacité de reconnaître une signature de marche, et que par extension celle-ci est stable dans le temps et donc propre à chaque individu (Hug et al., 2019 ; Reynolds, G., 2019).

La prise en compte de cette signature individuelle permettrait de passer d'une analyse globale de la marche à une analyse individuelle et donc une prise en charge plus personnalisée. L'intelligence artificielle, et plus spécifiquement le machine learning, semble être un outil intéressant pour mettre en évidence cette signature individuelle à la marche. Cette technologie est déjà utilisée dans la personnalisation des traitements médicamenteux selon les spécificités des patients. Il pourrait donc être envisagé d'utiliser cette capacité dans le cadre de la locomotion.

3. Problématique

L'intelligence artificielle est déjà largement utilisée dans le domaine médical et notamment comme outil de prédiction : prédiction de chances de guérison suite au traitement d'un cancer colorectal (Demichelis, R., 2018b) ou encore prédiction de l'évolution d'une pathologie (l'MTech., 2019). Elle possède également des capacités pour détecter des informations discriminantes dans une grande quantité de données et ainsi de regrouper des patients en clusters selon leurs particularités (Saria et al., 2018).

Il est alors possible d'imaginer une utilisation de ces performances dans le domaine de la rééducation. Il serait intéressant d'étudier le lien qui pourrait exister entre des patrons de marche et certaines pathologies. Une équipe française s'est ainsi demandé si certains schémas de marche pouvaient être responsables du développement de pathologies comme les troubles musculosquelettiques du membre inférieur (Reynolds, G., 2019).

Ce travail visera à recenser dans la littérature les publications traitant de l'utilisation de l'intelligence artificielle dans l'analyse de la marche humaine. Deux

dimensions d'analyse seront développées. Dans un premier temps, nous allons chercher à savoir si en situation pathologique, les systèmes d'intelligence artificielle sont capables de reconnaître un individu parmi un groupe. En parallèle, dans l'optique d'une utilisation ayant une finalité clinique, nous souhaitons identifier si cette technologie est en mesure de prédire l'évolution d'un individu (sujets à risque de chute, dégradation des qualités motrices, etc.).

4. Matériel et méthodes

4.1 Stratégie de recherche bibliographique

Ce travail reprend une démarche systématique (Liberati, A., 2009). Seules les publications de journaux scientifiques ont été considérées. Les livres, actes de conférences ou de congrès ou encore les publications de littérature grise ont été exclus.

Les recherches bibliographiques nécessaires pour la réalisation de cette revue ont été menées auprès de quatre bases de données : deux dans le domaine des sciences et de la santé (PubMed et Science Direct), une dans le domaine de la kinésithérapie (Pedro) et une quatrième axée sur les sciences de l'ingénieur (IEEE Xplore). Nous avons choisi d'intégrer cette dernière dans notre stratégie afin d'élargir les recherches à d'autres domaines qui pourraient malgré tout traiter d'applications de l'intelligence artificielle en santé. Nos investigations ont été menées *via* l'utilisation de mots clés spécifiques à chaque concept de notre problématique : *artificial intelligence, machine learning, deep learning, adaptative algorithm, intelligent algorithm, computational intelligence, AI, gait, locomotion, walking, ambulation, fall, « risk of fall », analysis, assessment, evaluation, study, validity, reproductibility, reliability, prediction*. L'agencement de ces termes a été adapté selon les contraintes imposées par chaque base de données (nombre d'opérateurs booléens utilisables par exemple).

Dans un souci d'illustration et de reproductibilité de nos recherches, les stratégies complètes utilisées dans l'interrogation des quatre bases de données vont être détaillées.

Les recherches sur la base de données Pubmed ont été réalisées à l'aide des deux équations suivantes :

- ((artificial intelligence) OR (machine learning) OR (deep learning) OR (adaptative algorithm) OR (intelligent algorithm) OR (computational intelligence) OR (AI)) AND ((gait) OR (locomotion) OR (walking) OR (ambulation) OR (fall) OR (« risk of fall »)) AND ((analysis) OR (assessment) OR (evaluation) OR (study)) AND ((validity) OR (reproducibility) OR (reliability))
- ((artificial intelligence) OR (machine learning) OR (deep learning) OR (adaptative algorithm) OR (intelligent algorithm) OR (computational intelligence) OR (AI)) AND ((gait) OR (locomotion) OR (walking) OR (ambulation) OR (fall) OR (« risk of fall »)) AND ((analysis) OR (assessment) OR (evaluation) OR (study)) AND ((validity) OR (reproducibility) OR (reliability)) AND (prediction)

Avec ces deux équations, nous avons obtenu respectivement 1439 et 277 résultats. Certains filtres ont été appliqués afin de limiter le nombre de réponses et d'affiner les recherches (langue et type de publication). Ainsi, les filtres *english*, *french*, *systematic review*, *meta-analysis* et *randomized controlled trial* ont été utilisés, aboutissant à l'obtention de 30 articles pour la première équation et 6 articles pour la seconde.

Les prospections sur la base de données Science Direct ont été menées *via* l'utilisation de deux équations de recherche :

- ((artificial intelligence) OR (machine learning) OR (deep learning)) AND (gait) AND (analysis) AND ((validity) OR (reliability) OR (reproductibility)) AND (prediction)
- ((intelligent algorithm) OR (adaptative algorithm) OR (computational intelligence)) AND (gait) AND (analysis) AND ((validity) OR (reliability) OR (reproductibility)) AND (prediction)

Respectivement 1327 et 1247 résultats sont obtenus avec ces équations. Dans ce cas, seul un filtre de type de publication (*review article*) a été utilisé, permettant d'affiner les recherches à 164 études pour la première équation et 137 pour la deuxième.

La base de données Pedro ne permettant pas la rédaction d'équations de recherche au sens propre du terme, la stratégie de recherche a du être adaptée. Les mots clés ont été répartis selon les concepts qu'ils représentent (Tableau I) puis combinés entre eux (exemple : *artificial intelligence*, *gait*, *analysis*, *validity*). Les possibilités d'association étant trop nombreuses, il n'est pas possible de toutes les

détailler ici. Aucun filtre n'a été utilisé dans cette stratégie, la base de données n'en proposant pas. Nous avons obtenu 26 occurrences.

Tableau I : répartition des mots-clés utilisés pour les recherches bibliographiques menées sur la base de données Pedro.

Intelligence artificielle	Marche	Analyse	Pronostic
Artificial intelligence	Gait	Analysis	Validity
Machine learning	Locomotion	Assessment	Reliability
Deep learning	Walking	Evaluation	Reproducibility
AI	Fall	Study	Prediction
Adaptative algorithm	« risk of fall »		
Intelligent algorithm	Ambulation		
Computational intelligence			

Enfin, concernant la base de données IEEE Xplore, les recherches ont été menées à l'aide de l'équation ((artificial intelligence) OR (machine learning) OR (deep learning)) AND (gait OR locomotion) AND (prediction). 689 résultats sont alors obtenus. Deux filtres de types de publication, *journals* et *early access articles* ont été appliqués dans cette dernière stratégie de recherche, aboutissant à l'obtention de 137 articles.

Toutes bases de données confondues, nos recherches ont abouti à l'obtention de 513 notices d'articles répondant aux mots clés utilisés. Celles-ci ont été importées dans Endnote (version X7.2.1).

4.2 Sélection des articles

Cette phase de sélection des articles a nécessité le choix de critères d'inclusion. Nous avons ainsi exclu les publications dans une langue autre que le français et l'anglais, les études qui n'ont pas été réalisées sur l'homme, les études qui ne concernent pas des individus « pathologiques », les études ne portant pas sur la marche et son analyse et celles qui n'utilisent pas l'intelligence artificielle et plus particulièrement le machine learning ou le deep learning pour l'analyse de la marche. Enfin, nous avons exclu les revues systématiques de la littérature et les avons conservées pour la discussion de ce travail.

Le tri des articles a été réalisé en quatre temps. Premièrement, nous avons éliminé tous les articles en doublons. Nous avons ensuite écarté les articles non pertinents sur la base du contenu de leur titre ou de leur résumé. La quatrième et dernière étape a consisté en une lecture intégrale des articles restants afin d'exclure ceux ne répondant pas aux critères d'inclusion.

Le processus de recherche bibliographique et de sélection des articles est résumé par la Figure 6. Dans un premier temps, nous avons éliminé tous les articles en doublons ($n= 107$), certains nous ayant été fournis par plusieurs bases de données. Ensuite, la lecture du titre des études ou de leur résumé nous ont permis d'écarter respectivement 244 et 124 des articles proposés. Enfin, la dernière étape de lecture intégrale des études restantes nous a permis d'exclure les travaux ne répondant pas à nos critères d'inclusion ($n= 29$). A l'issue de ce processus de sélection, 9 articles ont été inclus dans notre travail. Ceux-ci sont présentés de façon synoptique dans le Tableau II. La liste des articles exclus est présentée en Annexe (*Annexe 1*).

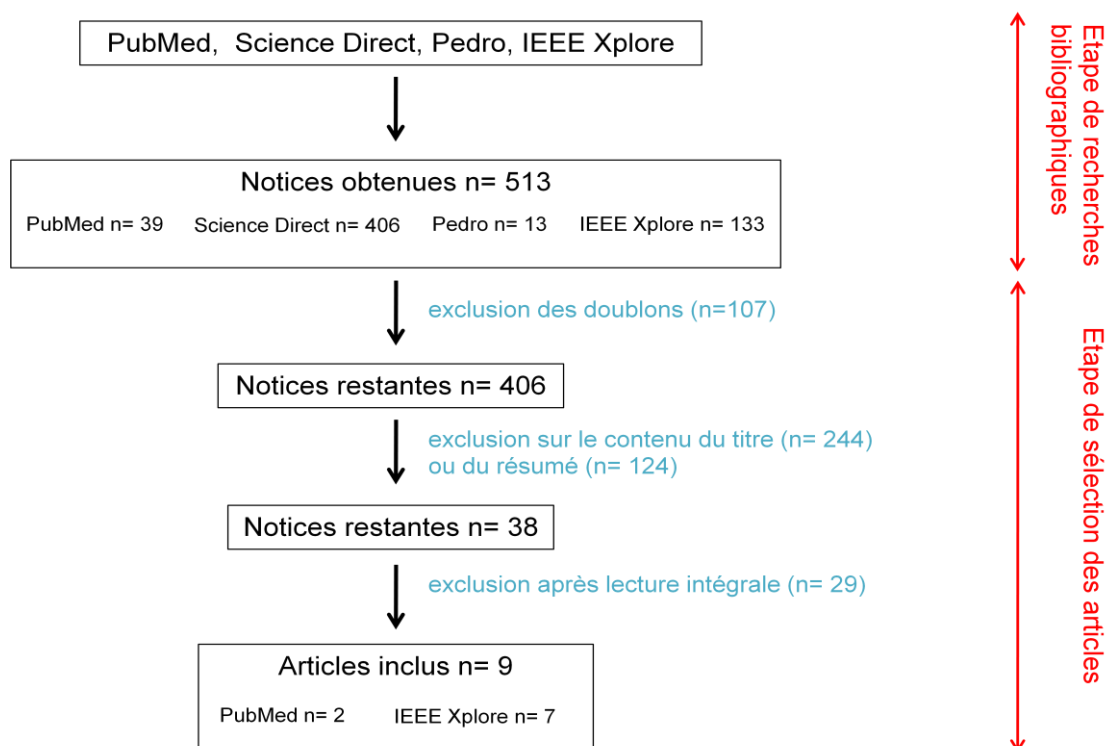


Figure 6 : diagramme de flux de la recherche systématique, adapté de Liberati, A. (2009).

4.3 Extraction des données

L'extraction des données des articles inclus dans la revue systématique a été réalisée par une seule personne et de façon libre c'est-à-dire sans l'aide de formulaires pré-établis.

4.4 Analyse méthodologique des articles

Dans le but d'évaluer la qualité méthodologique des articles considérés dans ce travail et de rechercher la présence de potentiels biais, nous avons réalisé une analyse méthodologique de chaque étude à l'aide d'une grille d'évaluation spécifique.

Un outil mis à disposition par le National Institute of Health (« Study Quality Assessment Tool » s.d) a été utilisé pour évaluer de façon qualitative la validité interne dans le cadre d'étude observationnelles transversales de cohorte. La grille QUADAS-2 (QUADAS-2, s.d), quant à elle, permet une évaluation qualitative des potentiels biais présents dans une étude, et l'applicabilité d'une nouvelle méthode d'évaluation dans le cadre de travaux comparant un système de référence à un nouvel outil dont les auteurs cherchent à évaluer l'efficacité.

5. Résultats et analyse des résultats

5.1 Description générale des études retenues

Les études retenues dans cette revue mettent en avant une importante représentation de l'utilisation des systèmes d'intelligence artificielle dans les pathologies neurologiques : maladie de Parkinson (Arami et al., 2019 ; Hu et al., 2020 ; Pham & Yan., 2018 ; Sigcha et al., 2020 ; Zhang et al., 2020), maladie de Huntington (Acosta-Escalante et al., 2018) mais également chez des populations de sujets âgés (Howcroft et al., 2017 ; Nait-Aicha et al., 2018 ; Tunca et al., 2019). Tous les travaux ont pour objectif de mettre au point des systèmes capables de prédire le risque de chute à partir de données relatives à la marche. Celles-ci sont obtenues à partir de capteurs, puis traitées et analysées grâce à des algorithmes d'intelligence artificielle.

Les données recueillies varient d'une étude à l'autre, cependant nous pouvons noter que l'accélération est le paramètre le plus souvent mesuré. Ainsi, quatre études la considère comme leur mesure principale (Arami et al., 2019 ; Nait-Aicha et al., 2018 ; Sigcha et al., 2020 ; Zhang et al., 2020). Viennent ensuite les paramètres de la marche qu'ils soient considérés seuls (Pham & Yan, 2018 ; Tunca et al., 2019) ou en combinaison avec l'accélération (Acosta-Escalante et al., 2018 ; Howcroft et al., 2017). Enfin, une étude considère l'interaction des articulations entre elles (Hu et al., 2020).

L'utilisation des capteurs portables se démocratise de façon croissante dans l'analyse de la marche (Caldas et al., 2017). Avec sept études l'utilisant, l'accéléromètre est l'outil de recueil le plus retrouvé. Il peut être utilisé seul (Arami et al., 2019 ; Nait-Aicha et al., 2018 ; Sigcha et al., 2020 ; Zhang et al., 2020), en combinaison avec un gyroscope (Acosta-Escalante et al., 2018 ; Tunca et al., 2019) ou des capteurs de pression (Howcroft et al., 2017). Deux études se démarquent des autres, l'une par l'utilisation de capteurs de charge (Pham & Yan, 2018) et l'autre car elle recourt à la vidéo pour enregistrer les données relatives à la marche (Hu et al., 2020). Il peut également être noté que le positionnement de ces capteurs est très variable.

