



HAL
open science

Outils connectés pour la télésurveillance des patients asthmatiques : gadgets ou révolution?

David Drummond

► To cite this version:

David Drummond. Outils connectés pour la télésurveillance des patients asthmatiques : gadgets ou révolution?. *Revue des Maladies Respiratoires*, 2022, 39 (3), pp.241-257. <10.1016/j.rmr.2022.01.018>. <hal-03866739>

HAL Id: hal-03866739

<https://hal.science/hal-03866739v1>

Submitted on 22 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC 4.0 - Attribution - Non-commercial use - International License

Rmr210186
Fascicule rouge
Revue générale

**Outils connectés pour la télésurveillance des patients asthmatiques :
gadgets ou révolution ?**

Digital tools for remote monitoring of asthma patients: gadgets or revolution?

D. Drummond

*Service de pneumologie et allergologie pédiatriques, hôpital universitaire Necker Enfants
Malades, APHP, Paris*

Titre court : Outils connectés dans l'asthme

Auteur correspondant

David Drummond

1- Service de pneumologie et allergologie pédiatriques, hôpital universitaire Necker Enfants
Malades, APHP-2- Université de Paris

3- Centre for Health Informatics, University of Manchester, 149 rue de Sèvres, 75015 Paris
david.drummond@aphp.fr

Reçu le : 13.12.21

Accepté le : 07.01.22

Déclaration des liens d'intérêts

L'auteur est financé sur l'année 2021-2022 par une bourse de mobilité Société Pédiatrique de
Pneumologie et d'Allergologie (SP2A) – Astrazeneca 2021.

Outils connectés pour la télésurveillance des patients asthmatiques :

gadgets ou révolution ?

Résumé

Applications mobiles, spiromètres connectés, inhalateurs connectés, bracelets connectés, montres connectées, stéthoscopes connectés, capteurs de qualité de l'air connectés : les outils connectés sont en plein essor dans l'asthme. Ils rendent possible des systèmes de télésurveillance avancés, associant collecte continue de données depuis le domicile du patient et intervention précoce des professionnels de santé. La première partie de cette revue reprend les arguments théoriques en faveur de l'utilisation de ces outils connectés pour la télésurveillance des patients asthmatiques. Dans une seconde partie, les différents types d'outils connectés développés dans l'asthme sont détaillés et illustrés par des exemples. La troisième partie s'attache à présenter les résultats des essais randomisés ayant comparé l'utilisation de systèmes de télésurveillance intégrant des outils connectés à une prise en charge plus classique. Les limites à l'utilisation des outils connectés au sein de tels systèmes sont abordées dans la quatrième partie. Enfin, la cinquième partie présente les perspectives liées à l'utilisation d'écosystèmes numériques dans l'asthme et à la possibilité d'obtenir des systèmes de décision algorithmiques autonomes pour l'adaptation des prises en charge des patients.

Mots clés : télémédecine ; santé mobile ; technologie digitale ; jumeau numérique ; asthme

Digital tools for remote monitoring of asthma patients: gadgets or revolution?

Abstract

Mobile applications, connected spirometers, connected inhalers, connected bracelets, connected watches, connected stethoscopes, connected air quality sensors; digital tools in asthma treatment and management are on the upswing. They enable the functioning of advanced remote monitoring systems, combining continuous data collection from the patient's home and early intervention by health professionals. The first part of this review details the theoretical arguments in favour of using these digital tools for remote monitoring of asthma patients. In the second part, the different types of digital tools developed for asthma cases are described and illustrated with examples. The third part presents the results of randomised trials comparing remote monitoring systems incorporating digital tools with more traditional management. Limitations to the use of digital tools in such systems are discussed in the fourth section. Finally, the fifth part presents perspectives for digital ecosystems in asthma and the possibility of obtaining autonomous algorithmic decision-making systems for individualized adaptation of patient management.

