Commentaire

Le numérique comme outil d'aide à l'évaluation, la rééducation et à l'autonomisation des patients de médecine physique et de réadaptation

A. LAMY[1], C. PAUILHAC[2], A. JOUVION[3], G. DE BRIER[4], M. OBRECHT[5], T. TRAPPIER[6], L. CLAUDEL[7], L. THÉFENNE[8]

(1,7) Hôpital d'Instruction des Armées Sainte-Anne, Service de Médecine Physique et de Réadaptation, Toulon
(2,3,4,5,6,8) Hôpital d'Instruction des Armées Laveran, Service de Médecine Physique et de Réadaptation, Marseille

Auteur correspondant : laurentthefenne@orange.fr

Open access DOI
10.17184/eac.9429

Reçu
le 23 janvier 2025

Accepté
le 12 mai 2025

Publié
le 11 juin 2025

Conflit d'intérêt
Les auteurs ne déclarent pas de conflit d'intérêt.

Résumé :
Le numérique prend une place croissante au sein de notre vie quotidienne. Il peut être un outil précieux en médecine physique et de réadaptation. Le champ des possibilités est vaste. Les auteurs ont voulu décrire par cet article comment utiliser ces différents outils de la e-santé comme moyen d'évaluation et de diagnostic, mais aussi dans le cadre de l'éducation, de la rééducation et de la réadaptation.
L'objectif de cet article est donc de présenter l'état actuel et les perspectives du numérique. La littérature présentée permet de valider scientifiquement l'apport de ces technologies et d'en tirer des exemples.
Les auteurs envisagent ici la place des différents concepts comme une réponse à des besoins non ou insuffisamment couverts par la médecine classique. Le parti pris est donc de voir les éléments positifs de ces moyens sans occulter les risques, comment réparer le blessé sans en arriver à des visions d'homme augmenté. Ils abordent les champs d'application au niveau militaire et les possibles perspectives.

Mots-clés : e-santé. Outils numériques. Télémédecine. Téléréeducation. Médecine d'armée.

Abstract:
DIGITAL TECHNOLOGY AS A TOOL FOR ASSESSMENT, REHABILITATION AND EMPOWERMENT OF PATIENTS IN PHYSICAL AND REHABILITATION MEDICINE
The ever-growing digital technology has reshaped every facet of our lives. It sometimes represents an invaluable tool in physical and rehabilitation medicine. The field of possibilities is infinite.
In this article, the authors describe how to use various e-health tools for assessment and diagnosis, for education, physical therapy and rehabilitation. This article takes stock of the current state of digital technology in today's world, and sheds light on future perspectives. There is enough literature on the subject today to scientifically validate the contribution of these technologies, backed up by a wealth of examples.
The authors' approach is to decide whether digital technology offers a response to needs that are not, or insufficiently, covered by conventional medicine. They focus on the positive aspects of these technologies without playing down the risks, to find innovative reconstructive methods to treat injured patients while avoiding an augmented man" physical appearance. They also look at military applications and possible future prospects.

Keywords: e-health. Digital technology. Telemedicine. Telerehabilitation. Military medicine.

Introduction

À une époque où 93 % de la population française a accès à Internet et 95 % possède un téléphone portable de type smartphone (1), l'environnement numérique est devenu omniprésent.

Le domaine de la santé connaît un intérêt croissant pour l'utilisation des nouvelles technologies numériques au cours de la dernière décennie, comme en témoigne la présence de plus de 6 500 articles publiés sur PubMed entre 2014 et 2024 concernant les applications mobiles en santé. Jusqu'à 94 % des médecins auraient déjà recours à ces nouveaux outils *via* leur smartphone à des fins professionnelles (2).

La santé à l'air du numérique : de quoi parle-t-on ?

Les nouvelles technologies appliquées à la santé sont regroupées sous le terme de « e-santé » (voir figure 1) qui se définit selon l'OMS comme étant « les services du numérique au service du bien-être de la personne » (3).

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

L'e-santé inclut entre autres :

- la télémédecine qui est la médecine pratiquée à distance à l'aide des Technologies d'information et de communication (TIC) ;
- la santé mobile ou *m-health* qui, toujours selon l'OMS, correspond à un ensemble de « pratiques médicales et de santé publique supportées par des appareils mobiles tels que les téléphones mobiles, les dispositifs de surveillance des patients et autres appareils sans fil » (4). Ces outils sont nommés dispositifs ou objets connectés (OC) : connectés à Internet, ils peuvent collecter, stocker, traiter et diffuser des données, ou encore accomplir des actions spécifiques (5,6). En France, ils sont soumis à réglementation par l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM) et la HAS (Haute Autorité de santé) (5,6).
- la télésurveillance, ou surveillance par appareils connectés ;
- en partie, le *quantified-self* ou automesures connectées : ensemble de nouvelles pratiques consistant à analyser ses données personnelles comme l'activité physique ou son mode de vie, selon la CNIL.

L'e-santé s'intègre également dans d'autres champs comme la robotique, la recherche en santé, l'utilisation de dispositifs médicaux informatisés, etc. (7-9). Elle représente un secteur particulièrement novateur et un marché économique et industriel en pleine croissance (5). Pour prendre l'exemple des applications mobiles téléchargeables ou des applications *Web-Based* nécessitant une connexion Internet (5,6), on en retrouvait plus de 327 000 dans le domaine de l'e-santé couvrant plus de 240 pathologies, en 2021, selon une étude de la HAS (10).

La e-santé représente un atout majeur pour la gestion des soins de santé. Elle permet une optimisation du temps pour les soignants, une meilleure surveillance à domicile des maladies chroniques, un accès facilité à l'information médicale pour les patients et les soignants, et contribue à réduire les erreurs médicales en appuyant les décisions cliniques (11,12). Elle encourage également les patients à jouer un rôle actif dans leur traitement, ce qui participe à une amélioration de l'observance. L' e-santé favorise ainsi l'intégration de solutions numériques qui améliorent l'accessibilité et la réactivité des soins, notamment dans les régions sous-desservies, et ouvre de nouvelles perspectives grâce au *Big Data* (ensemble de données trop volumineuses et complexes pour être interprétées par les méthodes d'analyse standard) et à l'intelligence artificielle, celle-ci pouvant être assimilée à un processus d'imitation de l'intelligence humaine qui repose sur la création et l'application d'algorithmes exécutés dans un environnement informatique dynamique (4,8).