Une fois recueillies, les données sont traitées et analysées par des systèmes d'intelligence artificielle. Le machine learning est utilisé par cinq des études (Acosta-Escalante et al., 2018 ; Arami et al., 2019 ; Howcroft et al., 2017 ; Pham & Yan, 2018 ; Zhang et al., 2020). Les types d'algorithmes utilisés sont très variables, il peut cependant être remarqué que le *support vector machine* est le plus représenté, qu'il soit utilisé seul (Howcroft et al., 2017) ou associé à un autre type d'algorithme (Arami et al., 2019). Les autres études retenues utilisent le deep learning et plus particulièrement les réseaux neuronaux (Hu et al., 2020 ; Nait-Aicha et al., 2018 ; Sigcha et al., 2020 ; Tunca et al., 2019). De façon similaire aux études utilisant le machine learning, le type d'algorithme de deep learning est très variable entre les études.

Les travaux inclus vont être regroupés selon la situation pathologique (maladie de Parkinson, maladie de Huntington) ou non (personnes âgées) à laquelle ils se réfèrent de sorte à faire ressortir les données probantes concernant l'utilisation de l'intelligence artificielle dans l'analyse de la marche dans ces contextes.

Tableau II : descriptif des études retenues

Auteurs	Population	Paramètre(s) mesurés(s)	Technique(s) utilisée(s)	Résultats principaux
Arami et al., 2019	10 sujets atteints de la maladie de Parkinson en phase ON ou OFF (données cliniques provenant d'une base de données)	Accélération	<p><u>Machine learning</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>capteur(s)</u>: 5 accéléromètres (tronc, chevilles, genoux) - <u>système d'intelligence artificielle</u>: classification binaire associant deux algorithmes (<i>support vector machine</i> + <i>probabilistic neural network</i>) 	L'approche de classification binaire est plus pertinente dans la prédiction de la survenue de freezing que l'approche conventionnelle en 3 classes.
Hu et al., 2020	45 sujets atteints de la maladie de Parkinson en phase ON ou OFF (données cliniques provenant d'une base de données)	Interactions entre les articulations (genoux et pieds) pendant la marche	<p><u>Deep learning</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>système de recueil de données</u>: vidéos de marche des patients - <u>système d'intelligence artificielle</u>: réseau neuronal (<i>graph convolutional network</i>) 	L'approche testée présente une meilleure capacité de diagnostic que celle de référence. L'approche testée permet d'obtenir un graphique anatomique utilisable par les cliniciens.
Pham & Yan, 2018	72 sujets sains (données cliniques provenant d'une base de données) 93 sujets atteints de la maladie de Parkinson en phase ON ou OFF (données cliniques provenant d'une base de données)	Force verticale de réaction du sol	<p><u>Machine learning</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>capteur(s)</u>: 8 capteurs de charge (chaussures) - <u>système d'intelligence artificielle</u>: algorithme (<i>tensor decomposition</i>) 	L'algorithme de machine learning permet une meilleure classification que les deux autres méthodes évaluées. L'algorithme est efficace pour trouver des informations discriminantes concernant le patient.

Sigcha et al., 2020	21 sujets atteints de la maladie de Parkinson en phase ON ou OFF (données cliniques provenant d'une base de données)	Accélération	<p>Deep learning</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>capteur(s)</u>: 1 accéléromètre (taille) - <u>système d'intelligence artificielle</u>: réseau neuronal (<i>recurrent neural network</i>) 	<p>Les algorithmes de deep learning présentent une meilleure performance dans la détection des freezing par rapport à la méthode de référence.</p> <p>L'algorithme peut travailler à partir des données d'un seul capteur.</p>
Zhang et al., 2020	12 sujets atteints de la maladie de Parkinson en phase OFF	Accélération	<p>Machine learning</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>capteur(s)</u>: 1 accéléromètre (lombaire, en regard de L3) - <u>système d'intelligence artificielle</u>: algorithme (entraîné avec différents types de données) 	<p>Le temps de latence de détection des freezing est réduit.</p> <p>L'entraînement de l'algorithme avec les données de marche altérées pre-freezing est plus intéressant que les données conventionnelles.</p>
Howcroft et al., 2017	47 sujets « non chuteurs » (65 ans et plus) 28 patients « chuteurs » (65 ans et plus)	Accélération Cadence Temps de foulée Temps de phase d'appui (simple et double) Temps de phase oscillante Symétrie de la marche Trajet du centre de pression Impulsion	<p>Machine learning</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>capteur(s)</u>: 4 accéléromètres (tête, pelvis, chevilles) + 2 capteurs de pression (chaussures) - <u>système d'intelligence artificielle</u>: 3 algorithmes de prédiction (réseau neuronal, <i>naïve Bayesian</i>, <i>support vector machine</i>) 	<p>L'utilisation combinée de plusieurs capteurs est plus efficace que l'utilisation d'un seul capteur.</p> <p>Le réseau neuronal est plus efficace dans la prédiction d'une chute.</p>

Nait-Aicha et al., 2018	296 sujets âgés entre 65 et 99 ans (données cliniques provenant d'une base de données)	Accélération	<p style="text-align: center;"><u>Deep learning</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>capteur(s)</u>: 1 accéléromètre (lombaires) - <u>système d'intelligence artificielle</u>: 2 algorithmes (<i>convolutionnal neural network</i>, <i>long-short term memory neural network</i>) en individuel ou combinés 	<p>Le modèle de deep learning présente une efficacité similaire à celle du modèle de référence.</p> <p>Le modèle de deep learning est plus simple d'utilisation (extraction des données).</p>
Tunca et al., 2019	76 sujets âgés (moyenne d'âge 77 ans) atteints de pathologies neurologiques affectant la marche (37 sujets « chuteurs » + 39 sujets « non chuteurs »)	Longueur de la foulée Temps de phase d'appui Temps de phase oscillante Clairance du pas	<p style="text-align: center;"><u>Deep learning</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>capteur(s)</u>: accéléromètres + gyroscopes - <u>système d'intelligence artificielle</u>: algorithme (<i>long short term memory neural network</i>) 	<p>Le réseau de neurones est plus performant dans la classification des patients en comparaison avec les algorithmes de machine learning classiques.</p>
<u>Machine learning</u>				
Acosta-Escalante et al., 2018	7 sujets sains 7 sujets atteints de la maladie de Huntington	Intensité de l'accélération Puissance de l'accélération Symétrie de la marche Régularité de la foulée	<ul style="list-style-type: none"> - <u>capteur(s)</u>: 1 accéléromètre (cheville) + 1 gyroscope (cheville) - <u>système d'intelligence artificielle</u>: combinaison de deux algorithmes de classification (méta-classificateur) 	<p>Combinaison d'algorithmes plus efficace qu'un algorithme seul.</p> <p>Deux capteurs sont suffisants.</p> <p>Variation des types de capteurs est plus intéressante.</p>

5.2 Analyse méthodologique des articles retenus

Parmi les 9 articles inclus, 7 traitent d'une comparaison entre un système de référence et un nouvel algorithme dont les auteurs cherchent à évaluer l'efficacité (Acosta-Escalante et al., 2018 ; Arami et al., 2019 ; Hu et al., 2020 ; Nait-Aicha et al., 2018 ; Pham & Yan, 2018 ; Sigcha et al., 2020 ; Tunca et al., 2019). La méthodologie de ces études a été étudiée à l'aide de la grille d'évaluation QUADAS-2.

Les deux articles restants sont des études observationnelles transversales de cohorte (Howcroft et al., 2017 ; Zhang et al., 2020), leur méthodologie sera estimée à l'aide de l'outil de National Institutes of Health.

Les résultats de l'analyse méthodologique avec la grille d'évaluation QUADAS-2 sont présentés dans le Tableau III.

Les données obtenues permettent de mettre en avant le fait que dans les études considérées ($n= 7/7$), la sélection de la population entraîne l'introduction d'éventuels biais ou de défaut d'applicabilité de la technique étudiée. Dans le travail mené sur des patients atteints de la maladie de Huntington (Acosta-Escalante et al., 2018), il est spécifié que les sujets ne sont pas au même stade d'évolution de la pathologie. Concernant les études menées sur des populations de patients présentant la maladie de Parkinson, il ressort un manque d'indications concernant l'avancement de la pathologie chez les sujets, ainsi que leur degré d'atteinte motrice ou encore le traitement qui leur est proposé (Arami et al., 2019 ; Hu et al., 2020 Pham & Yan, 2018 ; Sigcha et al., 2020). Les deux autres travaux analysés avec la grille QUADAS-2 sont menés sur des populations de sujets âgés. De façon similaire aux études précédentes, nous pouvons relever un manque d'informations sur l'état clinique des sujets ($n= 2/2$). Ainsi, dans le travail de Nait-Aicha et al., (2018) nous sommes ignorants de la présence d'éventuelles pathologies pouvant affecter la marche chez les sujets considérés. Dans la seconde étude, il est porté à notre connaissance que les sujets présentent des pathologies neurologiques, mais il n'est pas précisé la sévérité de l'atteinte motrice résultante (Tunca et al., 2019).

Nous pouvons relever également qu'il existe deux autres sources de biais potentiels dans certaines des études sélectionnées. Ainsi dans les travaux de Acosta-Escalante et al., (2018), Hu et al., (2020) et Nait-Aicha et al., (2018) les

résultats du nouvel algorithme testé ont été interprétés en ayant connaissance de prime abord des résultats concernant la méthode d'évaluation servant de référence, ce qui constitue un biais d'évaluation. Enfin, dans deux études, la méthode de référence n'a pas été testée sur les données des patients servant à l'évaluation du nouvel outil mais sur une autre population (Acosta-Escalante et al., 2018 ; Arami et al., 2019). De même, dans le travail de Hu et al. (2020) il ne nous est pas permis de savoir si les données des patients de l'étude ont été traitées avec les deux outils (celui servant de référence et celui testé dans le travail).

Les résultats de l'analyse méthodologique réalisée avec l'outil du National Institutes of Health sont présentés dans le Tableau IV.

Les deux travaux considérés ici ont pour objectif de développer un nouvel outil de prédiction du risque de chute chez les personnes âgées (Howcroft et al., 2017) et de la survenue de freezing chez les patients atteints de la maladie de Parkinson (Zhang et al., 2020). L'évaluation méthodologique effectuée met en avant un risque de biais provenant de l'historique clinique des patients considérés dans les études. En effet, les délais d'expression des symptômes d'intérêt (chute et survenue de freezing) sont évalués à l'aide de questionnaires qui ne sont pas considérés comme des outils fiables. La subjectivité du patient entre alors en ligne de compte dans les données servant de base à l'étude. De ce fait, le délai d'apparition des symptômes d'intérêt ne sont pas indiqués avec précision, leur gravité et leur évolution pouvant jouer sur les résultats de l'étude. Nous pouvons également noter que les résultats n'ont pas été analysés en aveugle.

Tableau III : résultats de l'analyse méthodologique réalisée avec la grille d'évaluation QUADAS-2

	Applicability concern			Risk of bias			
	Patient selection	Index test	Reference standard	Patient selection	Index test	Reference standard	Flow and timing
Acosta-Escalante et al, 2018	High risk	Low risk	Low risk	High risk	High risk	Low risk	High risk
Arami et al., 2019	Unclear risk	Low risk	Low risk	Low risk	Low risk	Low risk	High risk
Hu et al., 2020	Unclear risk	Low risk	Low risk	Low risk	High risk	Low risk	Unclear risk
Nait-Aicha et al., 2018	Unclear risk	Low risk	Low risk	Low risk	High risk	Low risk	Low risk
Pham & Yan, 2018	Unclear risk	Low risk	Low risk	Low risk	Low risk	Low risk	Low risk
Sigcha et al., 2020	Unclear risk	Low risk	Low risk	Low risk	Low risk	Low risk	Low risk
Tunca et al., 2019	Unclear risk	Low risk	Low risk	Low risk	Low risk	Low risk	Low risk

Low risk
High risk
Unclear risk

Tableau IV : résultats de l'analyse méthodologique réalisée avec l'outil du National Institutes of Health

	Critère	Howcroft et al., 2017	Zhang et al., 2020
<u>Question 1</u>	Research question	Low risk	Low risk
<u>Question 2</u>	Study population	Low risk	Low risk
<u>Question 3</u>	Study population	Low risk	Low risk
<u>Question 4</u>	Uniform eligibility criteria	Low risk	Low risk
<u>Question 5</u>	Sample size justification	Low risk	High risk
<u>Question 6</u>	Exposure assessment	Low risk	Low risk
<u>Question 7</u>	Timeframe	Low risk	Unclear risk
<u>Question 8</u>	Levels of exposure	High risk	High risk
<u>Question 9</u>	Exposure measures	High risk	High risk
<u>Question 10</u>	Repeated exposure assessment	Low risk	High risk
<u>Question 11</u>	Outcome measure	Low risk	Low risk
<u>Question 12</u>	Blinding assessors	High risk	High risk
<u>Question 13</u>	Followup rate	Low risk	Low risk
<u>Question 14</u>	Statistical analyses	Unclear risk	Low risk

Yes
No
Other (cannot determine, not applicable, not reported)

5.3 Utilisation de l'intelligence artificielle dans le cas de la maladie de Parkinson

La majorité des études incluses dans ce travail a pour objectif de développer un système d'intelligence artificielle capable de prédire la survenue d'un freezing chez les patients atteints de la maladie de Parkinson (Arami et al., 2019 ; Hu et al., 2020 ; Pham & Yan, 2018 ; Sigcha et al., 2020 ; Zhang et al., 2020). Ces études ont pour rationnel de considérer l'impact négatif de ce symptôme sur la qualité de vie des patients (notamment concernant le risque de chute) et sur la nécessité de prédire sa survenue.

La première étude, publiée en 2018, a pour objectif de comparer un nouvel algorithme de machine learning (*tensor decomposition*) versus deux méthodes classiquement employées dans la littérature (*deterministic learning* et *principal component analysis*) (Pham & Yan, 2018). Les données cliniques utilisées proviennent d'une base de données (PhysioNet). Celle-ci regroupe les informations concernant la marche de 72 sujets sains et de 93 patients atteints d'une maladie de Parkinson d'origine idiopathique. La force verticale de réaction du sol a été recueillie lors d'une activité de déambulation à l'aide de 8 capteurs de charge placés au niveau des chaussures des sujets. Les résultats obtenus mettent en avant que le système de machine learning permet une classification plus précise (sensibilité= 100%, spécificité= 100%) que les systèmes servant de référence (sensibilité= 84,6%, spécificité= 100%). Cette efficacité repose sur la capacité de l'algorithme à faire ressortir des « données cachées » (données caractéristiques d'un échantillon d'individus) qui permettent de discriminer les deux populations. Les auteurs concluent sur l'utilisation potentielle du machine learning (et plus particulièrement de l'algorithme *tensor decomposition*) comme outil de suivi de l'évolution des patients (réponse au traitement, prédiction du risque de chute, etc.).

La seconde étude, menée par Sigcha et al. (2020) remet en question l'évaluation des freezing réalisée à l'aide de questionnaires, qui sont selon eux peu fiables et ne reflètent pas les conditions de vie réelles du patient. Ils proposent de tester un système alliant un accéléromètre placé à la taille et un algorithme de deep learning (réseau neuronal, *recurent neural network*). La référence choisie par les auteurs est représentée par un système retrouvé dans la littérature (*Mazilu features*) (Mazilu et

al., 2012). Les données cliniques utilisées dans ce travail proviennent d'une étude menée par d'autres auteurs sur 21 patients atteints de la maladie de Parkinson et présentant un historique de freezing (Rodríguez-Martín, D., 2017). En comparaison de la technique de référence, le deep learning permet d'obtenir une amélioration dans la détection des freezing en se basant sur l'accélération du mouvement (sensibilité= 83,2%, spécificité= 59,2%).

Le travail mené par Arami et al., en 2019 a pour objectif de développer une méthode permettant une prédiction efficace des phénomènes de freezing. Pour ce faire, l'étude compare un système de machine learning (classification binaire basée sur la combinaison d'un algorithme de *support vector machine* et d'un réseau de neurones (*probabilistic neural network*)) à un système de référence (*three class approach*). Le but est de classer les sujets selon qu'ils présentent des épisodes de freezing ou non. Pour cela, les données cliniques de 10 patients faisant partie de la base de données Daphnet sont utilisées (Bachlin, M. et al., 2010). Elles consistent en des mesures d'accélération recueillies à l'aide de capteurs. Les résultats obtenus mettent en avant que le système de classification binaire est le plus performant dans la tâche allouée (sensibilité= 93±4%, spécificité= 91±6%).

L'approche proposée par Hu et al., diffère de celles des autres études incluses dans ce travail. En effet, les auteurs souhaitent développer un système de reconnaissance automatique des phénomènes de freezing *via* le traitement de données vidéo par un réseau de neurones (*graph convolutional neural network*) sans nécessiter le recueil de données à l'aide de capteurs. L'extraction des données permet la création d'un graphique anatomique représentant les interactions entre les articulations (genoux et pieds) pendant la marche. Le système de reconnaissance permet de mettre en évidence de façon compréhensible les patrons de marche relatifs au phénomène de freezing. Les données cliniques utilisées proviennent des vidéos de patients atteints de la maladie de Parkinson réalisant un Time Up and Go test. Les résultats obtenus dans ce travail montrent la performance de cette technique (capacité de diagnostic= 88.7%, sensibilité= 81,9%, spécificité= 82.1%) par rapport au gold standard (observation directe ou indirecte par vidéos de la marche). De plus, ce système permet l'obtention d'un graphique anatomique utilisable par les cliniciens.

Le cinquième et dernier article considéré au sujet de la maladie de Parkinson est une étude observationnelle transversale de cohorte (Zhang et al., 2020). L'objectif annoncé par les auteurs est de mettre au point un système capable de détecter les freezing en diminuant le temps de latence, tout en conservant une précision convenable. Le but est de s'approcher d'un système de détection en temps réel. La littérature rapporte que le schéma de marche est altéré juste avant la survenue d'un freezing (Chee, R., 2009 ; Hausdorff, J.D., 2003 ; Nieuwboer, R., 2001). Les patients (n= 12), doivent être capables de marcher plus de 3 minutes pour être inclus dans l'étude. Ils sont par la suite classés en 3 sous groupes : pré-freezing, freezing et marche normale à partir des données d'accélération. Les résultats obtenus montrent que le système de machine learning testé permet une réduction du temps de latence dans la détection du freezing (0.93 secondes). Il ressort également que l'entraînement de l'algorithme avec les paramètres de marche pré-freezing rend celui-ci plus performant (sensibilité= 83.8%, spécificité= 82.1%), permettant ainsi au modèle testé d'être plus efficace que ceux comparables dans la littérature.

Il ressort des cinq études résumées dans ce paragraphe que les systèmes étudiés, qu'ils soient de machine learning ou de deep learning, présentent une efficacité intéressante dans la détection des freezing chez les patients parkinsoniens. La sensibilité des outils testés va de 81,9% (Hu et al., 2020) à 100% pour l'étude de Pham & Yan (2018). En termes de spécificité, les travaux proposent des outils ayant des résultats allant de 59,2% (Sigcha et al., 2020) jusqu'à 100% (Pham & Yan, 2018).

5.4 Utilisation de l'intelligence artificielle dans le cas du risque de chute chez le sujet âgé

La deuxième situation porte sur le risque de chute chez le sujet âgé (Howcroft et al., 2017 ; Nait-Aicha et al., 2018 ; Tunca et al., 2019). Les auteurs de ces 3 études s'accordent sur l'importance des conséquences d'une chute. Celle-ci peut entraîner un isolement social de l'individu, une grabatisation et une augmentation du risque de mortalité.

Le premier travail, mené en 2019 par Tunca et al. (2019) se base sur l'efficacité prouvée dans la littérature des capteurs d'inertie dans le suivi des dysfonctions à la

marche. Le but de leur étude est de mettre en évidence un algorithme de deep learning (réseau de neurone (*long short term memory neural network*)) et de l'associer aux capteurs sus-mentionnés pour en potentialiser les capacités. Les auteurs souhaitent à terme proposer un système de suivi à distance des patients. Pour ce faire, ils comparent ce nouvel outil à quatre techniques de machine learning classiquement utilisées dans la littérature (*multi-layer perceptron, random forest, Markov model, support vector machine*). Pour tester ces algorithmes, les auteurs disposent de données cliniques collectées dans la littérature auprès de 76 sujets âgés et présentant une pathologie neurologique affectant la marche (maladie de Parkinson, différents types de démence et hydrocéphalie à pression normale). Les sujets sont classés en sous groupes : « chuteurs » et « non chuteurs ». Les résultats obtenus mettent en évidence que l'algorithme de deep learning évalué permet une classification plus précise des sujets (précision de classification= 92.1%) que les systèmes de machine learning de référence (moyenne de précision de classification= 84,08%).

L'expérimentation menée par Nait-Aicha et al. (2018) repose sur l'hypothèse que les antécédents de chute et l'altération du schéma de marche sont de bons facteurs prédictifs de survenue d'une chute chez le sujet âgé. Le postulat selon lequel le deep learning est un bon outil pour la reconnaissance des patrons de marche est également utilisé. L'objectif de l'étude de cette équipe est de comparer deux types de réseaux neuronaux (*convolutionnal neural network, long-short term memory*) à un outil standard basé sur les caractéristiques biomécaniques des sujets (*linear model*). En complément, les algorithmes sont entraînés selon deux modes (simple tâche et multi-tâches) dans le but d'évaluer quelle modalité est la plus performante pour détecter le risque de chute. L'entraînement multi-tâches consiste à attribuer à l'algorithme une tâche principale (détection du risque de chute) et une tâche auxiliaire (reconnaissance du sujet). Les données cliniques utilisées proviennent d'une cohorte de 296 patients entre 65 et 99 ans et dont les facteurs de risques de chute sont évalués à l'aide de questionnaires, de tests physiques et de capteurs. Ces sujets doivent être capables de marcher au moins 20 minutes avec une aide technique. Un suivi de 6 mois permet de classer 101 patients comme « chuteurs ». Dans un premier temps, les auteurs évaluent la performance de leurs types réseaux neuronaux individuellement et en combinaison. Il ressort que la dernière option est

plus performante en termes de capacités de reconnaissance et de temps d'entraînement. Dans un second temps, une procédure d'amélioration de la combinaison des deux réseaux neuronaux est mise en place. A ce stade, l'outil est performant pour reconnaître l'identité du sujet, mais la prédiction du risque de chute reste aléatoire. Les auteurs mettent donc en place la modalité d'entraînement multi-tâches où l'algorithme se voit attribuer deux tâches, tout en ayant la possibilité de prendre en compte certaines variables caractéristiques des sujets (âge, genre, etc.). La combinaison d'algorithmes doit donc apprendre à reconnaître le sujet tout en prédisant son risque de chute. Il ressort de ces travaux que le nouvel outil de deep learning présente une précision de prédiction similaire à celle du modèle de référence.

La troisième étude menée par Howcroft et al., (2017) combine plusieurs capteurs à plusieurs modèles de classification, dans le but de trouver le meilleur système de prédiction des chutes. Les auteurs ont travaillé sur les données cliniques de 76 individus âgés de 65 ans ou plus. 28 d'entre eux sont considérés comme « chuteurs » (au moins un antécédent de chute dans les 6 mois précédents) et 47 comme « non chuteurs ». Les sujets doivent être capables de marcher au moins 6 minutes sans aide technique. Concernant les modèles de classification, trois types de machine learning ont été testés (*naïve Bayesian*, *support vector machine*, réseau neuronal). Les résultats obtenus mettent en lumière la supériorité du réseau neuronal dans la tâche de prédiction de chute (précision= 57%, sensibilité= 43%, spécificité= 65%). Les auteurs mettent en avant que l'usage du seul capteur pelvien est suffisamment performant et peut donc être proposé dans un modèle de prédiction à un seul capteur. En complément, l'équipe a comparé l'efficacité de leur système au modèle clinique utilisé en routine. Il ressort que le système basé sur l'intelligence artificielle est plus performant.

De manière générale, il ressort que les systèmes d'intelligence artificielle entraînés à la détection du risque de chute chez les personnes âgées sont efficaces dans la tâche qui leur est allouée. Nous pouvons également noter que les systèmes de deep learning présentent une performance supérieure à celle du machine learning.

5.5 Utilisation de l'intelligence artificielle dans le cas de la maladie de Huntington

La maladie de Huntington entraîne des altérations du schéma de marche chez les personnes touchées. Les mesures de marche peuvent être utilisées comme données prédictives de la progression de la pathologie (Acosta-Escalante et al., 2018). L'objectif d'une étude par Acosta-Escalante et al. (2018) est de proposer un système permettant d'améliorer le taux de classification des patients en utilisant un nombre restreint de capteurs. Pour cela, les auteurs se basent sur des résultats de la littérature considérant des associations entre au moins 3 capteurs et un algorithme de classification. Les sujets inclus dans cette étude (n= 14), sont pour la moitié des sujets sains et pour le reste des patients atteints de la maladie de Huntington à différents stades de la pathologie. Les résultats obtenus montrent une meilleure capacité de classification des méta-classificateurs (association d'un algorithme de classification et d'un second de méta-classification) (précision de classification= 94.5%), en comparaison avec un algorithme simple. Les auteurs mettent également en avant que l'usage de deux capteurs est suffisant pour obtenir des résultats convenables. Cela permettrait un suivi en continu des patients, les capteurs étant peu contraignants à porter. La combinaison de plusieurs types d'appareils de mesure (accéléromètre et gyroscope) autorise le recueil de plusieurs types de paramètres, ce qui permet une étude plus fouillée. En conclusion, l'équipe a pour projet de proposer leur système comme outil de suivi des patients, et de détection de progression de la pathologie basée sur l'altération du schéma de marche.

En conclusion, ces résultats, mettent globalement en avant une performance intéressante des systèmes d'intelligence artificielle dans l'analyse de la marche, et plus particulièrement dans la détection du risque de chute.

6. Discussion

6.1 Pertinence et limites des études incluses

6.1.1 Utilisation de l'intelligence artificielle dans le cas de la maladie de Parkinson

Les études retenues mettent en avant que les systèmes d'intelligence artificielle (via du machine ou du deep learning) constituent des dispositifs intéressants dans la prédiction des freezing chez les patients atteints de la maladie de Parkinson (Arami

et al., 2018 ; Hu et al., 2020 ; Pham & Yan, 2018 ; Sigcha et al., 2020 ; Zhang et al., 2020). Il ressort également de l'étude de Zhang et al., (2020) que le temps de latence de détection de l'évènement peut être diminué par l'utilisation d'un algorithme de machine learning. Cependant, des réserves concernant les résultats sont apportées sur la nécessité d'améliorer la précision de leurs modèles (Hu et al., 2020 ; Pham & Yan, 2018) et de les rendre généralisables à une population plus large (Arami et al., 2018). Pour répondre à ce second aspect, des auteurs proposent la création d'un modèle générique regroupant les symptômes moteurs précédant la survenue d'un freezing afin d'entraîner les algorithmes (Arami et al., 2018). Cette solution tend à être confirmée par les résultats de Zhang et al., (2020).

L'analyse méthodologique menée sur ces études dans notre travail fait ressortir la présence de potentiels biais concernant la sélection des patients. En effet, les populations considérées dans les cinq travaux sont très hétérogènes (phase ON ou OFF, capacités de marche avec ou sans aide technique, historique clinique concernant les freezing). De plus, il manque au lecteur des informations concernant l'état d'avancement de la pathologie pour chaque participant. Les auteurs ne précisent pas dans leur écrit l'éventuel impact que peut avoir cette variabilité sur leurs données. Ce constat nous amène à relativiser les résultats présentés. En effet, des patients plus sévèrement atteints par la pathologie, et présentant donc des symptômes moteurs plus marqués, peuvent entraîner une sur-estimation de la capacité de l'algorithme à détecter la survenue des freezing.

Une autre limite concerne la variabilité des systèmes utilisés et des données collectées. Cette fluctuation concerne en premier lieu le type de capteurs utilisés et son positionnement qui diverge entre les études (cf. 5.1 Description générale des études retenues). Dans le prolongement, chaque type de capteur recueille une analyse de données différente. Certains auteurs prennent le parti d'utiliser des données brutes (l'accélération par exemple) (Arami et al., 2019 ; Sigcha et al., 2020 ; Zhang et al., 2020) et d'autres des données raffinées (paramètres de marche) (Pham & Yan, 2018). Les outils testés sont donc tous entraînés à partir de données différentes. Enfin, les algorithmes eux-mêmes diffèrent tous d'une étude à l'autre. Il paraît donc difficile au vu de tous ces éléments de pouvoir comparer les résultats entre eux et de tirer une conclusion générale.