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

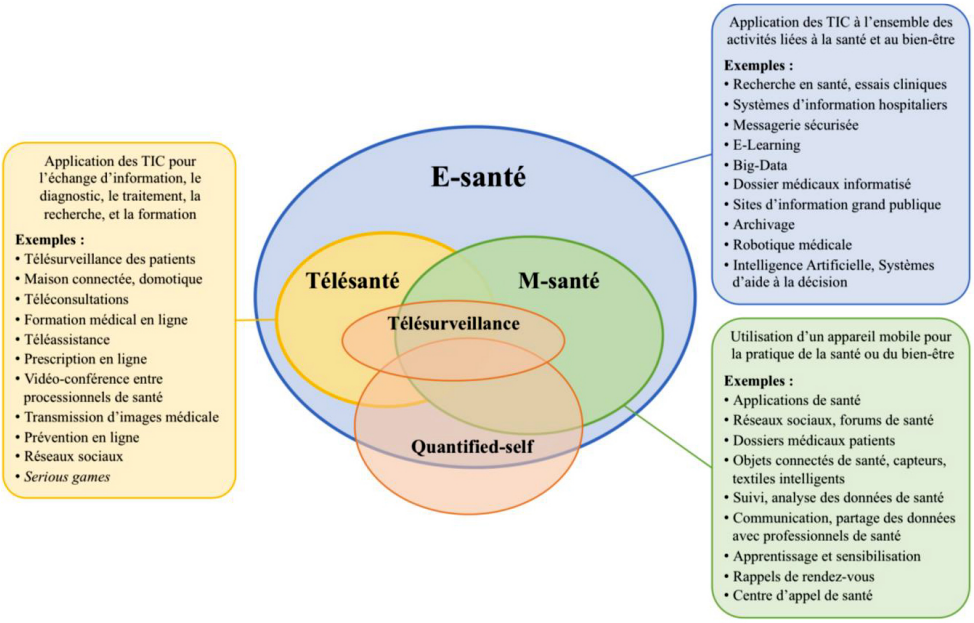


FIG. 1 : Positionnement des concepts de e-santé, télésanté, m-santé, télésurveillance et *quantified-self* (13)

E-santé et médecine physique et de réadaptation

La e-santé a révolutionné le domaine de la Médecine physique et de réadaptation (MPR), ses apports sont nombreux pour améliorer la rééducation ou le suivi à domicile, dans le cadre de nombreuses pathologies (orthopédiques, neurologiques, rhumatologiques, etc.).

L'objectif de cet article est donc de présenter l'état actuel et les perspectives du numérique pour l'évaluation, l'éducation et la rééducation des patients en MPR, ainsi que son adaptabilité au milieu militaire, en s'appuyant sur une revue narrative de la littérature.

1 Outils numériques d'évaluation, d'aide à la décision et de suivi en médecine physique et de réadaptation

1.1 Les outils numériques d'évaluation

On parle de « téléévaluation » (ou *teleassessment* en anglais) lorsqu'on intègre un ou plusieurs outils numériques à une évaluation. On le retrouve avec les machines d'isocinétisme ou dynamomètres informatisées et motorisées (voir figure 2) destinées à mesurer la force musculaire, ou encore des plateformes d'Analyse quantifiée de la marche (AQM) (voir figure 3).

Il existe un besoin de développer des systèmes d'évaluation à la fois précis, mais également plus « écologiques », c'est-à-dire plus proches des conditions de vie réelle.

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816



Fig. 2 : Machine d'isocinétisme Con-Trex®



Fig. 3 : Tapis d'AQM GAITrite®

Les systèmes de capture de mouvement (*motion capture* en anglais) ou *Mocap* (voir figure 4), permettent d'enregistrer la position et la rotation d'objets ou de membres d'êtres vivants en temps réel, et de les restituer visuellement via un moteur 3D.
Ils peuvent faciliter l'évaluation quantitative pour des mouvements complexes comme la tâche main – bouche, chez le parkinsonien, décomposée selon les paramètres de vitesse et d'angles des différentes articulations du membre supérieur, comparativement à des sujets sains (14).
Les exosquelettes permettent d'améliorer la précision de la mesure du mouvement en temps réel. Ils recueillent des paramètres de posture, d'équilibre et de marche et mettent en évidence des dysfonctionnements subtils, parfois indétectables lors d'évaluations cliniques classiques (15).
La réalité virtuelle réalise une évaluation motrice fine du fonctionnement cognitif et comportemental en se rapprochant des conditions de vie « écologiques ». Elle a été évaluée dans les troubles attentionnels (16), les troubles visuo-spatiaux (17) ou la négligence hémicorporelle (18). Elle a montré son efficacité pour prédire les performances en vie quotidienne, par exemple la réalisation de courses au supermarché après un AVC (19) (voir figure 5).



Fig. 4 : Exemple de système MOCAP®



Fig. 5 : Monde virtuel
ou *virtual actionplanning-supermarket*

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

Pour la téléévaluation, Güngör a montré que certains tests de force et d'endurance (gainage ventral et latéral, pompes, abdominaux), évalués à distance chez des adultes sains et sportifs, sont reproductibles par rapport à des tests en présentiels, avec un coefficient de corrélation compris entre 0,91 et 0,97 (20). Une autre étude a également confirmé que la téléévaluation du mouvement, basée sur une analyse cinématique 3D retransmise via vidéo-conférence, peut-être une alternative valide et fiable à l'examen présentiel (21).

On retrouve un taux de corrélation compris entre 0,95 et 0,97 pour les épreuves du *timed up and go test*, du *30 sec sit to stand* et du *Functional Reach Test*, réalisées en distanciel par rapport à leurs résultats en présentiel (21).

Le *Sollerman Hand Function Test* (SHT) et le *Box and Block Test* (BBT) ont été également évalués à distance. On n'utilise pas de matériel spécialisé, ce qui facilite leur réalisation (22).

Au rugby, est évalué le protège-dent connecté pour dépister les probabilités de traumatisme crânien. Ce dispositif recueille en temps réel plusieurs paramètres comme la puissance et la direction des chocs reçus.

Ces techniques de téléévaluation peuvent évidemment s'intégrer dans des protocoles de télérééducation, offrant une prise en charge globale qui inclut évaluation, rééducation, éducation et prévention. Cramer l'utilise pour la rééducation post-AVC (23).

1.2 Aide à la décision et au suivi

Des applications ou des sites génériques peuvent faciliter la communication (Mediglotte®, TraducMed®), aider à la décision (Antibioclic®) ou encore aider à la prescription (Ordoclic®, Prescrire®, Vidal®, etc.)

La MPR n'échappe pas à ces besoins, certains centres utilisent déjà des algorithmes d'intelligence artificielle aidant à l'interprétation des examens d'imagerie comme Smart Urgence®, Rayvolve®, ou BoneView®.
Ces applications ont montré avec une bonne sensibilité et une bonne spécificité pour leur capacité à détecter des fractures osseuses chez les patients (24). Pour parvenir à ces résultats, les IA utilisent le concept de *machine learning*, ou « apprentissage automatique », qui se fonde sur des approches mathématiques et statistiques donnant aux ordinateurs la capacité « d'apprendre » en leur soumettant un grand nombre de données.

Un autre exemple est le suivi des plaies chroniques.
C'est un sujet complexe, d'une part en raison du recours à l'avis de plusieurs professionnels de santé (Infirmières, médecins, chirurgiens etc…), et d'autre part en raison de la durée parfois très longue des soins. L'application Healico® (figure 6.) facilite l'évaluation itérative des plaies et la communication entre les professionnels de santé. Cette application a montré son efficacité sur la diminution de la morbidité, tel que diminuer le recours à des opérations chirurgicales radicales comme une amputation (25).