Cependant, malgré cela, une tendance semble se dégager. L'utilisation de l'intelligence artificielle dans l'analyse de la marche chez des patients parkinsoniens semble être une valeur ajoutée dans la prédiction de survenue des freezing et donc du risque de chute qui en découle. Néanmoins, la question de l'applicabilité clinique de tels outils se pose.

Une revue de la littérature publiée en 2019 donne une vue d'ensemble de l'application potentielle de l'intelligence artificielle, et plus spécifiquement du machine learning dans le diagnostic de cette pathologie et son suivi (Belić et al., 2019). A la différence de notre travail, cette publication considère essentiellement le machine learning et s'intéresse au suivi des symptômes de la maladie de Parkinson qu'ils touchent les membres supérieurs ou inférieurs. Il ressort que nos conclusions sont relativement similaires en ce qui concerne la détection des freezing. En effet, les auteurs soulignent l'intérêt de l'usage de cette technologie tout en émettant eux aussi des réserves concernant la généralisation des résultats au vu de la variabilité des données en termes de population, de capteurs, etc.

6.1.2 Utilisation de l'intelligence artificielle dans le cas du risque de chute chez le sujet âgé

Les résultats obtenus après analyse des études réalisées sur des populations de personnes âgées amènent à des tendances similaires à celles évoquées dans le paragraphe précédent (maladie de Parkinson). Ainsi, les auteurs mettent en avant l'intérêt de l'utilisation de l'intelligence artificielle dans la prédiction des chutes chez les sujets âgés (Howcroft et al., 2017 ; Nait-Aicha et al., 2018 ; Tunca et al., 2019). Les études de Tunca et al., (2019) et de Nait-Aicha et al., (2018) font ressortir la supériorité de performance et de praticité des algorithmes de deep learning par rapport à ceux de machine learning. Malgré ces résultats prometteurs, et comme le soulignent d'autres auteurs, la limite des réseaux neuronaux réside dans la quantité de données qu'il est nécessaire d'utiliser pour entraîner ces systèmes (Sigcha et al., 2020). La quantité est un des paramètres du problème, les autres étant la qualité des données et leur interprétabilité (Miotto et al., 2017).

De façon similaire aux études concernant la maladie de Parkinson, l'analyse méthodologique des trois études concernant les personnes âgées fait ressortir un

potentiel biais introduit par la sélection de la population. En effet, dans les études de Nait-Aicha et al., (2018) et de Howcroft et al., (2017) aucune information concernant la présence de potentielles pathologies affectant la marche chez ces sujets ne sont données. Seule l'étude Tunca et al., (2019) indique que sa cohorte de patients présente une pathologie neurologique invalidante. En revanche, ceux présentant une comorbidité orthopédique ont été exclus. Cependant, nous ne savons pas quel est l'état d'avancement de ces pathologies ni quelles sont leurs répercussions motrices. Ainsi, de façon générale, des précisions sont manquantes concernant l'état clinique des patients dans les trois études. Il est pourtant essentiel de connaître ces informations afin d'interpréter au mieux les résultats obtenus et s'affranchir autant que possible d'une sur-estimation des performances de l'algorithme testé.

Nous pouvons également souligner ici aussi l'hétérogénéité des données à notre disposition. D'une part en termes de populations, la fourchette d'âge étant large et les capacités de marche requises différentes entre les trois études. D'autre part, les capteurs utilisés, les données recueillies et les algorithmes testés sont différents entre les travaux. Ainsi, nous sommes confrontés ici aussi à l'impossibilité de dégager une méthodologie globale, applicable à un profil de patient et *in fine* à l'extrapoler à la population. Des études menées sur des cohortes de patients plus importantes sont à envisager pour pallier cette limite (Howcroft et al., 2017). Là encore, se pose le problème de l'applicabilité clinique des systèmes d'intelligence artificielle.

Les conclusions concernant l'étude de Acosta-Escalante et al., (2018) sont similaires à celles présentées pour les autres travaux en termes de supériorité de l'intelligence artificielle, de données manquantes, d'extrapolation à la population générale ou encore d'applicabilité clinique.

En résumé, une tendance générale se dégage des 9 études analysées dans ce travail. Ainsi, malgré des protocoles non standardisés (hétérogénéité des populations, des types de capteurs utilisés, des types de données recueillies et des types d'algorithmes testés), les auteurs s'accordent à envisager l'utilisation de l'intelligence artificielle comme une valeur ajoutée dans l'analyse de la marche humaine en situation pathologique.

6.2 Applicabilité des modèles d'intelligence artificielle

Au vu des résultats prometteurs avancés par les articles récents sur le sujet, se pose la question de l'applicabilité concrète de l'intelligence artificielle. Plusieurs points nous semblent importants à aborder.

Tout d'abord, comme introduit précédemment dans la discussion, l'accès à des données en quantité et en qualité est une des conditions majeures au développement et à l'usage de l'intelligence artificielle et notamment du deep learning. Ainsi, pour permettre le développement de ces systèmes, il est nécessaire de disposer de bases de données complètes, de bonne qualité et accessibles. La digitalisation des données de santé est donc un préalable indispensable (Horgan et al., 2019). L'accès aux données est le moyen pour l'algorithme d'apprendre la façon dont les humains pensent. Ce nécessaire accès à de grandes quantités de données montre bien que l'intelligence artificielle est dépendante de ce que l'on nomme le *Big Data*. Plus le système est entraîné avec un volume important de données et plus il devient précis dans la tâche qui lui est allouée (Bastien, L., 2018a). Le deep learning est le système qui nécessite l'accès à la plus grande quantité de données, au point tel que sont créés des *Lake Data* (ou lacs de données). La question de la qualité des données est également importante à considérer. Celles-ci doivent être complètes et exploitables par l'algorithme. Les données médicales actuellement à disposition ne répondent pas à ces exigences pour la grande majorité d'entre elles. En effet, elles sont pour la plupart manuscrites et non collectées dans un format adéquat (Inserm, 2018).

Ensuite, des problèmes de reproductibilité ont été soulevés. Ce premier aspect concerne essentiellement les réseaux neuronaux (Larousserie, D., 2019). Ces derniers sont également touchés par un enjeu d'interprétabilité. En effet, pour être acceptée et considérée comme légitime par un praticien, la décision d'un algorithme doit pouvoir être comprise et retracée (Inserm, 2018). Cependant, les systèmes basés sur l'approche numérique (donc les réseaux neuronaux) se comportent comme des « boîtes noires » dont le raisonnement est impossible à analyser (Miotto et al., 2017).

Il est clairement ressorti tout au long de ce travail que les études menées actuellement sur le sujet de l'analyse de la marche humaine à l'aide de l'intelligence artificielle présentent une importante variabilité : populations, types de données recueillies, matériel utilisé, combinaisons capteurs/algorithmes proposées, etc. Comme le souligne Caldas et al., (2017), ce fait pose des problèmes de généralisation des résultats et surtout d'applicabilité des systèmes. Leur utilisation en pratique clinique semble à ce jour compromise par un manque de standardisation des protocoles. L'uniformisation des process est alors un objectif à atteindre afin de proposer un outil fiable et simple à utiliser pour les professionnels de santé (Caldas et al., 2017). Pour atteindre ce but, il pourrait être envisagé d'organiser des réunions d'experts selon la méthode DELPHI (MacMillan et al., 2016) pour discuter et décider de l'utilisation de méthodes communes, comme cela a pu se faire dans le domaine de l'analyse quantifiée de la marche. Cet examen est utilisé selon un protocole précis et identique quel que soit le laboratoire où il est réalisé (Armand et al., 2015).

Un autre obstacle à l'utilisation de l'intelligence artificielle a été soulevé par une étude de 2017. Ce travail met en lumière que la plupart des données recueillies et analysées à l'heure actuelle le sont en conditions de laboratoire : marche en ligne droite, à vitesse constante et sans variation de terrain. Dans ces conditions, les systèmes présentent une bonne performance. En revanche, en conditions de marche réelle, en extérieur et sur sol irrégulier, l'efficacité est amoindrie (Khandelwal & Wickström, 2017). Ainsi, les conditions proposées en laboratoire ne sont pas représentatives des conditions de vie des individus. Leur environnement peut avoir une influence importante sur l'apparition de certains troubles (exemple : déclenchement d'un freezing lors du passage du seuil d'une porte).

Enfin, l'utilisation de l'intelligence artificielle dans le domaine de la santé soulève de nombreuses questions éthiques. L'une des interrogations principales concerne le recueil, le traitement et l'utilisation des données de santé (Liyanage, H., et al., 2019). Celles-ci sont considérées comme sensibles même si toutes ne se valent pas ; leur protection est donc graduée. Ainsi, les données génomiques sont considérées comme cruciales et donc plus protégées que les autres (Gruson, D., 25 juin 2019). Cette question de sécurisation des données de santé se pose aussi d'un point de vue juridique, de même que leur traitement qui est à l'heure actuelle interdit légalement (Bouteille-Brigant, M., 25 juin 2019). La seconde interrogation majeure

concerne le recueil du consentement du patient. En effet, l'usage de ces systèmes se faisant en situation pathologique et notamment neuro-dégénérative, il est pertinent de se demander quels outils et quels contrôles doivent être mis en place pour garantir l'obtention d'un consentement éclairé. De ce fait, le devoir de recherche du consentement de la part du professionnel de santé est élargi et d'autant plus crucial (Gruson, D., 25 juin 2019). Une perspective de travail intéressante serait de mener une étude sur le ressenti des usagers vis-à-vis de la démocratisation de l'usage de l'intelligence artificielle dans la santé.

6.3 Regard critique sur la méthodologie de travail

Cette revue systématique de la littérature a nécessité la mise en place d'une méthodologie spécifique. Nous nous sommes attaché à respecter au mieux les critères d'exigence imposés par les recommandations PRISMA (Liberati, A., et al., 2009) et AMSTAR (Shea, B.J., 2007). Cependant, plusieurs ajustements peuvent être proposés.

Les processus de recherche bibliographique, de sélection des articles, d'évaluation méthodologique et d'extraction des données ont été réalisés par une seule personne. Ceci peut entraîner l'introduction de biais et d'imprécisions. Il serait ainsi pertinent de réaliser ce processus avec différents intervenants, en parallèle et en aveugle. En cas de désaccord, la mise en place d'un protocole de prise de décision permettrait d'aboutir aux meilleurs choix possibles et d'assurer une reproductibilité de la démarche.

Enfin, le type d'analyse réalisée pourrait lui aussi être optimisé. En effet, dans ce travail il ne nous a pas été donné de pouvoir produire une analyse quantitative des résultats en raison de la grande variabilité des méthodes utilisées et de la difficulté à généraliser les résultats obtenus.

7. Conclusion

La revue systématique de littérature réalisée permet de dégager une tendance, malgré toutes les limites évoquées. Il ressort donc que l'intelligence artificielle est un outil intéressant à développer dans les années à venir pour permettre une analyse

de la marche humaine plus fiable et précise, ainsi que dans un objectif prédictif. Cependant, des ajustements et des améliorations sont encore nécessaires, notamment sur les méthodes utilisées et leur uniformisation. Avec les efforts employés actuellement pour le développement de l'intelligence artificielle dans la santé, il est probable que cet usage se développera dans un futur proche, le choix du traitement reposant lui aussi sur un procédé algorithmique. Partant de ce fait, il est probable que l'intelligence artificielle prendra de plus en plus d'importance dans le milieu de la santé. Cependant, l'objectif n'est pas de remplacer le médecin mais de l'aider (Diprose & Buist, 2016). Le personnel de santé va donc être amené à prendre une place importante dans cette évolution du monde médical en participant au recueil des données et en étant impliqué dans la rédaction de guides de bonnes pratiques (Rowe, M., 2018). Les professions de santé devront donc se former pour composer avec ce nouvel allié. Le but n'est pas de remplacer l'homme mais de l'assister (Rosier, F., 2019).

REFERENCES

A free online introduction to artificial intelligence for non-experts. (s. d.). <https://www.elementsofai.com/> consulté le 25 décembre 2019

Abràmoff, M. D., Lavin, P. T., Birch, M., Shah, N., & Folk, J. C. (2018). Pivotal trial of an autonomous AI-based diagnostic system for detection of diabetic retinopathy in primary care offices. *npj Digital Medicine*, 1(1). <https://doi.org/10.1038/s41746-018-0040-6>

Acosta-Escalante, F. D., Beltran-Naturi, E., Boll, M. C., Hernandez-Nolasco, J. A., & Pancardo Garcia, P. (2018). Meta-Classifiers in Huntington's Disease Patients Classification, Using iPhone's *Movement Sensors Placed at the Ankles*. *IEEE Access*, 6, 30942-30957. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2840327>

Arami, A., Poulakakis-Daktylidis, A., Tai, Y. F., & Burdet, E. (2019). Prediction of Gait Freezing in Parkinsonian Patients: A Binary Classification Augmented With Time Series Prediction. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 27(9), 1909-1919. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2019.2933626>

Armand, S., Bonnefoy-Mazure, A., Hoffemeyer, P. et de Coulon, G. (2015). Analyse quantifiée de la marche : mode d'emploi. *Revue médicale Suisse*, 11 : 1916-20

Bachlin, M., Plotnik, M., Roggen, D., Maidan, I., Hausdorff, J. M., Giladi, N., & Troster, G. (2010). Wearable Assistant for Parkinson's Disease Patients With the Freezing of Gait Symptom. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 14(2), 436-446. <https://doi.org/10.1109/titb.2009.2036165>

Baker, R. (2013) *A handbook of clinical gait analysis*. Mac Keith Press

Bastien, L. (2018a) *Machine learning et big data* Le Big Data <https://www.lebigdata.fr/machine-learning-et-big-data> consulté le 25 décembre 2019

Bastien, L. (2018b) *Deep learning ou apprentissage profond* Le Big Data <https://www.lebigdata.fr/deep-learning-definition> consulté le 8 janvier 2020

Belić, M., Bobić, V., Badža, M., Šolaja, N., Đurić-Jovičić, M., & Kostić, V. S. (2019). Artificial intelligence for assisting diagnostics and assessment of Parkinson's disease—A review. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 184, 105442. <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2019.105442>

Bouteille-Brigant, M. (25 juin 2019) *Les enjeux juridiques de l'intelligence artificielle* [communication orale] Conférence Intelligence artificielle dans le soin et l'accompagnement, quels enjeux éthiques ?, 4^{ème} journée de l'espace de réflexion éthique des Pays de La Loire, Le Mans

Caldas, R., Mundt, M., Potthast, W., Buarque de Lima Neto, F., & Markert, B. (2017). A systematic review of gait analysis methods based on inertial sensors and adaptive algorithms. *Gait & Posture*, 57, 204-210. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.06.019>

Chee, R., Murphy, A., Danoudis, M., Georgiou-Karistianis, N., & Iansek, R. (2009). Gait freezing in Parkinson's disease and the stride length sequence effect interaction. *Brain*, 132(8), 2151-2160. <https://doi.org/10.1093/brain/awp053>

Demichelis, R. (2018a). *Comment une IA a été autorisée à poser un diagnostic*. Les Echos. <https://www.lesechos.fr/tech-medias/intelligence-artificielle/comment-une-ia-a-ete-autorisee-a-poser-un-diagnostic-137774> consulté le 21 décembre 2019

Demichelis, R. (2018b). *Un réseau de neurones prédit les chances de guérison de patients atteints d'un cancer*. Les Echos. <https://www.lesechos.fr/tech-medias/intelligence-artificielle/un-reseau-de-neurones-predit-les-chances-de-guerison-de-patients-atteints-dun-cancer-137617> consulté le 22 décembre 2019

DESIREE project. (2020). *What is DESIREE*. DESIREE-project. <http://desiree-project.eu/content/what-desiree> consulté le 13 avril 2020

Diprose W. & Buist N. (2016). Artificial intelligence in medicine : humans need not apply ? *New Zealand Medical Journal*

Garcia, V. (2020). *Une intelligence artificielle détecte les tumeurs du cerveau en temps réel*. L'Express https://www.lexpress.fr/actualite/sciences/une-intelligence-artificielle-detecte-les-tumeurs-du-cerveau-en-temps-reel_2113553.html consulté le 8 janvier 2020

Gruson, D. (25 juin 2019) *L'intelligence artificielle de quoi parlons-nous ?* [communication orale] Conférence Intelligence artificielle dans le soin et l'accompagnement, quels enjeux éthiques ?, 4^{ème} journée de l'espace de réflexion éthique des Pays de La Loire, Le Mans

Halilaj, E., Rajagopal, A., Fiterau, M., Hicks, J. L., Hastie, T. J., & Delp, S. L. (2018). Machine learning in human movement biomechanics: Best practices, common pitfalls, and new opportunities. *Journal of Biomechanics*, 81, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.09.009>

Hausdorff, J. M., Schaafsma, J. D., Balash, Y., Bartels, A. L., Gurevich, T., & Giladi, N. (2003). Impaired regulation of stride variability in Parkinson's disease subjects with freezing of gait. *Experimental Brain Research*, 149(2), 187-194. <https://doi.org/10.1007/s00221-002-1354-8>

Hocoma (2020) *Lokomat*. Hocoma. <https://www.hocoma.com/solutions/lokomat/> consulté le 7 janvier 2020

Horgan, D., Romao, M., Morré, S. A., & Kalra, D. (2019). Artificial Intelligence: Power for Civilisation – and for Better Healthcare. *Public Health Genomics*, 22(5-6), 145-161. <https://doi.org/10.1159/000504785>

Howcroft, J., Kofman, J., & Lemaire, E. D. (2017). Prospective Fall-Risk Prediction Models for Older Adults Based on Wearable Sensors. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(10), 1812-1820. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2017.2687100>

Hu, K., Wang, Z., Mei, S., Ehgoetz Martens, K. A., Yao, T., Lewis, S. J. G., & Feng, D. D. (2020). Vision-Based Freezing of Gait Detection With Anatomic Directed Graph

Representation. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 24(4), 1215-1225. <https://doi.org/10.1109/jbhi.2019.2923209>

Hug, F. (2018). *Comment déchiffrer le mouvement humain ?* The Conversation <https://theconversation.com/comment-dechiffrer-le-mouvement-humain-108309> consulté le 25 décembre 2019

Hug, François, Vogel, C., Tucker, K., Dorel, S., Deschamps, T., Le Carpentier, É., & Lacourpaille, L. (2019). Individuals have unique muscle activation signatures as revealed during gait and pedaling. *Journal of Applied Physiology*, 127(4), 1165-1174. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01101.2018>

l'MTech. (2019). *Quand l'IA aide à prédire le parcours de soin d'un patient*. Institut Mines-Télécom. <https://blogrecherche.wp.imt.fr/2018/10/16/ia-parcours-de-soin/> consulté le 23 décembre 2019

Inserm (2018) *Intelligence artificielle et santé – des algorithmes au service de la médecine* Inserm. <https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/intelligence-artificielle-et-sante> consulté le 21 décembre 2019

Intelligence artificielle (s.d) Encyclopédie Larousse en ligne. https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/intelligence_artificielle/187257 consulté le 6 janvier 2020

Khandelwal, S., & Wickström, N. (2017). Evaluation of the performance of accelerometer-based gait event detection algorithms in different real-world scenarios using the MAREA gait database. *Gait & Posture*, 51, 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.09.023>

Kinsella, S., & Moran, K. (2008). Gait pattern categorization of stroke participants with equinus deformity of the foot. *Gait & Posture*, 27(1), 144-151. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.03.008>

Larousserie, D. (2019). *L'intelligence artificielle n'échappe pas à la crise de la reproductibilité*. Le Monde. <https://www.lemonde.fr/sciences/article/2019/02/25/l->

[intelligence-artificielle-n-echappe-pas-a-la-crise-de-la-reproductibilite_5428163_1650684.html](#) consulté le 22 décembre 2019

Le mouvement humain (2019) FUN MOOC. <https://www.fun-mooc.fr/courses/course-v1:univnantes+31007+session01/about> consulté le 5 janvier 2020t

Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., ... Moher, D. (2009). The PRISMA Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta-Analyses of Studies That Evaluate Health Care Interventions: Explanation and Elaboration. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000100. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>

Liyanage, H., Liaw, S.-T., Jonnagaddala, J., Schreiber, R., Kuziemsy, C., Terry, A. L., & de Lusignan, S. (2019). Artificial Intelligence in Primary Health Care: Perceptions, Issues, and Challenges. *Yearbook of Medical Informatics*, 28(01), 041-046. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1677901>

Manca, M., Ferraresi, G., Cosma, M., Cavazzuti, L., Morelli, M., & Benedetti, M. G. (2014). Gait Patterns in Hemiplegic Patients with Equinus Foot Deformity. *BioMed Research International*, 2014, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2014/939316>

Mazilu, S., Hardegger, M., Zhu, Z., Roggen, D., Troester, G., Plotnik, M., & Hausdorff, J. (2012). Online Detection of Freezing of Gait with Smartphones and Machine Learning Techniques. *Proceedings of the 6th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare*. <https://doi.org/10.4108/icst.pervasivehealth.2012.248680>

McMillan, S. S., King, M., & Tully, M. P. (2016). How to use the nominal group and Delphi techniques. *International Journal of Clinical Pharmacy*. <https://doi.org/10.1007/s11096-016-0257-x>

Miotto, R., Wang, F., Wang, S., Jiang, X., & Dudley, J. T. (2017). Deep learning for healthcare: review, opportunities and challenges. *Briefings in Bioinformatics*, 19(6), 1236-1246. <https://doi.org/10.1093/bib/bbx044>

Nait Aicha, A., Englebienne, G., van Schooten, K., Pijnappels, M., & Kröse, B. (2018). Deep Learning to Predict Falls in Older Adults Based on Daily-Life Trunk Accelerometry. *Sensors*, 18(5), 1654. <https://doi.org/10.3390/s18051654>

Nam, K. Y., Kim, H. J., Kwon, B. S., Park, J.-W., Lee, H. J., & Yoo, A. (2017). Robot-assisted gait training (Lokomat) improves walking function and activity in people with spinal cord injury: a systematic review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-017-0232-3>

Nieuwboer, A., Dom, R., De Weerd, W., Desloovere, K., Fieuws, S., & Broens-Kaucsik, E. (2001). Abnormalities of the spatiotemporal characteristics of gait at the onset of freezing in Parkinson's disease. *Movement Disorders*, 16(6), 1066-1075. <https://doi.org/10.1002/mds.1206>

Pélissier, J. et Brun, V. (1994) *La marche humaine et sa pathologie – explorations et rééducation*. Masson

Pham, T. D., & Yan, H. (2018). Tensor Decomposition of Gait Dynamics in Parkinson's Disease. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 65(8), 1820-1827. <https://doi.org/10.1109/tbme.2017.2779884>

QUADAS-2 (s.d). Bristol Medical School : Population Health Sciences, University of Bristol <https://www.bristol.ac.uk/population-health-sciences/projects/quadas/quadas-2/> consulté le 13 avril 2020

Reynolds, G. (2019). *Something in the Way We Move*. The New York Times <https://www.nytimes.com/2019/10/23/well/move/something-in-the-way-we-move.html?fbclid=IwAR1EeuVrjYWkZgjoZIEWDWQWNWgkUQwRQmndhKsaBoDU0bMtHKbq76d6npc> consulté le 1^{er} janvier 2020

Rodríguez-Martín, D., Samà, A., Pérez-López, C., Català, A., Moreno Arostegui, J. M., Cabestany, J., ... Rodríguez-Molinero, A. (2017). Home detection of freezing of gait using support vector machines through a single waist-worn triaxial accelerometer. *PLOS ONE*, 12(2), e0171764. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171764>

Rosier, F. (2019). *Comment l'intelligence artificielle va bouleverser les professions de santé*. Le Monde. https://www.lemonde.fr/sciences/article/2019/05/07/comment-l-intelligence-artificielle-va-bouleverser-les-professions-de-sante_5459387_1650684.html consulté le 23 décembre 2019

Rowe, M. (2019). An Introduction to Machine Learning for Clinicians. *Academic Medicine*, 94(10), 1433-1436. <https://doi.org/10.1097/acm.0000000000002792>

Saria, S., Butte, A., & Sheikh, A. (2018). Better medicine through machine learning: What's real, and what's artificial? *PLOS Medicine*, 15(12), e1002721. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002721>

Shea, B. J., Grimshaw, J. M., Wells, G. A., Boers, M., Andersson, N., Hamel, C., ... Bouter, L. M. (2007). Development of AMSTAR: a measurement tool to assess the methodological quality of systematic reviews. *BMC Medical Research Methodology*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/1471-2288-7-10>

Sigcha, L., Costa, N., Pavón, I., Costa, S., Arezes, P., López, J. M., & De Arcas, G. (2020). Deep Learning Approaches for Detecting Freezing of Gait in Parkinson's Disease Patients through On-Body Acceleration Sensors. *Sensors*, 20(7), 1895. <https://doi.org/10.3390/s20071895>

Study Quality Assessment Tools (s.d) National Heart, Lung, and Blood Institute (NHLBI). <https://www.nhlbi.nih.gov/health-topics/study-quality-assessment-tools> consulté le 13 avril 2020

Tunca, C., Salur, G., & Ersoy, C. (2019). Deep Learning for Fall Risk Assessment with Inertial Sensors: Utilizing Domain Knowledge in Spatio-Temporal Gait Parameters. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 1. <https://doi.org/10.1109/jbhi.2019.2958879>

Wotton, D. (2018) *Intelligence artificielle, machine learning, deep learning : késako ?* Le Digitalab <https://www.ledigitalab.com/fabrique/intelligence-artificielle-machine-learning-deep-learning-kezako/> consulté le 22 décembre 2019

Zhang, Y., Yan, W., Yao, Y., Ahmed, J. B., Tan, Y., & Gu, D. (2020). Prediction of Freezing of Gait in Patients With Parkinson's Disease by Identifying Impaired Gait Patterns. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(3), 591-600. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2020.2969649>

ANNEXES

Annexe 1 : liste des articles exclus

Titre	Auteurs	Méthode de tri	Raison(s) de l'exclusion
Brain computer interfacing: Applications and challenges	Abdulkader et al., 2015	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
The role of Information and Communication Technologies in healthcare: taxonomies, perspectives, and challenges	Aceto et al., 2018	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Mechanisms of Gait Asymmetry Due to Push-Off Deficiency in Unilateral Amputees	Adamczyk et al., 2015	Lecture intégrale	Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche
Diseases diagnosis using fuzzy logic methods: A systematic and meta-analysis review	Ahmadi et al., 2018	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Development as Adaptation: A Paradigm for Gravitational and Space Biology	Alberts et al., 2005	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Prosoposin activates the androgen receptor and potentiates resistance to endocrine treatment in breast cancer	Ali et al., 2015	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Changes in leg cycling muscle synergies after training augmented by functional electrical stimulation in subacute stroke survivors: a pilot study	Ambrosini et al., 2020	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Fixation Prediction and Visual Priority Maps for Biped Locomotion	Anantrasirichai et al., 2018	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Indirect Measurement of Ground Reaction Forces and Moments by Means of Wearable Inertial Sensors: A Systematic Review	Ancillao et al., 2018	Lecture intégrale	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
The predictive validity of neonatal MRI for neurodevelopmental outcome in very preterm children	Anderson et al., 2015	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Successful aging: Advancing the science of physical independence in older adults	Anton et al., 2015	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
The adaptive deep brain stimulation challenge	Arlotti et al., 2016	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Sensor-based safety management	Asadzadeh et al., 2020	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Development and validation of warning system of ventricular tachyarrhythmia in patients with heart failure with heart rate variability data	Au-Yeung et al., 2018	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Patient Motion Using a Computerized Leg Brace in Everyday Locomotion Tasks	Auberger et al., 2019	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Free-Locomotion of Underwater Vehicles Actuated by Ionic Polymer Metal Composites	Aureli et al., 2010	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Endocrine-related quality of life in a randomized trial of exercise on aromatase inhibitor-induced arthralgias in breast cancer survivors	Baglia et al., 2019	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Nociception, Pain, Negative Moods, and Behavior Selection	Baliki et al., 2015	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Automatic Assessment of a Rollator-User's Condition During Rehabilitation Using the i-Walker Platform	Ballesteros et al., 2017	Lecture du résumé	Etude n'utilisant pas le machine ou le deep learning