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

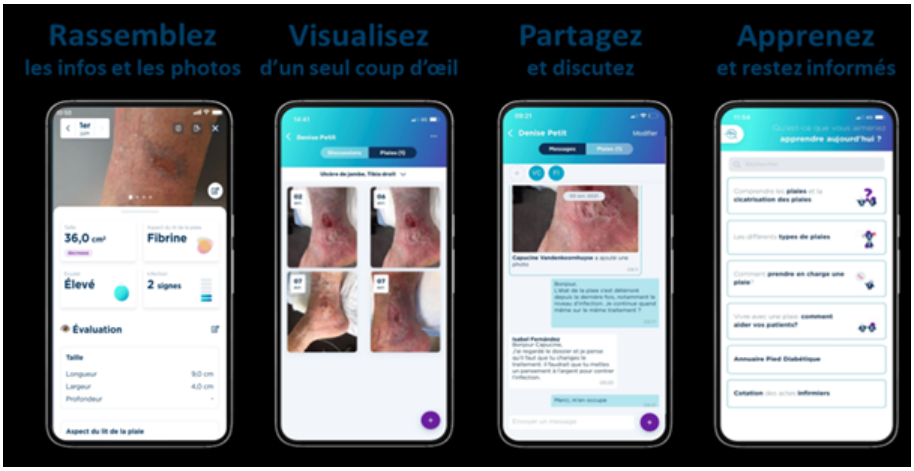


FIG. 6 : Interface de l'application Healico®

Les *Web services* sont des interfaces informatiques permettant la communication et l'échange de données entre systèmes informatiques. En télémédecine, il peut s'agir du dossier médical dématérialisé, (exemple le site Medicapp®), d'une messagerie santé sécurisée, et des systèmes de soutien à la décision clinique. D'autres sont centrés sur l'utilisateur, par exemple « Mon espace santé » proposé par l'assurance maladie en France.

1.3 Téléconsultation et téléassistance

La téléconsultation, telle que définie par le Code de la santé publique (Article R6316-1), permet à un professionnel médical de consulter un patient à distance via vidéotransmission, avec ou sans présence d'un autre soignant (26).
L'examen clinique s'appuie alors sur des dispositifs médicaux connectés tels que stéthoscopes, tensiomètres, électrocardiogrammes, oxymètres, thermomètres, glucomètres, balances ou montres-bracelets (27). La HAS a d'ailleurs mis en place depuis 2019 un guide de bonne pratique destiné aux professionnels quant à la réalisation de téléconsultation et téléexpertise (28). Pour la MPR, l'application de mesure Goniometer Records® est un équivalent de goniomètre sur son téléphone, utilisé par le patient ou un aidant pour mesurer des angles articulaires sous le contrôle du médecin à distance.

La téléassistance, est définie comme l'assistance à distance d'un soignant réalisant un acte par un autre professionnel de santé (29). En MPR, en visioconférence, on peut s'appuyer sur l'expertise de professionnels de la rééducation présents auprès du patient, tels que des kinésithérapeutes, des ergothérapeutes, des orthoprothésistes, des orthophonistes ou encore des psychologues pour effectuer des évaluations spécifiques.

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

1.4 Télésurveillance

Ce concept, déjà défini dans l'introduction, permet un *continuum* dans le suivi du patient *via* le monitorage de différents paramètres utiles.

C'est le cas des outils de mesure de l'activité physique (anciennement podomètres, maintenant montres ou bracelets connectés) chez les patients atteints de maladies rhumatismales, afin de prédire les poussées inflammatoires (9).

Kambampati a évalué la conception d'un système de télésurveillance de la remise en charge au décours d'une chirurgie orthopédique reposant sur la surveillance de la pression plantaire par une semelle intérieure équipée de capteurs de résistance et de force, reliée à une application pour smartphone et un cloud (30). Le dispositif alerte ainsi les médecins en cas de surcharge sur le membre inférieur opéré et permet également un *biofeedback* en temps réel par signaux sonores au patient, qui peut ainsi se corriger immédiatement. Ce genre de système innovant pourrait donc permettre d'améliorer les résultats de la rééducation, notamment lorsqu'elle est réalisée à domicile, et de prévenir le risque de complication et de surblessures.

Dans les prothèses mécatroniques, des capteurs évaluent l'utilisation et émettent des rapports d'activité complets (ex. : application Ossür Logic permettant de suivre les genoux de la gamme Rheo Knee® et Navii ® ou encore les chevilles de la gamme Proprio foot®). L'utilisateur et l'orthoprothésiste ont tous les deux accès à l'application et peuvent régler les différents dispositifs directement via l'application en fonction des retours présents sur les rapports d'activité. Elle permet de contrôler la hauteur de talon, le niveau de charge de la batterie, le compteur de pas, les réglages de l'angle dans les escaliers et les pentes et possède aussi des exercices de rééducation ou le suivi des batteries.

Un autre exemple de dispositif, situé cette fois-ci à la frontière entre télésurveillance et télérééducation, est la plateforme Kaia Health® qui est une application mobile CE (dispositif médical). Initialement développée pour les douleurs lombaires, elle permet au patient de réaliser des auto-exercices, mais aussi au praticien de suivre l'adhésion, l'intensité, et les retours du patient. Il est alerté en cas d'aggravation du patient ou de non-observance. Très largement répandu aux États-Unis, ce dispositif est l'objet de prescription médicale dans certains pays comme la Belgique, les Pays-Bas ou encore l'Allemagne où il est remboursé.

A noter que le concept de télésurveillance comprend aussi les systèmes d'alerte patient en cas de chute, plus communément regroupés sous le terme de téléalarmes.

2 Outils numériques de rééducation, de réadaptation et d'éducation en médecine physique et de réadaptation

2.1 Rééducation

La répétition de gestes est importante dans le processus de récupération. Au domicile, ces exercices deviennent plus occasionnels, souvent en raison d'un manque de temps ou de ressources de soins, entraînant une diminution progressive de l'activité du patient. L'e-santé apporte une réponse à ces difficultés et s'intègre désormais pleinement au parcours de rééducation.

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

Plusieurs études ont démontré l'efficacité de la télérééducation, notamment suite à des AVC (31-34), mais également dans des pathologies locomotrices telles que les douleurs chroniques d'épaule (34). Ce type de rééducation peut prendre différentes formes :

- à domicile, en remplacement d'un suivi classique, avec l'accompagnement d'un thérapeute à distance (31) ;
- en autonomie, *via* des plateformes en ligne proposant des exercices variés. Certaines de ces plateformes sont associées à des dispositifs médicaux connectés (capteurs de mouvement, montres connectées, etc.) qui assurent le bon déroulement des exercices (35), collectent des données utiles à l'évaluation du patient et fournissent des indicateurs sur sa progression et l'efficacité de la rééducation (36).

Les outils numériques ne doivent pas être envisagés comme des substituts aux approches traditionnelles de rééducation, mais comme des compléments permettant de renforcer les acquis tout en favorisant l'autonomisation du patient. Ils offrent la possibilité d'augmenter la fréquence des séances tout en diversifiant leur contenu.
Les applications mobiles – ou *mHealth* – ont ainsi été conçues pour les professionnels de santé (médecins, kinésithérapeutes) comme pour les patients. Des études ont démontré leur intérêt pour soulager les douleurs liées aux cervicalgies chroniques en complément d'une prise en charge classique (37), pour accompagner la rééducation après un AVC (38), une arthroplastie de genou (39), ou encore pour stimuler les fonctions cognitives (40,41).

Luminosity® (voir figure 7) est une application développée par une équipe de l'Université de Stanford, qui totalise plus de 10 millions de téléchargements sur Android (42). Elle propose chaque jour une série de trois exercices (dans sa version gratuite) visant à stimuler différentes fonctions exécutives – la mémoire de travail, le contrôle inhibiteur ou la flexibilité cognitive – et à renforcer les compétences mobilisées lors des séances d'orthophonie.