The Genetics of Multiple Sclerosis: From 0 to 200 in 50 Years	Baranzini et al., 2017	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Surgical Decompression for Painful Diabetic Peripheral Nerve Compression and Neuropathy: A Comprehensive Approach to a Potential Surgical Problem	Baravarian et al., 2006	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Model Predictive Direct Current Control of a Permanent Magnet Synchronous Generator Based on Flexible Lyapunov Function Considering Converter Dead Time	Bariša et al., 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Hazard identification by methods of animal-based toxicology	Barlow et al., 2002	Lecture du titre	Etude non menée sur l'homme
Pathophysiology of L-dopa-induced motor and non-motor complications in Parkinson's disease	Bastide et al., 2015	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Finite element modelling of the foot for clinical application: A systematic review	Behfootian et al., 2017	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Artificial intelligence for assisting diagnostics and assessment of Parkinson's disease—A review	Belić, et al., 2019	Lecture intégrale	Revue conservée pour la discussion
Ambulatory Center of Mass Prediction Using Body Accelerations and Center of Foot Pressure	Betket et al., 2008	Lecture du résumé	Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche
Reactive Planning for Assistive Robots	Bevilacqua et al., 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Calibration and validation of accelerometry to measure physical activity in adult clinical groups: A systematic review	Bianchim et al., 2019	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Chapter 12 The primate model of Parkinson's disease: its usefulness, limitations, and importance in directing future studies	Bingaman et al., 2000	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Past and current use of walking measures for children with spina bifida: a systematic review	Bisaro et al., 2015	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Towards a multidisciplinary approach to understand and manage obesity and related diseases	Bischoff et al., 2017	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
The Synchronized Dynamics of Complex Systems	Boccaletti et al., 2008	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Predicting Transitioning Walking Gaits: Hip and Knee Joint Trajectories From the Motion of Walking Canes	Boudali et al., 2019	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Online Gait Transitions and Disturbance Recovery for Legged Robots via the Feasible Impulse Set	Boussema et al., 2019	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Bürgerliche Intelligenz	Brain, 1995	Lecture du titre	Langue
What does best evidence tell us about robotic gait rehabilitation in stroke patients: A systematic review and meta-analysis	Bruni et al., 2018	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
In need of high-throughput behavioral systems	Brunner et al., 2002	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
The Role of Big Data in the Management of Sleep-Disordered Breathing	Budhiraja et al., 2016	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Measuring free-living physical activity in COPD patients: Deriving methodology standards for clinical trials through a review of research studies	Byrom et al., 2016	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Machine Learning for Precision Psychiatry: Opportunities and Challenges	Bzdok et al., 2018	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
A systematic review of gait analysis methods based on inertial sensors and adaptive algorithms	Caldas et al. 2017	Lecture intégrale	Revue conservée pour la discussion
Adaptive predictive systems applied to gait analysis: A systematic review	Caldas et al., 2020	Lecture intégrale	Revue conservée pour la discussion
Future of Personalized Cardiovascular Medicine: JACC State-of-the-Art Review	Califf et al., 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche

The Genetics of Neuropathic Pain from Model Organisms to Clinical Application	Calvo et al., 2019	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Why bother using non-human primate models of cognitive disorders in translational research?	Camus et al., 2015	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Single-layer Learning Based Predictive Control with Echo State Network for Pneumatic Muscle Actuators-driven Exoskeleton	Cao et al., 2020	Lecture du titre	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Get a grip: individual variations in grip strength are a marker of brain health	Carson et al., 2018	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Why use a connectivity-based approach to study stroke and recovery of function?	Carter et al., 2012	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Biomechanics and Fisheries Conservation	Castro et al., 2005	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Northern Cross Radiotelescope: Test and Measurements of Reliability Performance on Radioreceiver Chains	Catelani et al., 2009	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
NTP-CERHR Expert Panel report on the reproductive and developmental toxicity of methanol	Center for the Evaluation of Risks to Human Reproduction, 2004	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Frailty and sarcopenia: From theory to clinical implementation and public health relevance	Cesari et al., 2016	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Virtual Interactive Musculoskeletal System (VIMS) in orthopaedic translational research	Chao et al., 2013	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Numerical Model Reduction for the Prediction of Interface Pressure Applied by Compression Bandages on the Lower Leg	Chassage et al., 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
A review of analytical techniques for gait data. Part 1: fuzzy, statistical and fractal methods	Chau, 2001	Lecture intégrale	Article en doublon Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche
A review of analytical techniques for gait data. Part 2: neural network and wavelet methods	Chau, 2002	Lecture intégrale	Revue conservée pour la discussion
Investigation of the biochemical effects of renin inhibition in normal volunteers treated by an ACE inhibitor	Chauveau et al., 1992	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Human upright posture control models based on multisensory inputs; in fast and slow dynamics	Chiba et al., 2016	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Stochastic mechano-chemical kinetics of molecular motors: A multidisciplinary enterprise from a physicist's perspective	Chowdhury, 2013	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Let's All Pull Together: Principles for Sharing Large Loads in Microrobot Teams	Christensen et al., 2016	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
A review on video-based active and assisted living technologies for automated lifelogging	Climen et al., 2020	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Criticality in the brain: A synthesis of neurobiology, models and cognition	Cocchi et al., 2017	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Whole animal modeling: piecing together nematode locomotion	Cohen et al., 2019	Lecture du titre	Article en doublon Etude non menée chez l'homme
Microstructural imaging in the spinal cord and validation strategies	Cohen, 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Extending a turbid medium BRDF model to allow sloping terrain with a vertical plant stand	Combal et al., 2000	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Finite element models of the tibiofemoral joint: A review of validation approaches and modelling challenges	Cooper et al., 2019	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
Systematic review of smartphone-based passive sensing for health and wellbeing	Cornet et al., 2018	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Wrist-worn and chest-strap wearable devices: systematic review on accuracy and metrological characteristics	Cosoli et al., 2020	Lecture intégrale	Article en doublon Etude ne concernant pas l'analyse de la marche

Traumatic Brain Injury: A Review of Practice Management and Recent Advances	Crooks et al., 2007	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Wide-band measurements of nondeterministic effects on the BRAN indoor radio channel	Cuinas et al., 2004	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
The functional organization of anti-predator behaviour in the pied flycatcher: A study of avian visual perception	Curio, 1975	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Toward sophisticated basal ganglia neuromodulation: Review on basal ganglia deep brain stimulation	Da Cunha et al., 2015	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Why do we move to the beat? A multi-scale approach, from physical principles to brain dynamics	Damm et al., 2020	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Increasing fall risk awareness using wearables: A fall risk awareness protocol	Danielsen et al., 2016	Lecture intégrale	Revue conservée pour la discussion
A comprehensive survey on the biometric recognition systems based on physiological and behavioral modalities	Dargan et al., 2020	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Computational Neuroethology: A Call to Action	Datta et al., 2019	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
CHILE: outcomes of a group randomized controlled trial of an intervention to prevent obesity in preschool Hispanic and American Indian children [with consumer summary]	Davis et al., 2016	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Neurocognitive assessment of persons with HIV diseases	Dawes et al., 2007	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Calibration of raw accelerometer data to measure physical activity: A systematic review	De Almeida et al., 2018	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Shoulder assessment according to the international classification of functioning by means of inertial sensor technologies: A systematic review	De Baets et al., 2017	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
On defining educational objectives	De Landsheere, 1977	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Design and Open-Loop Control of the ParkourBot, a Dynamic Climbing Robot	Degani et al., 2014	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Concurrent validity of Physiological Cost Index in walking over ground and during robotic training in subacute stroke patients	Delussu et al., 2014	Lecture du résumé	Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche
Osteoporosis in men	Dickson, 2011	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Evaluation of the Achilles Ankle Exoskeleton	Dijk et al., 2017	Lecture du titre	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Prediction for human motion tracking failures	Dockstader et al., 2006	Lecture intégrale	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Predicting Occupancy Distributions of Walking Humans With Convolutional Neural Networks	Doellinger et al., 2018	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
On-Line Gait Adjustment for Humanoid Robot Robust Walking Based on Divergence Component of Motion	Dong et al., 2019	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Critical appraisal of definitions and diagnostic criteria for sarcopenic obesity based on a systematic review	Donini et al., 2019	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
A Novel Approach for the Test of Active Pedestrian Safety Systems	Doric et al., 2017	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
The Drosophila melanogaster malpighian tubule	Dow et al., 2001	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Bio-LSTM: A Biomechanically Inspired Recurrent Neural Network for 3-D Pedestrian Pose and Gait Prediction	Du et al., 2019	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
An update on Sarcocystis neurona infections in animals and equine protozoal myeloencephalitis (EPM)	Dubey et al., 2015	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
The Role of Motion Analysis in Surgical Planning for Gait Abnormalities in Cerebral Palsy	Dugan et al., 2020	Lecture du résumé	Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche

Model-based estimation of muscle forces exerted during movements	Erdemir et al., 2007	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Robust Multiperson Tracking from a Mobile Platform	Ess et al., 2009	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Use of comprehensive geriatric assessment in older cancer patients:: Recommendations from the task force on CGA of the International Society of Geriatric Oncology (SIOG)	Extermann et al., 2005	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Calibration and validation of accelerometer-based activity monitors: A systematic review of machine-learning approaches	Farrahi et al., 2019	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
The Heterogeneity Problem: Approaches to Identify Psychiatric Subtypes	Feczko et al., 2019	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Assessing cerebellar brain inhibition (CBI) via transcranial magnetic stimulation (TMS): A systematic review	Fernandez et al., 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Aging, alzheimer's disease, and word recognition: A review of the recent literature	Ferraro, 1995	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Automatic recognition of gait patterns in human motor disorders using machine learning: A review	Figueiredo et al., 2018	Lecture intégrale	Article en doublon Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Natural world physical, brain operational, and mind phenomenal space–time	Fingelkurts et al., 2010	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
The relationship between alcoholic cerebellar degeneration and cognitive and emotional functioning	Fitzpatrick et al., 2008	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Injection anaesthesia with fentanyl-midazolam-medetomidine in adult female mice: importance of antagonization and perioperative care	Fleischmann et al., 2016	Lecture du titre	Etude non menée sur l'homme
Effect of sertraline on risk of falling in older adults with psychotic depression on olanzapine: results of a randomized placebo-controlled trial	Flint et al., 2014	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Modeling Parkinson's disease and treatment complications in rodents: Potentials and pitfalls of the current options	Francardo, 2018	Lecture du titre	Etude non menée sur l'homme
A Machine Learning Approach to Automated Gait Analysis for the Noldus Catwalk System	Fröhlich et al., 2018	Lecture du résumé	Etude non menée sur l'homme
Robotic-assisted gait training in Parkinson's disease: a three-month follow-up randomized clinical trial	Furnari et al., 2017	Lecture du titre	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Validation of 6-minute walk distance as a surrogate end point in pulmonary arterial hypertension trials	Gabler et al., 2012	Lecture du titre	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Use of Animation Software in Simulation of On-Body Communications Channels at 2.45 GHz	Gallo et al., 2008	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Office-Based Anesthesia for the Urologist	Galway, 2013	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Detection and Classification of Postural Transitions in Real-World Conditions	Ganea et al., 2012	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Logic-Enhanced Adaptive Network-Based Fuzzy Classifier for Fall Recognition in Rehabilitation	Gao et al., 2020	Lecture intégrale	Etude portant sur des sujets non « pathologiques »
The basal ganglia and the locomotor regions	Garcia, 1986	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
The standardized functional observational battery: Its intrinsic value remains in the instrument of measure: The rat	Gauvin et al., 2016	Lecture du titre	Etude non menée sur l'homme
How to Improve Robustness in Muscle Synergy Extraction	Ghislier et al., 2019	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
The identification of living persons on images: A literature review	Gibelli et al., 2016	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
From A to Z: Wearable technology explained	Godfrey et al., 2018	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche

Therapeutic RNA interference for neurodegenerative diseases: From promise to progress	Gonzalez, 2007	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Pediatric Minor Traumatic Brain Injury	Gordon, 2006	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Diffusion-MRI in neurodegenerative disorders	Goveas et al., 2015	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Functional MRI localizing in the cerebellum	Grodd et al., 2005	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Footedness as a potential factor that contributes to the causation of corn and callus formation in lower extremities of physically active individuals	Grouios, 2005	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
A Multi-Agent Approach for Reactionary Delay Prediction of Flights	Guleria et al., 2019	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Sensing, communication and security planes: A new challenge for a smart city system design	Habibzadeh et al., 2018	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Machine learning in human movement biomechanics: Best practices, common pitfalls, and new opportunities	Halilaj et al., 2018	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Cluster and Multiple Correspondence Analyses in Rheumatology: Paths to Uncovering Relationships in a Sea of Data	Han et al., 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Accelerating research on biological aging and mental health: Current challenges and future directions	Han et al. 2019	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Energy-Optimal Human Walking With Feedback-Controlled Robotic Prostheses: A Computational Study	Handford et al., 2018	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Analysis and Prediction of the Freezing of Gait Using EEG Brain Dynamics	Handojoseno et al., 2015	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Ambulation and Spinal Cord Injury	Hardin et al., 2013	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Procedures for gait analysis	Harris et al., 1994	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Predictors of Functional Outcome Following Stroke	Harvey, 2015	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Efficient Equilibrium Testing Under Adhesion and Anisotropy Using Empirical Contact Force Models	Hauser et al., 2018	Lecture du résumé	Etude non menée sur l'homme
The effects of robot assisted gait training on temporal-spatial characteristics of people with spinal cord injuries: A systematic review	Hayes et al., 2018	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
PRAM: A Novel Approach for Predicting Riskless State of Commodity Future Arbitrages With Machine Learning Techniques	He et al., 2019	Lecture du titre	Etude non menée sur l'homme
Ability of existing Malnutrition Screening Tools to identify risk of starvation, sarcopenia and cachexia: A systematic review	Healy et al., 2014	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Creating the Feedback Loop: Closed-Loop Neurostimulation	Hebb et al., 2014	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Behavioral seizure correlates in animal models of epilepsy: A road map for assay selection, data interpretation, and the search for causal mechanisms	Heinrichs et al., 2006	Lecture du titre	Etude non menée sur l'homme
Prenatal alcohol exposure: Fetal programming and later life vulnerability to stress, depression and anxiety disorders	Hellemans et al., 2010	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Corticostratial microRNAs in addiction	Heyer et al., 2015	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Motor dysfunction as research domain across bipolar, obsessive-compulsive and neurodevelopmental disorders	Hirjak et al., 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche

ACC/AHA 2005 Guidelines for the Management of Patients With Peripheral Arterial Disease (Lower Extremity, Renal, Mesenteric, and Abdominal Aortic): A Collaborative Report from the American Association for Vascular Surgery/Society for Vascular Surgery, Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, Society for Vascular Medicine and Biology, Society of Interventional Radiology, and the ACC/AHA Task Force on Practice Guidelines (Writing Committee to Develop Guidelines for the Management of Patients With Peripheral Arterial Disease)	Hirsh et al., 2006	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Gaussian Process Trajectory Learning and Synthesis of Individualized Gait Motions	Hong et al., 2019	Lecture du résumé	Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche
Functional Near-Infrared Spectroscopy: Potential and Limitations in Neuroimaging Studies	Hoshi, 2005	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Deep Generative Models With Data Augmentation to Learn Robust Representations of Movement Intention for Powered Leg Prostheses	Hu et al., 2019	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Learning and Generalization of Compensative Zero-Moment Point Trajectory for Biped Walking	Hu et al., 2016	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
A Novel Weight-Bearing Lower Limb Exoskeleton Based on Motion Intention Prediction and Locomotion State Identification	Hua et al., 2019	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Patch Distribution Compatible Semisupervised Dimension Reduction for Face and Human Gait Recognition	Huang et al., 2012	Lecture intégrale	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Experimental Validation of a Feed-Forward Predictor for the Spring-Loaded Inverted Pendulum Template	I et al., 2015	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Computer mediated reality technologies: A conceptual framework and survey of the state of the art in healthcare intervention systems	Ibrahim et al., 2019	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Dynamical Movement Primitives: Learning Attractor Models for Motor Behaviors	Ijspeert et al., 2013	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
A survey of emotion recognition methods with emphasis on E-Learning environment	Imani et al., 2019	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Deliberation for autonomous robots: A survey	Ingrand et al., 2017	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Animal models of transcranial direct current stimulation: Methods and mechanisms	Jackson et al., 2016	Lecture du titre	Etude non menée sur l'homme
Application of a Rat Hindlimb Model: A Prediction of Force Spaces Reachable Through Stimulation of Nerve Fascicles	Jonhson et al., 2011	Lecture du titre	Etude non menée sur l'homme
Predicting Athlete Ground Reaction Forces and Moments From Spatio-Temporal Driven CNN Models	Jonhdon et al., 2019	Lecture intégrale	Article ne concernant pas l'analyse de la marche
Three machine learning techniques for automatic determination of rules to control locomotion	Jonic et al., 1999	Lecture intégrale	Article ne concernant pas l'analyse de la marche
Inattentional Blindness for Redirected Walking Using Dynamic Foveated Rendering	Joshi et al., 2020	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
A Review of JACC Journal Articles on the Topic of Interventional Cardiology	Journal of the American College of Cardiology, 2013	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Disrupted action perception in autism: Behavioral evidence, neuroendophenotypes, and diagnostic utility	Kaiser et al., 2012	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
A review on prognostic techniques for non-stationary and non-linear rotating systems	Kan et al., 2015	Lecture du titre	Article en doublon Etude non menée chez l'homme

Mapping human brain lesions and their functional consequences	Karnath et al., 2018	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Emerging role of eHealth in the identification of very early inflammatory rheumatic diseases	Kataria et al., 2019	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Prediction Error in the PMd As a Criterion for Biological Motion Discrimination: A Computational Account	Kawai et al., 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Movement Path Tortuosity in Free Ambulation: Relationships to Age and Brain Disease	Kearns et al., 2017	Lecture du résumé	Etude non menée sur l'homme
Will the Pedestrian Cross? A Study on Pedestrian Path Prediction	Keller et al., 2014	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Application of Higuchi's fractal dimension from basic to clinical neurophysiology: A review	Kesić et al., 2016	Lecture du titre	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Osteoarthritis year in review 2019: imaging	Kijowski et al., 2020	Lecture du titre	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Discriminative Learning for Dynamic State Prediction	Kim et al., 2009	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Digital technology to enable aging in place	Kim et al., 2017	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Application of data fusion techniques and technologies for wearable health monitoring	King et al., 2017	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Asperger syndrome: diagnosis and external validity	Klin et al., 2003	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Group Behavior Recognition for Gesture Analysis	Kosta et al., 2008	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Machine learning in control of functional electrical stimulation systems for locomotion	Kostov et al., 1995	Lecture intégrale	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Neurobehavioural evidence for the involvement of the FMR1 gene in female carriers of fragile X syndrome	Kraan et al., 2013	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Trends in biomedical signal feature extraction	Krishnan et al., 2018	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Motion Biomarkers Showing Maximum Contrast Between Healthy Subjects and Parkinson's Disease Patients Treated With Deep Brain Stimulation of the Subthalamic Nucleus. A Pilot Study	Kuhner et al., 2019	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Physical approach to complex systems	Kwapień et al., 2012	Lecture du titre	Article en doublon Etude non menée chez l'homme
Dopamine transporter knockdown mice in the behavioral pattern monitor: A robust, reproducible model for mania-relevant behaviors	Kwiatkowski, et al., 2019	Lecture du titre	Etude non menée sur l'homme
The Role of Neuroimaging in Predicting Neurodevelopmental Outcomes of Preterm Neonates	Kwon et al., 2014	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
A Soft Wearable Robotic Ankle-Foot-Orthosis for Post-Stroke Patients	Kwon et al., 2019	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Systems & Control for the future of humanity, research agenda: Current and future roles, impact and grand challenges	Lamnabhi et al., 2017	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
The state of knowledge on technologies and their use for fall detection: A scoping review	Lapierre et al., 2018	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Towards measurement of the Healthy Ageing Phenotype in lifestyle-based intervention studies	Lara et al., 2013	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
The epigenetics of aging and neurodegeneration	Lardenoije et al., 2015	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche

Innovative diagnostic tools for early detection of Alzheimer's disease	Laske et al., 2015	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Why would Parkinson's disease lead to sudden changes in creativity, motivation, or style with visual art?: A review of case evidence and new neurobiological, contextual, and genetic hypotheses	Lauring et al., 2019	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
The role of functional capacity evaluation in management of foot and ankle dysfunction	Lechner, 2002	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Templates and Anchors for Antenna-Based Wall Following in Cockroaches and Robots	Lee et al., 2008	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Computational modeling to improve treatments for essential tremor	Lee et al., 2016	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Design of a Gait Phase Recognition System That Can Cope With EMG Electrode Location Variation	Lee et al., 2017	Lecture du résumé	Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche
Feature selection in multimedia: The state-of-the-art review	Lee et al., 2017	Lecture du titre	Article en doublon Etude non menée chez l'homme
Osteoporosis Update: Proceedings of the 2013 Santa Fe Bone Symposium	Lewiecki et al., 2014	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Tracking deformable objects in the plane using an active contour model	Leymarie et al., 1993	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Pre-Impact Fall Detection Based on a Modified Zero Moment Point Criterion Using Data From Kinect Sensors	Li et al., 2018	Lecture intégrale	Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche
Encoding Motion Cues for Pedestrian Path Prediction in Dense Crowd Scenarios	Li et al., 2017	Lecture du titre	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Modeling Pedestrian Choice Behavior of Vertical Walking Facilities in Rail Transit Station Considering Reminder Sign	Li et al., 2019	Lecture du titre	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Compensating Delays and Noises in Motion Control of Autonomous Electric Vehicles by Using Deep Learning and Unscented Kalman Predictor	Li et al., 2018	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Prediction of Knee Joint Moment by Surface Electromyography of the Antagonistic and Agonistic Muscle Pairs	Li et al., 2019	Lecture intégrale	Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche
Grid Map Construction and Terrain Prediction for Quadruped Robot Based on C-Terrain Path	Li et al., 2020	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
A narrative review on contemporary and emerging uses of inertial sensing in occupational ergonomics	Lim et al., 2020	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Robust Humanoid Contact Planning With Learned Zero- and One-Step Capturability Prediction	Lin et al., 2020	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Medulla oblongata volume: a biomarker of spinal cord damage and disability in multiple sclerosis	Liptak et al., 2008	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
A review of evidence of health benefit from artificial neural networks in medical intervention	Lisboa et al., 2002	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Track--Stair Interaction Analysis and Online Tipover Prediction for a Self-Reconfigurable Tracked Mobile Robot Climbing Stairs	Liu et al., 2009	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Intent pattern recognition of lower-limb motion based on mechanical sensors	Liu et al., 2017	Lecture du résumé	Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche
Cerebral plasticity as the basis for upper limb recovery following brain damage	Lotze et al., 2019	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
What diagnostic tests are useful for low back pain?	Lurie, 2005	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Hardware Development and Locomotion Control Strategy for an Over-Ground Gait Trainer: NaTUre-Gaits	Luu et al., 2014	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche

Stem cells: A path towards improved epilepsy therapies	Lybrand et al., 2020	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Diffusion magnetic resonance imaging in cerebral small vessel disease	Lyoubi et al., 2017	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
An Intelligence-Based Approach for Prediction of Microscopic Pedestrian Walking Behavior	Ma et al., 2019	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Optimisation of CMOS Compatible Microbolometer Device Performance	Maclean et al., 2012	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
Brain plasticity and functional losses in the aged: scientific bases for a novel intervention	Mahncke et al., 2006	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
The protective effect of inhaled leukotriene D4 receptor antagonist ICI 204,219 against exercise-induced asthma	Makker et al., 1993	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Toward a neuropsychopharmacology of habituation: A vertical integration	Mandell et al., 1986	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Translating state-of-the-art spinal cord MRI techniques to clinical use: A systematic review of clinical studies utilizing DTI, MT, MWF, MRS, and Fmri	Martin et al., 2016	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Generalized Laplacian Eigenmaps for Modeling and Tracking Human Motions	Martinez et al., 2014	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Peripheral neurostimulation and specific motor training of deep abdominal muscles improve posturo-motor control in chronic low back pain	Masse et al., 2013	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Skin Temperature Prediction in Lower Limb Prostheses	Mathur et al., 2016	Lecture du titre	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Clinical Concepts Emerging from fMRI Functional Connectomics	Matthews et al., 2016	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Handle with care: A systematic review on frailty in cardiac care and its usefulness in heart transplantation	Mauthner et al., 2017	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Prediction of Freezing of Gait in Parkinson's From Physiological Wearables: An Exploratory Study	Mazilu et al., 2015	Lecture intégrale	Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche
Motion planning for anguilliform locomotion	Mclsaac et al., 2003	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
American Association of Clinical Endocrinologists, The Obesity Society, and American Society for Metabolic & Bariatric Surgery Medical Guidelines for Clinical Practice for the Perioperative Nutritional, Metabolic, and Nonsurgical Support of the Bariatric Surgery Patient	Mechanick et al., 2008	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Experimentally Verified Optimal Serpentine Gait and Hyperredundancy of a Rigid-Link Snake Robot	Mehta et al., 2008	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
The role of zinc, copper, manganese and iron in neurodegenerative diseases	Mezzaroba et al., 2019	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Advanced Neurotechnologies for the Restoration of Motor Function	Micera et al., 2020	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Translation of MicroRNA-Based Huntingtin-Lowering Therapies from Preclinical Studies to the Clinic	Minarikova et al., 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
(Double blind comparative study on the effect of low energy laser irradiation to rheumatoid arthritis)	Miyagi, 1989	Lecture du titre	Article en doublon Langue
A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis	Moeslund et al., 2006	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
MAST Upgrade Divertor Facility: A Test Bed for Novel Divertor Solutions	Morris et al., 2018	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
Diffuse large B-cell lymphoma in the elderly: Impact of prognosis, comorbidities, geriatric assessment, and supportive care on clinical practice. An International Society of Geriatric Oncology (SIOG) Expert Position Paper	Morrisson et al., 2015	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche

What can autism teach us about the role of sensorimotor systems in higher cognition? New clues from studies on language, action semantics, and abstract emotional concept processing	Moseley et al., 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
On Impact Dynamics and Contact Events for Biped Robots via Impact Effects	Mu et al., 2006	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Temporal variability in human performance: A systematic literature review	Muhs et al., 2018	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Detection of an Intruder and Prediction of His State of Motion by Using Seismic Sensor	Mukhopadhyay et al., 2018	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Assessment of motor recovery and decline	Mulder et al., 2002	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Estimation of Gait Mechanics Based on Simulated and Measured IMU Data Using an Artificial Neural Network	Mundt et al., 2020	Lecture intégrale	Etude ne concernant pas la marche
Cognitive motor processes: The role of motor imagery in the study of motor representations	Munzert et al., 2009	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Prediction of Freezing of Gait in Parkinson's Disease Using Statistical Inference and Lower-Limb Acceleration Data	Naghavi et al., 2019	Lecture du résumé	Etude n'utilisant pas le deep learning ou le machine learning
Efficacy of combination therapy with erythropoietin and methylprednisolone in clinical recovery of severe relapse in multiple sclerosis	Najmi et al., 2014	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
An empirical comparison of neural networks and machine learning algorithms for EEG gait decoding	Nakagome et al., 2020	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Implementation of machine vision for detecting behaviour of cattle and pigs	Nasirahmadi et al., 2017	Lecture du titre	Article en doublon Etude non menée chez l'homme
Validation of test performance characteristics and minimal clinically important difference of the 6-minute walk test in patients with idiopathic pulmonary fibrosis	Nathan et al., 2015	Lecture du titre	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Neurologic, Oncologic, Mechanical, and Systemic and Other Decision Frameworks for Spinal Disease	Newman et al., 2020	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Physiotherapy for functional (psychogenic) motor symptoms: a systematic review	Nielsen et al., 2013	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Osteoarthritis year in review 2018: imaging	Nieminen et al., 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Predicting quadriceps muscle activity during gait with an automatic rule determination method	Nikolic et al., 1998	Lecture du résumé	Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche
The effect of aquatic therapy on postural balance and muscle strength in stroke survivors -- a randomized controlled pilot trial [with consumer summary]	Noh et al., 2008	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Pedunculopontine nucleus: An integrative view with implications on Deep Brain Stimulation	Nowacki et al., 2019	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Deep learning algorithms for human activity recognition using mobile and wearable sensor networks: State of the art and research challenges	Nweke et al., 2018	Lecture intégrale	Article en doublon Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Randomized controlled trial of a home-based walking program to reduce moderate to severe aromatase inhibitor-associated arthralgia in breast cancer survivors	Nyrop et al., 2017	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Atopaxar and its effects on markers of platelet activation and inflammation: results from the LANCELOT CAD program	O'Donoghue et al., 2012	Lecture du titre	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Invited review: Cattle lameness detection with accelerometers	O'Leary et al., 2020	Lecture du titre	Etude non menée sur l'homme

An expert system feedback tool improves the reliability of clinical gait kinematics for older adults with lower limb osteoarthritis	Osis et al., 2017	Lecture intégrale	Etude n'utilisant pas le deep learning ou le machine learning
Determination and Management of Cable Interferences Between Two 6-DOF Foot Platforms in a Cable-Driven Locomotion Interface	Otis et al., 2009	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Advanced neuroimaging and its role in predicting neurodevelopmental outcomes in very preterm infants	Parikh et al., 2016	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Simulation and analysis of polarimetric radar signatures of human gaits	Park et al., 2014	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Companion animal models of neurological disease	Partridge et al., 2020	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
The Design and Evaluation of a Large-Scale Real-Walking Locomotion Interface	Peck et al., 2012	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Spherical squirmers: models for swimming micro-organisms	Pedley et al., 2016	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Predicting Protein Functions by Using Unbalanced Random Walk Algorithm on Three Biological Networks	Pengj et al., 2017	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
A survey on computer-assisted Parkinson's Disease diagnosis	Pereira et al., 2019	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Effectiveness of aquatic therapy for the control of pain and increased functionality in people with Parkinson's disease: a randomized clinical trial	Perez et al., 2019	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
A bicentric controlled study on the effects of aquatic Ai Chi in Parkinson disease	Perez et al., 2018	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Automatic vs hand-controlled walking of paraplegics	Popović et al., 2003	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Paradoxical Decision-Making: A Framework for Understanding Cognition in Parkinson's Disease	Perugini et al., 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Programming Deep Brain Stimulation for Parkinson's Disease: The Toronto Western Hospital Algorithms	Picillo et al., 2016	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Exceptional Human Longevity	Pignolo et al., 2019	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Brain atrophy in Alzheimer's Disease and aging	Pini et al., 2016	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Finite element models in tissue mechanics and orthopaedic implant design	Prendergast, 1997	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Zero Step Capturability for Legged Robots in Multicontact	Del Prete et al., 2018	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Analysis of muscle coordination strategies in cycling	Prilutsky et al., 2000	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Multi-Source Ensemble Learning for the Remote Prediction of Parkinson's Disease in the Presence of Source-Wise Missing Data	Prince et al., 2019	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Sensorimotor gain control: A basic strategy of motor systems?	Prochazka, 1989	Lecture du titre	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Alzheimer's disease and automatic speech analysis: A review	Pulido et al., 2020	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Treatment of low bone density or osteoporosis to prevent fractures in men and women: a clinical practice guideline update from the American College of Physicians	Qaseem et al., 2017	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Advanced internet of things for personalised healthcare systems: A survey	Qi et al., 2017	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
A Novel Pneumatic Soft Snake Robot Using Traveling-Wave Locomotion in Constrained Environments	Qi et al., 2020	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme

Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature review	Racic et al., 2009	Lecture du résumé	Article en doublon Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche
Healthcare big data processing mechanisms: The role of cloud computing	Rajabion et al., 2019	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Revealing the optimal thresholds for movement performance: A systematic review and meta-analysis to benchmark pathological walking behaviour	Ravi et al., 2020	Lecture intégrale	Article en doublon Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche
The pedunculopontine nucleus—Auditory input, arousal and pathophysiology	Reese et al., 1995	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Progress Toward In Vivo Use of siRNAs-II	Rettig et al., 2012	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Glutamate receptor function in learning and memory	Riedel et al., 2003	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Reference distributions for apolipoproteins AI and B and B/AI ratios: comparison of a large cohort to the world's literature	Ritchie et al., 2006	Lecture du titre	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Review of gender differences in core symptomatology in autism spectrum disorders	Rivet et al., 2011	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Delta Features From Ambient Sensor Data are Good Predictors of Change in Functional Health	Robben et al., 2017	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Chapter 2 Etiology and Maintenance	Rojahn et al., 2007	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
A review on cognitive and brain endophenotypes that may be common in autism spectrum disorder and attention-deficit/hyperactivity disorder and facilitate the search for pleiotropic genes	Rommelse et al., 2011	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Molecular genetic approaches to neurologic and psychiatric diseases	Rosenberg et al., 1985	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Invited review: Sensors to support health management on dairy farms	Rutten et al., 2013	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
sEMG-signal and IMU sensor-based gait sub-phase detection and prediction using a user-adaptive classifier	Ryu et al., 2019	Lecture intégrale	Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche
A Geometry Recognition-Based Strategy for Locomotion Transitions Early Prediction of Prosthetic Devices	Sahoo et al., 2020	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
EEG mu rhythms: Rich sources of sensorimotor information in speech processing	Saltuklaroglu et al., 2018	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Molecular aspects of muscle disease	Samaha, 1979	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Hand synergies: Integration of robotics and neuroscience for understanding the control of biological and artificial hands	Santello et al., 2016	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Quantifying normal and parkinsonian gait features from home movies: Practical application of a deep learning-based 2D pose estimator	Sato et al., 2019	Lecture intégrale	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
A Simple Model to Estimate Plantarflexor Muscle–Tendon Mechanics and Energetics During Walking With Elastic Ankle Exoskeletons	Sawicki et al., 2020	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
From Genes to Brain: Understanding Brain Development in Neurogenetic Disorders Using Neuroimaging Techniques	Schaer et al., 2007	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Convergence of Primary Sensory Cortex and Cerebellar Nuclei Pathways in the Whisker System	Schäfer et al., 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Dysmetria of thought: clinical consequences of cerebellar dysfunction on cognition and affect	Schmahmann, 1998	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche

Robot-assisted training for heart failure patients - a small pilot study	Schoenrath, et al., 2015	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
MPC for Humanoid Gait Generation: Stability and Feasibility	Scianca et al., 2020	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Neuroimaging for Neurodevelopmental Prognostication in High-Risk Neonates	Sewell et al., 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Vibration-Induced Frictional Reduction in Miniature Intracorporeal Robots	Sfakiotakis et al., 2014	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Considerations for Exercise Prescription in Patients With Bone Metastases: A Comprehensive Narrative Review	Sheill et al., 2018	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
A Novel Fall Prediction System on Smartphones	Shen et al., 2017	Lecture intégrale	Etude n'utilisant pas l'intelligence artificielle pour l'analyse de la marche
A Lateral Control Method for Wheel-Footed Robot Based on Sliding Mode Control and Steering Prediction	Shen et al., 2018	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
A survey on iterative learning control with randomly varying trial lengths: Model, synthesis, and convergence analysis	Shen et al., 2019	Lecture du titre	Article en doublon Etude non menée chez l'homme
Control of an inverted pendulum using grey prediction model	Shiuh et al., 200	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Extensive assessment and evaluation methodologies on assistive social robots for modelling human-robot interaction – A review	Sim et al., 2015	Lecture du titre	Article en doublon Etude non menée chez l'homme
Chapter 3 Mapping and Manipulating Neural Circuits in the Fly Brain	Simpson, 2009	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Automated latent fingerprint identification system: A review	Singla et al., 2020	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Naturalistic Stimuli in Neuroscience: Critically Acclaimed	Sonkusare et al., 2019	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Analytical Modeling of a Novel High-Q Disk Resonator for Liquid-Phase Applications	Sotoudegan et al., 2015	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Characterization of the interface between a normal metal and a superconductor using magnetic screening	Soulen et al., 2003	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Detection of and Compensation for EMG Disturbances for Powered Lower Limb Prosthesis Control	Spanias et al., 2016	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Polychaete-Like Undulatory Robotic Locomotion in Unstructured Substrates	Spina et al., 2007	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Antennal Movements and Mechanoreception: Neurobiology of Active Tactile Sensors	Staudacher et al., 2005	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
Prediction of motor recovery after stroke: advances in biomarkers	Stinear et al., 2017	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Translational Motion Tracking of Leg Joints for Enhanced Prediction of Walking Tasks	Stolyarov et al., 2018	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Restoration of use of paralyzed limb muscles using sensory nerve signals for state control of FES-assisted walking	Strange et al., 1999	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
Gait phase information provided by sensory nerve activity during walking: applicability as state controller feedback for FES	Strange et al., 1999	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
A Steering Algorithm for Redirected Walking Using Reinforcement Learning	Strauss et al., 2020	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
Deep Gait Tracking With Inertial Measurement Unit	Sui et al., 2019	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Cognitive impairment in patients with Parkinson's disease: diagnosis, biomarkers, and treatment	Svenningsson et al., 2012	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Can activity monitors predict outcomes in patients with heart failure? A systematic review	Tan et al., 2019	Lecture du titre	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche

Gait Trajectory and Event Prediction from State Estimation for Exoskeletons During Gait	Tanghe et al., 2020	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
A bibliometric analysis of human reliability research	Tao et al., 2020	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Psychosocial factors and perceived tremor disability in essential tremor	Thangavelu et al., 2020	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Sarcopenia	Thomas, 2010	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
A comprehensive survey of the analytical, numerical and experimental methodologies for dynamics of multibody mechanical systems with clearance or imperfect joints	Tin et al., 2018	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
Current advances in lesion-symptom mapping of the human cerebellum	Timmann et al., 2009	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering	Tiwana et al., 2012	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Randomized Controlled Trial of Gait Training Using Gait Exercise Assist Robot (GEAR) in Stroke Patients with Hemiplegia	Tomida et al., 2019	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Composite Pain Biomarker Signatures for Objective Assessment and Effective Treatment	Tracey et al., 2019	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Energy saving mechanisms, collective behavior and the variation range hypothesis in biological systems: A review	Trenchard et al., 2016	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Driving plasticity in the motor cortex in recurrent low back pain	Tsao et al., 2010	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Basic biomechanical measurements of bone: A tutorial	Turner et al., 1993	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Trends on the application of serious games to neuropsychological evaluation: A scoping review	Valladares et al., 2016	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Cartilage adaptation after anterior cruciate ligament injury and reconstruction: implications for clinical management and research? A systematic review of longitudinal MRI studies	Van Ginckel et al., 2013	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Dementia	Van Horn, 1987	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Determining Energy Expenditure From Treadmill Walking Using Hip-Worn Inertial Sensors: An Experimental Study	Vathsangam et al., 2011	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Hierarchical Approaches to Estimate Energy Expenditure Using Phone-Based Accelerometers	Vathsangam et al., 2014	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Direct and crossed effects of somatosensory stimulation on neuronal excitability and motor performance in humans	Veldman et al., 2014	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Biology of frailty: Modulation of ageing genes and its importance to prevent age-associated loss of function	Viña, et al., 2016	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Fear-avoidance and its consequences in chronic musculoskeletal pain: a state of the art	Vlaeyen et al., 2000	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
On comparing functional fault coverage and defect coverage for memory testing	Von-Kyoung et al., 1999	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
Assessing the human-animal relationship in farmed species: A critical review	Waiblinger et al., 2006	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Risk Assessment in Patient Selection for Transcatheter Aortic Valve Replacement	Walsh et al., 2015	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Research progress of artificial psychology and artificial emotion in China	Wang et al., 2016	Lecture du titre	Article en doublon Etude non menée chez l'homme

Differences Between Gait on Stairs and Flat Surfaces in Relation to Fall Risk and Future Falls	Wang et al., 2017	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
A UKF-Based Predictable SVR Learning Controller for Biped Walking	Wang et al., 2013	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
Predictive Models for Evaluating Cognitive Ability in Dementia Diagnosis Applications Based on Inertia- and Gait-Related Parameters	Wang et al., 2018	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Long-term unsupervised mobility assessment in movement disorders	Warmerdam et al., 2020	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Chapter 1 Using Robots to Understand Animal Behavior	Webb, 2008	Lecture du titre	Article en doublon Etude non menée chez l'homme
Where Should I Walk? Predicting Terrain Properties From Images Via Self-Supervised Learning	Wellhausen et al., 2019	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
The modelling of neural circuitry	Willis, 1986	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Windows into human health through wearables data analytics	Witt et al., 2019	Lecture du résumé	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
The effect of two different 18-week walking programmes on aerobic fitness, selected blood lipids and factor XIIa	Woolf et al., 1998	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Early application of deep brain stimulation: Clinical and ethical aspects	Wooen et al., 2013	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
WT1 promotes invasion of NSCLC via suppression of CDH1	Wu et al., 2013	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Individualized Gait Pattern Generation for Sharing Lower Limb Exoskeleton Robot	Wu et al., 2018	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Balance control of a biped robot on a rotating platform based on efficient reinforcement learning	Xi et al., 2019	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Intelligent Prediction of Human Lower Extremity Joint Moment: An Artificial Neural Network Approach	Xiong et al., 2019	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Determining the Online Measurable Input Variables in Human Joint Moment Intelligent Prediction Based on the Hill Muscle Model	Xiong et al., 2020	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Real-Time On-Board Recognition of Continuous Locomotion Modes for Amputees With Robotic Transtibial Prostheses	Xu et al., 2018	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
PoPPL: Pedestrian Trajectory Prediction by LSTM With Automatic Route Class Clustering	Xue et al., 2020	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
Rehabilitation for the management of knee osteoarthritis using comprehensive traditional Chinese medicine in community health centers: study protocol for a randomized controlled trial	Yan et al., 2013	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Vertical Ground Reaction Forces for Given Human Standing Posture With Uneven Terrains: Prediction and Validation	Yang et al., 2013	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Psychometric properties of dual-task balance and walking assessments for individuals with neurological conditions: A systematic review	Yang et al., 2017	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Pedestrian Behavior Modeling From Stationary Crowds With Applications to Intelligent Surveillance	Yi et al., 2016	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme
Computer vision based crowd disaster avoidance system: A survey	Yogameena et al., 2017	Lecture du résumé	Article en doublon Etude non menée chez l'homme
A Training Method for Locomotion Mode Prediction Using Powered Lower Limb Prostheses	Young et al., 2014	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Toward a Unified Approximate Analytical Representation for Spatially Running Spring-Loaded Inverted Pendulum Model	Yu et al., 2020	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme

3D Tracking of Human Motion Using Visual Skeletonization and Stereoscopic Vision	Zago et al., 2020	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Biomechanics and muscle coordination of human walking: Part II: Lessons from dynamical simulations and clinical implications	Zajac et al., 2003	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Intelligent Approach to the Prediction of Changes in Biometric Attributes	Zalasinski et al., 2019	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Conditions for Worm-Robot Locomotion in a Flexible Environment: Theory and Experiments	Zarrouk et al., 2012	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Technology for Chronic Pain	Zhang et al., 2014	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Prediction of Intrinsically Caused Tripping Events in Individuals With Stroke	Zhang et al., 2017	Lecture intégrale	Etude n'utilisant pas le deep learning ou le machine learning
Risk Prediction Model for Knee Arthroplasty	Zhang et al., 2019	Lecture du titre	Etude ne concernant pas la marche
Environmental Features Recognition for Lower Limb Prostheses Toward Predictive Walking	Zhang et al., 2019	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Sequential Decision Fusion for Environmental Classification in Assistive Walking	Zhang et al., 2019	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas l'analyse de la marche
Weakly Supervised Human Fixations Prediction	Zhang et al., 2016	Lecture du résumé	Etude ne concernant pas la marche
Direction-Decision Learning Based Pedestrian Flow Behavior Investigation	Zhang et al., 2020	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
The detection of age groups by dynamic gait outcomes using machine learning approaches	Zhou et al., 2020	Lecture du résumé	Etude menée sur des sujets non « pathologiques »
Evaluation and improvement of human heat tolerance in built environments: A review	Zhu et al., 2019	Lecture du titre	Article en doublon Etude ne concernant pas la marche
Modeling Pedestrian Crossing Paths at Unmarked Roadways	Zhuang et al., 2013	Lecture du titre	Etude non menée chez l'homme
Optimizing Constrained-Environment Redirected Walking Instructions Using Search Techniques	Zmuda et al., 2013	Lecture du résumé	Etude non menée chez l'homme