Fig. 7 : Deux exemples de jeu de l'application Luminosity® visant à travailler la planification et la résolution de problèmes

La réalité virtuelle permet également d'explorer de nouveaux axes thérapeutiques comme favoriser la plasticité cérébrale, le volume de matière grise ainsi que les capacités cognitives (43). Elle peut se décliner sous plusieurs formes, incluant l'usage

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

de casques dédiés (44), de jeux vidéo ou d'accessoires vidéoludiques comme la Wii Balance Board® (45).

En complément de la rééducation, la confection de prothèses et orthèses utilise les scan-corporels parfois couplés à l'impression 3D. Ceci permet une reproductibilité, une personnalisation, une réduction du temps de conception et une diminution des déchets, donc de l'impact écologique (46). Les prothèses bénéficient des avancées technologiques pour permettre de se rapprocher du mouvement naturel, tel que les genoux prothétiques dotés de microprocesseurs (ex. : Genium X4 d'Ottobock®, Navii Ossür®, etc.) qui adaptent en temps réel la marche à la vitesse et au type de terrain, tout en apportant une sécurité accrue (47), les chevilles ou les systèmes combinés. Ce type de technologie est également utilisé dans certaines orthèses, comme le système C-Brace®. Cette orthèse cruro-pédieuse a démontré chez ses utilisateurs une amélioration de la vitesse de marche, des capacités fonctionnelles (réduction du temps au test *Timed Up and Go*) et une diminution du nombre de chutes (48).
Pour le membre supérieur, l'utilisation de prothèses myoélectriques comme la I-limb® de chez Össur® ou d'autres permet une nette amélioration de la fonctionnalité, en autorisant un mouvement individualisé de chaque doigt ainsi qu'une opposition active du pouce (49).
L'apprentissage est parfois long, ainsi que le maintien de capacités motrices du côté controlatéral ou proximal.

2.2 Réadaptation

Le patient pris en charge en MPR nécessite, en plus des soins de rééducation, des adaptations de ses aides techniques ou de son environnement, afin de limiter l'impact fonctionnel de son handicap. On parle alors de réadaptation. Le numérique trouve également sa place dans ce domaine, en intervenant dans de nombreux aspects de la vie quotidienne : le domicile, la communication ou encore les déplacements.
Les aménagements possibles dans l'habitat s'inscrivent dans le champ de la domotique, définie comme l'ensemble des techniques de gestion automatisées, appliquée à l'habitation. Le concept repose sur une commande (télécommande, smartphone, commande vocale, etc.) qui envoie un signal (infrarouge, Bluetooth, ondes radio, électricité, etc.) à un effecteur (téléviseur, volets, cafetière, éclairage, musique, etc.) pour déclencher une action. Cela permet de réaliser à distance, ou plus facilement, certaines actions qui seraient complexes autrement. Le champ des possibilités est vaste (50).

Le logiciel Grid 3® (voir figure 8), disponible sur tablette et ordinateur, facilite la Communication alternative et améliorée (CAA) à l'aide de commandes tactiles ou oculaires. Il permet de communiquer (par exemple, avec une voix de synthèse personnalisée), d'interagir avec une interface numérique (accès aux sites web, réseaux sociaux, etc.), ou encore de contrôler l'environnement domestique (51). Plusieurs existent sur le marché (Tobii Dynavox Communicator 5®, Mind Express®, etc.), destinés à des personnes lourdement handicapées (tétraplégie cervicale haute, paralysie cérébrale, *locked-in syndrome*, etc.).

Le logiciel Dragon NaturallySpeaking® est un système de reconnaissance vocale permettant de dicter du texte, mais aussi de contrôler vocalement l'ensemble de l'environnement Windows (« chercher sur l'ordinateur », « démarrer Microsoft Word », « ouvrir

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

un navigateur », « faire défiler la page », « cliquer sur les liens », etc.). Le Centre d'expertise Handicap et Nouvelles Technologies de l'association APF France Handicap le considère comme une référence dans le domaine (52).



FIG. 8 : Exemple d'interface du logiciel Grid 3©

Concernant les déplacements, les fauteuils roulants, qu'ils soient manuels ou électriques, bénéficient aussi des progrès technologiques : capteurs d'obstacles, aides à la conduite ou encore interfaces de commande simplifiées (commande vocale, oculaire, etc.), dans le but d'améliorer l'autonomie et la sécurité des utilisateurs (53).
Pour les trajets plus longs, le développement de la voiture autonome représente une autre perspective d'avenir.

Ainsi, de nombreux domaines de la MPR bénéficient des avancées du numérique pour atténuer les conséquences du handicap. Certaines innovations sont d'abord développées dans un contexte médico-rééducatif avant d'être adaptées au grand public, et parfois l'inverse.

2.3 Éducation et observance

L'utilisation de ressources en ligne, en complément des consultations médicales, a déjà démontré son efficacité dans l'induction de changements dans les habitudes de vie des patients, tels que l'encouragement à l'activité physique (28) ou la diminution de la consommation de substances toxiques (54), avec des résultats au moins équivalents, voire supérieurs, à ceux des outils papier (55), voire l'observance. On peut envisager que les médecins puissent « prescrire un site internet » ou une application mobile dédiés à l'éducation thérapeutique (ETP).

3 Utilisation des outils numériques en milieu militaire

Le militaire est un cas particulier, car on lui demande de maintenir une capacité physique optimale en prévision d'activités intensives et à haut risque de blessures (parachutisme, marche lestée, exposition aux zones de combat, blast, etc.), pouvant survenir en milieu isolé lors d'opérations extérieures (Opex). Ainsi, l'adaptabilité des

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

moyens numériques de rééducation, d'éducation et de réadaptation au milieu militaire devient une question pertinente.

3.1 Sur le territoire national

Sur le territoire national, les militaires peuvent bénéficier, selon leur localisation, du même niveau d'accès aux soins que la population générale. Certains outils numériques ont été étudiés et validés chez les militaires. L'étude de Areias, réalisée auprès d'anciens combattants américains souffrant de douleurs musculosquelettiques, évalue l'efficacité d'un programme de soins numériques de télérééducation (56). Les résultats indiquent des améliorations significatives, notamment sur la douleur, les symptômes dépressifs et de la productivité, avec un taux d'adhésion élevé de 82 %.

Des programmes de réalité virtuelle ont été évalués chez des militaires américains ayant subi un traumatisme crânien au combat. L'objectif principal était d'entraîner les patients dans un environnement simulant des activités de la vie quotidienne (nettoyer une pièce, prendre des médicaments selon une ordonnance, se brosser les dents, etc.). Ces tâches visaient à améliorer à la fois la fonction exécutive et les capacités motrices des participants. Les résultats de l'étude suggèrent que l'utilisation de la réalité virtuelle est faisable et bien acceptée (57). À l'avenir, il pourrait être pertinent de développer des programmes centrés sur des activités spécifiques aux militaires (nettoyage d'armes, tir, établissement d'un itinéraire de marche, etc.), afin d'adapter la rééducation à leur quotidien et de favoriser leur reprise de travail et de compétences.

Un programme, développé par le département de la Défense américaine et nommé *Rehabilitative Lower Limb Orthopedic Analysis Device* (ReLOAD), est un système de capteurs mobiles fournissant un retour audio en temps réel sur les déviations de la marche et prescrivant des exercices correctifs, chez les patients amputés.

Après une évaluation initiale et une formation à la marche prothétique, les participants ont utilisé ReLOAD à domicile pendant huit semaines, avec des visites toutes les deux semaines pour réviser les exercices et l'entraînement à la marche. Les résultats de l'étude ont montré, entre autres, une amélioration significative de la force des extenseurs de hanche, de l'endurance et de la qualité de la marche (58).

Enfin, selon l'affectation des militaires, il existe de nombreuses situations où ces derniers sont éloignés géographiquement d'un hôpital militaire. L'essor de la télémédecine répondrait en partie à cette problématique spécifique du militaire (consultations pour des aptitudes médico-militaires ou des expertises et la rééducation).

Pour l'instant, on utilise le Logiciel Apizee®.

L'un des développements les plus significatifs des dernières années est l'avancée rapide de l'Intelligence artificielle (IA). Elle pourrait permettre de personnaliser les plans de rééducation en se basant sur des données recueillies en temps réel, offrant ainsi une adaptation dynamique et un suivi continu des patients (59). Par ailleurs, l'IA pourrait jouer un rôle clé grâce à des algorithmes de *machine learning*, capables de prévoir la progression des patients en fonction de leurs données biométriques et comportementales (60). La réalité immersive permettrait également de recréer divers environnements (domicile, loisirs, activités sportives), offrant ainsi au patient la possibilité de reprendre ses activités tout en visualisant les contraintes rencontrées (tant pour le patient que pour le soignant).

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

3.2 En milieu isolé ou en opération extérieure

Cette situation est en partie comparable à celle des déserts médicaux, où l'accès à certains chaînons du système de soins est limité. Dans ce contexte, plusieurs outils de télémédecine militaire ont été développés. Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'a été publiée sur l'utilisation d'outils de télérééducation en opération extérieure. Il est pourtant envisageable que le militaire, en situation isolée, puisse bénéficier de certaines applications mobiles ou de programmes de télérééducation afin d'entamer une prise en charge adaptée, même en l'absence de thérapeute.

Une autre piste future, étudiée notamment chez le militaire, est l'application de robots portables ou d'exosquelettes pour la prévention des blessures musculosquelettiques. Ces technologies visent à améliorer les capacités physiques des militaires lors de tâches exigeantes, tout en constituant également un moyen de réadaptation pour les militaires blessés, afin de les aider à retrouver leurs capacités opérationnelles ou leur vie civile. Cependant, cette approche soulève encore des questions, notamment en termes de développement de dispositifs légers à faible consommation d'énergie respectant les normes militaires. Il reste également difficile de mesurer l'impact à long terme de ces technologies sur la santé physique et mentale des utilisateurs (61). Ce type d'approche avait déjà été étudié dans l'armée française il y a une dizaine d'années avec le dispositif « Hercule » (62), mais le projet a été abandonné en raison de limitations techniques et opérationnelles, ainsi que des coûts et de la complexité logistique.
Des objets connectés pourraient également être utilisés pour suivre l'état de santé des militaires pendant leurs missions, avec des systèmes permettant de prévenir ou de détecter les répercussions de blessures, comme un protège-dents connecté pour identifier les militaires à risque de traumatisme crânien suite à un blast.

4 Prérequis et limites à l'usage des outils numériques en médecine

L'essor de ces technologies soulève plusieurs questions importantes. Tout d'abord, ces outils ne peuvent pas compenser le manque de ressources humaines et matérielles dans le secteur de la santé (12). L'applicabilité de chaque technologie doit être évaluée dès la phase initiale pour chaque type de patient. Cela inclut la vérification de l'accès aux outils technologiques, ainsi que de la capacité du patient, ou de son entourage, à les utiliser, tant sur le plan physique, cognitif, matériel que financier (63).
Une revue de la littérature met en évidence que, bien que la télérééducation post-AVC soit largement étudiée, peu d'attention a été portée aux coûts associés pour les patients et la société (64).
La motivation et l'adhésion des patients sont également des facteurs clés. Des études montrent que les patients atteints de maladies chroniques expriment une adhésion modérée aux outils numériques, soulignant l'importance d'un accompagnement personnalisé pour renforcer leur utilisation (65). Des outils tels que *l'Intrinsic Motivation Inventory* (IMI) et la *Usefulness, Satisfaction, and Ease of use* (USE) *scale* peuvent être utilisés pour évaluer la motivation et la satisfaction des patients en télérééducation, aidant ainsi à mieux comprendre leur engagement et à ajuster les interventions (66). Ces éléments sont cruciaux pour garantir l'efficacité et l'intégration des technologies dans les pratiques médicales.
Les méthodes actuelles de téléévaluation présentent certaines limites, notamment en

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

termes de qualité et d'utilité clinique. Une revue sur les téléévaluations de la déficience motrice du membre supérieur après un AVC révèle une grande variabilité entre les études (67), et souligne le besoin de recherches supplémentaires pour valider ces outils avant leur application plus étendue.
Par ailleurs, l'efficacité des protocoles de télérééducation varie en fonction des pathologies, rendant difficile la prévision des résultats pour chaque patient. Il est important d'identifier des facteurs prédictifs de succès, un profil type ex pour la rééducation à domicile après un AVC (68).
Il est essentiel de s'assurer du respect des règles de confidentialité et de protection des données.
Existe-t-il un risque de déshumanisation de la relation de soin entre le patient et le soignant avec l'IA. Qu'en est-il de la responsabilité en cas d'erreur commise par une IA ? Comment peut-on être certain de la fiabilité des recommandations émises par un algorithme, notamment en matière d'aide au diagnostic ?
De plus, l'utilisation intensive des technologies numériques a un impact environnemental notable, notamment en raison de la consommation énergétique des équipements et de la gestion des déchets électroniques, ce qui incite à réfléchir à des pratiques plus écoresponsables.
L'utilisation des outils numériques entraîne également un coût non négligeable. Il est légitime de se demander si l'investissement dans ces technologies est pertinent, surtout dans un contexte où la politique de santé actuelle tend à rationaliser les dépenses.
Se pose la question de la formation des professionnels de santé à la « bonne pratique » des outils numériques. Il existe une grande diversité de ressources en ligne, sous différents formats (webinaires, chaînes YouTube, podcasts, etc.), abordant l'utilisation des outils numériques en santé. Certaines facultés, telles que Paris Sorbonne, Lille ou Strasbourg, proposent des formations universitaires diplômantes spécifiques à l'e-santé. Le dernier numéro de la revue Pratiques en MPR, est consacré aux nouvelles technologies au service des aides techniques pour la réadaptation. À notre connaissance, il n'existe pas de formation spécifique à l'e-santé dans le tronc commun des études de médecine (1er et 2e cycles).

L'OMS a rédigé un rapport sur ces limites, proposant six axes de réflexion pour limiter les risques associés aux technologies numériques (69) :

1. protéger l'autonomie de l'être humain, qu'il soit soignant ou patient ;
2. promouvoir le bien-être, la sécurité des personnes et l'intérêt public par un contrôle continu de la qualité de l'IA et des usages qui en sont faits ;
3. garantir la transparence, la clarté et l'intelligibilité ;
4. encourager la responsabilité et l'obligation de rendre des comptes ;
5. garantir l'inclusion et l'équité pour éviter l'émergence d'un système de soins à plusieurs vitesses ;
6. Privilégier une IA durable en maîtrisant ses conséquences environnementales et sociales, en particulier en matière d'emploi et d'adaptation des compétences des professionnels.

La HAS a également développé un cadre réglementaire encadrant l'usage des outils numériques en santé, reposant sur le référentiel HAS de 2016 et le plan d'actions européen 2012-2020 pour l'e-santé (5).
Concernant la spécificité du milieu militaire, bien que les outils numériques offrent

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

des promesses intéressantes, leur utilisation se heurte aux réalités du terrain. Dans les milieux isolés, à faible couverture réseau, certains outils pourraient ne pas être accessibles. De plus, il convient de s'assurer que les données recueillies par les différentes applications ne soient pas exploitées par d'autres nations, ce qui impose un niveau de confidentialité encore plus strict que dans le milieu civil.
On touche aussi aux limites de la MPR, dont l'un des objectifs principaux est la rééducation et/ou la suppléance d'une fonction altérée chez un patient blessé. Dans ce contexte, on pourrait alors parler d'« humain réparé ». Cependant, la suppléance d'une fonction, voire son amélioration chez un sujet sain, dépasse le champ traditionnel de la médecine et relève de la notion d'« humain augmenté », ou dans le cadre militaire, de « soldat augmenté ».

Conclusion

La transformation numérique représente une avancée significative pour la médecine physique et réadaptation (MPR), en offrant des outils facilitant l'évaluation, la rééducation et l'autonomisation des patients présentant des troubles moteurs ou cognitifs. Dans le cadre de la prise en charge des blessés militaires, le numérique pourrait répondre à des besoins spécifiques, notamment en milieu isolé ou en opération extérieure.

Cependant, bien que prometteurs, ces outils ne sauraient remplacer l'intervention humaine. Ils se positionnent comme des compléments aux soins traditionnels, prolongeant l'action des thérapeutes. Il devient donc essentiel pour les professionnels de faire preuve de discernement lors de l'intégration de ces technologies, en restant vigilants quant aux limites et aux défis qu'elles posent.

L'intégration du numérique en MPR est désormais incontournable pour relever les défis contemporains de la santé. Elle ouvre également la voie à de nouvelles perspectives pour le développement de soins de qualité, tout en réinventant les méthodes de rééducation pour répondre aux exigences futures des patients.

Financements

Aucun financement

Remerciements au linguiste relecteur : Pierre-Alexandre Clerc.

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

Références bibliographiques

1. Legleye S, Nougaret A, Viard-Guillot L. 94 % des 15-29 ans ont un smartphone en 2021. Insee Focus. 2022 ;(259). Disponible : https://www.insee.fr/fr/statistiques/6036909?sommaire=6049348
2. Observatoire des usages numériques de santé (Vidal-CNOM). Enquête d'avril 2013. Paris (FR) : Conseil National de l'Ordre des Médecins ; 2013.
3. Organisation mondiale de la santé. Évaluation des technologies de la santé : dispositifs médicaux. Série technique de l'OMS sur les dispositifs médicaux. Genève (CH) : OMS ; 2012. 41 p.
4. Organisation mondiale de la santé. mHealth : new horizons for health through mobile technologies : second global survey on eHealth. Genève (CH) : OMS ; 2011.
5. Haute Autorité de santé. Référentiel de bonnes pratiques sur les applications et les objets connectés en santé (mobile health ou mHealth). Saint-Denis (FR) : HAS ; 2016.
6. Moore Q, Johnson A. U.S. health care technologies. Houston (US) : Center for Health and Biosciences ; 2015.
7. Haute Autorité de santé. La e-santé : des avantages concrets pour vos patients. Saint-Denis (FR) : HAS ; 2023.
8. Organisation mondiale de la santé. Santé numérique : transformer et élargir la prestation des services de santé. Communiqué de presse. Genève (CH) : OMS ; 2020. Disponible : https://www.who.int/fr/news/item/09-09-2020-digital-health-transforming-and-scaling-up-health-service-delivery
9. Davergne T, Rakotozafiarison A, Servy H, Gossec L. Wearable activity trackers in the management of rheumatic diseases : where are we in 2020 ? Sensors (Basel). 2020 ;20(17) :4797. doi :10.3390/s20174797
10. Haute Autorité de santé. Évaluation des applications dans le champ de la santé mobile (mHealth) : état des lieux et critères de qualité du contenu médical pour le référencement des services numériques dans l'espace numérique de santé et le bouquet de services des professionnels. Saint-Denis (FR) : HAS ; 2021.
11. Les innovations médicales en rééducation et kinésithérapie : matériel et applications e-santé. Paris (FR) : Fédération de l'Hospitalisation Privé MCO ; 2022. Disponible : https://www.fhp-mco.fr/actus-sante/les-innovations-medicales-en-reeducation-et-kinesitherapie-materiel-et-applications-e-sante/
12. Médecin généraliste : la cartographie des applications et des outils numériques pour faciliter votre pratique. Paris (FR) : Santé Académie ; 2024. Disponible : https://www.sante-academie.fr/media/medecin-generaliste-la-cartographie-des-applications-et-des-outils-numeriques-pour-faciliter-votre-pratique/
13. Lourdais C. Optimisation d'une interface numérique de santé à distance pour une meilleure expérience-patient [thèse]. Nantes (FR) : École centrale de Nantes ; 2022. Disponible : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-04128753
14. Vitali A, Regazzoni D, Rizzi C, Maffioletti F, Falconi L. Quantitative assessment of upper limb rehabilitation through digital motion acquisition. Computer-Aided Design and Applications. 2020 ;17(6) : 1266-77. doi:10.14733/cadaps.2020.1266-1277
15. Cooper RA, Smolinski G, Candiotti JL, Satpute S, Grindle GG, Sparling TL et al. Current state, needs, and opportunities for wearable robots in military medical rehabilitation and force protection. Actuators. 2024 ;13(7) :236. doi : 10.3390/act13070236
16. Rizzo AA, Strickland D, Bouchard S. The challenge of using virtual reality in telerehabilitation. Telemedicine Journal and E-Health. 2004 ;10(2) :184-95. doi:10.1089/tmj.2004.10.184
17. Cogné M, Taillade M, N'Kaoua B, Tarruella A, Klinger E, Larrue F et al. The contribution of virtual reality to the diagnosis of spatial navigation disorders and to the study of the role of navigational aids : a systematic literature review. Annals of Physical and Rehabilitation Medicine. 2017 ;60(3) :164-76. doi : 10.1016/j.rehab.2015.12.004
18. Ansuini C, Pierno AC, Lusher D, Castiello U. Virtual reality applications for the remapping of space in neglect patients. Restorative Neurology and Neuroscience. 2006 ;24(4-6) :431-41.
19. Josman N, Kizony R, Hof E, Goldenberg K, Weiss PL, Klinger E. Using the virtual action planning-supermarket for evaluating executive functions in people with stroke. Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases. 2014 ;23(5) :879-87. doi : 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2013.07.013
20. Güngör F, Ovacık U, Ertan Harputlu Ö, Yekdaneh AA, Kurt İ, Ertürk Uzunoğlu G et al. Tele-assessment of core performance and functional capacity : reliability, validity, and feasibility in healthy individuals. Journal of Telemedicine and Telecare. 2024 ;30(6) :1017-25. doi:10.1177/1357633X221117335
21. Lee K. Agreement between 3D motion analysis and tele-assessment using a video conferencing application for telerehabilitation. Healthcare (Basel). 2021 ;9(11) :1591. doi : 10.3390/healthcare9111591

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

22. Zestas ON. A proposed computer-vision based upper-limb rehabilitation & evaluation suite. Dans : International Conference of the Association for Computing Machinery Greek Special Interest Group in Human Computer Interaction Chapter ; 2023 ; Grèce. New York (US) : ACM ; 2023.
23. Cramer SC, Young BM, Schwarz A, Chang TY, Su M. Telerehabilitation following stroke. Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America. 2024 ;35(2) :305-18. doi:10.1016/j.pmr.2023.06.005
24. Bousson V, Attané G, Benoist N, Perronne L, Diallo A, Hadid-Beurrier L et al. Artificial intelligence for detecting acute fractures in patients admitted to an emergency department : real-life performance of three commercial algorithms. Academic Radiology. 2023 ;30(10) :2118-39. doi : 10.1016/j.acra.2023.06.016
25. Cecilia Matilla A, Cobo Mena A, Arpa Giménez A, Fernández Morata J. Role of the Healico© wound care smartphone application in preventing a foot amputation in a 65-year-old patient with diabetes. The American Journal of Case Reports. 2022 ;23 :e936359. doi : 10.12659/AJCR.936359
26. Etude pour l'accompagnement du déploiement de la télémédecine : état des lieux de l'offre de service et des plateformes régionales de télémédecine. Rapport. Paris (FR) : Ministère des Solidarités et de la Santé ; 2019. Disponible : https://industriels.esante.gouv.fr/produits-et-services/telesante/telemedecine#paragraph-id-\-5370
27. Surville A. Objets connectés et dispositifs médicaux connectés : principaux outils disponibles à la pratique de la médecine générale en France en 2018 [thèse]. Brest (FR) : Université de Bretagne Occidentale ; 2018. Disponible : https://www.semanticscholar.org/paper/Objets-connect%C3%A9s-et-dispositifs-m%C3%A9dicaux-connect%C3%A9s-%3A-Surville/165237416
28. Haute Autorité de santé. Téléconsultation et téléexpertise : guide de bonnes pratiques. Saint-Denis (FR) : HAS ; 2019. Disponible : https://www.has-sante.fr/jcms/c_2971632/fr/teleconsultation-et-teleexpertise-guide-de-bonnes-pratiques
29. Josman N, Kizony R, Hof E, Goldenberg K, Weiss PL, Klinger E. Using the virtual action planning-supermarket for evaluating executive functions in people with stroke. Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases. 2014 ;23(5) :879-87. doi : 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2013.07.013
30. Kambampati H, Palla F, Introzzi M. Design of remote real-time monitoring and biofeedback system to connect patients and clinicians during orthopaedic rehabilitation. Studies in Health Technology and Informatics. 2023 ;309 :181-2. doi : 10.3233/SHTI230772
31. Chen J, Sun D, Zhang S, Shi Y, Qiao F, Zhou Y et al. Effects of home-based telerehabilitation in patients with stroke : a randomized controlled trial. Neurology. 2020 ;95(17) :e2318-e2330. doi : 10.1212/WNL.0000000000010821
32. Cacciante L, Kiper P, Garzon M, Baldan F, Federico S, Turolla A et al. Telerehabilitation for people with aphasia : a systematic review and meta-analysis. Journal of Communication Disorders. 2021 ;92 :106111. doi : 10.1016/j.jcomdis.2021.106111
33. Laver KE, Adey-Wakeling Z, Crotty M, Lannin NA, George S, Sherrington C. Telerehabilitation services for stroke. Cochrane Database of Systematic Reviews. 2020 ;(1) :CD010255. doi : 10.1002/14651858.CD010255.pub3
34. Pak SS, Janela D, Freitas N, Costa F, Moulder R, Molinos M et al. Comparing digital to conventional physical therapy for chronic shoulder pain : randomized controlled trial. Journal of Medical Internet Research. 2023 ;25 :e49236. doi : 10.2196/49236
35. Laver KE, Adey-Wakeling Z, Crotty M, Lannin NA, George S, Sherrington C. Telerehabilitation services for stroke. Cochrane Database of Systematic Reviews. 2020 ;(1) :CD010255. doi : 10.1002/14651858.CD010255.pub3
36. Chae SH, Kim Y, Lee KS, Park HS. Development and clinical evaluation of a web-based upper limb home rehabilitation system using a smartwatch and machine learning model for chronic stroke survivors : prospective comparative study. JMIR mHealth and uHealth. 2020 ;8(7) :e17216. doi : 10.2196/17216
37. Abadiyan F, Hadadnezhad M, Khosrokiani Z, Letafatkar A, Akhshik H. Adding a smartphone app to global postural re-education to improve neck pain, posture, quality of life, and endurance in people with nonspecific neck pain : a randomized controlled trial. Trials. 2021 ;22(1) :274. doi : 10.1186/s13063-021-05214-8
38. Salgueiro C, Urrútia G, Cabanas-Valdés R. Influence of core-stability exercises guided by a telerehabilitation app on trunk performance, balance and gait performance in chronic stroke survivors : a preliminary randomized controlled trial. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022 ;19(9) :5689. doi : 10.3390/ijerph19095689
39. Zhao R, Cheng L, Zheng Q, Lv Y, Wang YM, Ni M et al. A smartphone application-based remote rehabilitation system for post-total knee arthroplasty rehabilitation : a randomized controlled trial. Journal of Arthroplasty. 2024 ;39(3) :575-81.e8. doi : 10.1016/j.arth.2023.08.019
40. Bang M, Jang CW, Kim HS, Park JH, Cho HE. Mobile applications for cognitive training : content analysis and quality review. Internet Interventions. 2023 ;33 :100632. doi : 10.1016/j.invent.2023.100632

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

41. Gorgiev DD, Georgieva I, Gong Z, Nanjappan V, Georgiev GV. Virtual reality for neurorehabilitation and cognitive enhancement. Brain Sciences. 2021 ;11(2) :221. doi : 10.3390/brainsci11020221

42. Hardy JL, Nelson RA, Thomason ME, Sternberg DA, Katovich K, Farzin F et al. Enhancing cognitive abilities with comprehensive training : a large, online, randomized, active-controlled trial. PLoS ONE. 2015 ;10(9) :e0134467. doi : 10.1371/journal.pone.0134467

43. Garcia LM, Birckhead BJ, Krishnamurthy P, Sackman J, Mackey IG, Louis RG et al. An 8-week self-administered at-home behavioral skills-based virtual reality program for chronic low back pain : double-blind, randomized, placebo-controlled trial conducted during COVID-19. Journal of Medical Internet Research. 2021 ;23(2) :e26292. doi : 10.2196/26292

44. Yuan RY, Chen SC, Peng CW, Lin YN, Chang YT, Lai CH. Effects of interactive video-game-based exercise on balance in older adults with mild-to-moderate Parkinson's disease. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2020 ;17(1) :91. doi : 10.1186/s12984-020-00725-y

45. Gandolfi M, Geroin C, Dimitrova E, Boldrini P, Waldner A, Bonadiman S et al. Virtual reality telerehabilitation for postural instability in Parkinson's disease : a multicenter, single-blind, randomized, controlled trial. BioMed Research International. 2017 ;2017 :7962826. doi : 10.1155/2017/7962826

46. Choo YJ, Boudier-Revéret M, Chang MC. 3D printing technology applied to orthosis manufacturing : narrative review. Annals of Palliative Medicine. 2020 ;9(6) :4262-70. doi : 10.21037/apm-20-1185

47. Klenow TD, Lundstrom RL, Morris A, Patterson S, Simpson C, Trejo EG et al. An enhancement of the Genium® microprocessor-controlled knee improves safety and different aspects of the perceived prosthetic experience for unilateral and bilateral users. Frontiers in Rehabilitation Sciences. 2024 ;5 :1342370. doi : 10.3389/fresc.2024.1342370

48. Lundstrom RL, Klenow TD, Morris A, Pobatschnig B, Hibler KD, Kannenberg AH. The C-Brace® microprocessor controlled stance and swing orthosis improves safety, mobility, and quality of life at one year : interim results from a prospective registry. Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering. 2024 ;11 :20556683241269539. doi : 10.1177/20556683241269539

49. van der Niet O, Bongers RM, van der Sluis CK. Functionality of i-LIMB and i-LIMB pulse hands : case report. Journal of Rehabilitation Research and Development. 2013 ;50(8) :1123-8. doi:10.1682/JRRD.2012.08.0140

50. Martin S, Kelly G, Kernohan WG, McCreight B, Nugent C. Smart home technologies for health and social care support. Cochrane Database of Systematic Reviews. 2008 ;(4) :CD006412. doi : 10.1002/14651858.CD006412.pub2

51. Cenomy. Grid 3 : le logiciel de référence pour la CAA. Cenomy ; 2024. Disponible : https://cenomy.fr/grid-3-le-logiciel-de-reference-pour-la-caa/

52. Danigo T. SpeechWare : des microphones optimisés pour Dragon Naturally Speaking. TechLab APF France handicap ; 2021. Disponible : https://techlab-handicap.org/speechware-microphones-optimises-pour-dragon-naturally-speaking/

53. Leblong E, Babel M. Les fauteuils roulants intelligents avec dispositifs d'assistance à la conduite : vers une révolution dans l'autonomie et la mobilité ? Pratiques en médecine physique et de réadaptation. 2025 ;4 :41-3.

54. Pitrat B. Quels usages pour les outils numériques en addictologie et médecine du sommeil ? L'Information psychiatrique. 2017 ;93(8) :649-53. doi : 10.1686/ipe.2017.1699

55. Gremeaux V, Coudeyre E. The internet and the therapeutic education of patients : a systematic review of the literature. Annals of Physical and Rehabilitation Medicine. 2010 ;53(10) :669-92. doi : 10.1016/j.rehab.2010.09.003

56. Areias AC, Doverspike D, Brostek DF, Janela D, Erwin MS, Pinter JM et al. Transforming veteran rehabilitation care : learnings from a remote digital approach for musculoskeletal pain. Healthcare (Basel). 2024 ;12(15) :1518. doi : 10.3390/healthcare12151518

57. Greenhalgh M, Fitzpatrick C, Rodabaugh T, Madrigal E, Timmerman M, Chung J et al. Assessment of task demand and usability of a virtual reality-based rehabilitation protocol for combat related traumatic brain injury from the perspective of Veterans Affairs healthcare providers : a pilot study. Frontiers in Virtual Reality. 2021 ;2 :741578. doi : 10.3389/frvir.2021.741578

58. Gaunaurd I, Gailey R, Springer B, Symsack A, Clemens S, Lucarevic J et al. The effectiveness of the DoD/VA mobile device outcomes-based rehabilitation program for high functioning service members and veterans with lower limb amputation. Military Medicine. 2020 ;185(S1) :480-9. doi : 10.1093/milmed/usz201

59. Archer KR, Ellis TD. Advances in rehabilitation technology to transform health. Physical Therapy. 2024 ;104(2) :pzae008. doi : 10.1093/ptj/pzae008

60. Mennella C, Maniscalco U, De Pietro G, Esposito M. The role of artificial intelligence in future rehabilitation services : a systematic literature review. IEEE Access. 2023 ;11 :11024-43. doi : 10.1109/ACCESS.2023.3236084

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816

61. Vélez-Guerrero MA, Callejas-Cuervo M, Mazzoleni S. Artificial intelligence-based wearable robotic exoskeletons for upper limb rehabilitation : a review. Sensors (Basel). 2021 ;21(6) :2146. doi : 10.3390/s21062146

62. Bertrand D. L'exosquelette Hercule, le futur à nos portes. Paris (FR) : Ministère de la Défense ; 2012. Disponible : http://www.defense.gouv.fr/actualites/economie-et-technologie/l-exosquelette-hercule-le-futur-a-nos-portes

63. Bakhti K, Laffont I, Rémy-Neris O, Joseph P. Technologies du numérique et robotique : applications en rééducation. Dans : COFEMER - CAMPUS MPR 2013 - WIKI-REEDUC - 8. Robotique et réalité virtuelle. Lyon (FR) : Université Lyon 1 ; 2013. Disponible : http://spiralconnect.univ-lyon1.fr/webapp/wiki/wiki.html?id=2415099

64. Shariat A, Ghayour Najafabadi M, Nakhostin Ansari N, Anastasio AT, Bagheri K, Hassanzadeh G et al. Outcome measures utilized to assess the efficacy of telerehabilitation for post-stroke rehabilitation : a scoping review. Brain Sciences. 2023 ;13(12) :1725. doi : 10.3390/brainsci13121725

65. Paris L. Étude de l'intérêt des outils numériques pour évaluer et promouvoir l'activité physique chez des patients atteints de maladies chroniques [thèse]. Clermont-Ferrand (FR) : Université Clermont Auvergne ; 2018. Disponible : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02408675

66. Monardo G, Pavese C, Giorgi I, Godi M, Colombo R. Evaluation of patient motivation and satisfaction during technology-assisted rehabilitation : an experiential review. Games for Health Journal. 2020 ;9(6) :398-405. doi : 10.1089/g4h.2019.0080

67. Sauerzopf L, Luft AR, Baldissera A, Frey S, Klamroth-Marganska V, Spiess MR. Remotely assessing motor function and activity of the upper extremity after stroke : a systematic review of validity and clinical utility of tele-assessments. Clinical Rehabilitation. 2024 ;38(9) :1214-25. doi : 10.1177/02692155241258867

68. Paik SM, Cramer SC. Predicting motor gains with home-based telerehabilitation after stroke. Journal of Telemedicine and Telecare. 2023 ;29(10) :799-807. doi : 10.1177/1357633X211023353

69. Organisation mondiale de la santé. Rapport de l'OMS sur l'intelligence artificielle (IA) appliquée à la santé. Genève (CH) : OMS ; 2021. Disponible : https://www.who.int/publications/i/item/9789240028388

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.51 No.2. Dossier Numérique en santé*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005816, doi : 10.17184/eac.9782813005816