Keywords : telemedicine, mobile health, digital technology, digital twin, asthma

1. Introduction

Au fil de l'histoire, l'exercice de la médecine a été constamment impacté par les avancées technologiques et les évolutions sociétales. A partir de la seconde moitié du XIX^e, de nouvelles techniques issues des deux premières révolutions industrielles - dosages biologiques, cultures microbiennes, examens d'imagerie - ont permis l'obtention de nouvelles informations sur le corps humain. Ce processus s'est poursuivi tout au long du XX^e siècle, conduisant à un accroissement ininterrompu du volume et de la diversité de ces informations. Traiter et échanger ces informations de façon efficace n'aurait été possible sans la troisième révolution industrielle, la révolution informatique, qui a débuté dans les années 1970 et se poursuit actuellement. Cette transformation numérique, ou digitale – de *digit*, « chiffre » en anglais, et non de *digitus*, « doigt » en latin – a déjà profondément marqué l'exercice de la médecine, avec la présence de postes informatiques dans toutes les salles de consultations, l'essor des téléconsultations à l'occasion de la pandémie de Covid 19, la création du dossier médical partagé défini comme un carnet de santé numérique, la constitution d'entrepôts de données médicales, l'accès par les patients à des forums de discussions sur des thèmes médicaux, etc. Mais cette transformation pourrait aller plus loin, en permettant la mise en place à grande échelle de nouvelles stratégies de soins telle que la télésurveillance.

La télésurveillance est définie par la loi française comme un acte de télé médecine qui « a pour objet de permettre à un professionnel médical d'interpréter à distance les données nécessaires au suivi médical d'un patient et, le cas échéant, de prendre des décisions relatives à la prise en charge de ce patient. L'enregistrement et la transmission des données peuvent être automatisés ou réalisés par le patient lui-même ou par un professionnel de santé »[1]. Les points importants de cette définition sont (i) l'acquisition de données médicales du patient ; (ii) leur transmission à un professionnel de santé ; (iii) la possibilité d'un retour du professionnel de santé vers le patient pour adapter la prise en charge. Actuellement, la télésurveillance

concerne essentiellement (pour les deux tiers) les patients équipés de dispositifs cardiaques implantables[2]. Les objectifs de cette revue sont d'expliquer le rationnel sous-tendant l'utilisation de dispositifs de télésurveillance dans l'asthme de l'enfant et de l'adulte, de détailler les outils connectés existants dans ce cadre, de présenter les résultats des essais randomisés contrôlés ayant évalué l'intégration de ces outils dans des dispositifs de télésurveillance, d'indiquer les limites de ces outils connectés, et d'aborder les perspectives qu'ils ouvrent. Les questions posées sont donc successivement : « quel rationnel ? », « quels outils connectés ? » ; « quels résultats scientifiques ? » ; « quelles limites ? », et « quelles perspectives ? ».

2. Quel rationnel ?

Plusieurs arguments plaident pour l'utilisation d'outils connectés dans le cadre de dispositifs de télésurveillance des patients atteints d'asthme.

La première raison tient au fait que l'asthme, en tant que maladie chronique, nécessite une évaluation continue pour que sa prise en charge puisse être optimisée. Actuellement, la collecte des informations relatives à l'asthme du patient n'a lieu que deux à trois fois par an, lors des consultations médicales. Ces moments ne représentent que 0,0005% de la vie des patients, alors qu'ils continuent à vivre avec leur asthme pendant les 99,9995% du temps restant[3]. En dehors des moments de consultation, le médecin n'a pas d'information sur le contrôle de l'asthme, ou alors des informations imprécises, recueillies rétrospectivement.

La seconde raison liée à la première est que l'utilisation de données en continu permettrait une prise en charge proactive, plutôt que réactive. Actuellement, les crises d'asthmes sont recueillies a posteriori lors des consultations médicales, alors qu'elles ont déjà eu lieu. Le médecin est devant le fait accompli, alors que le recueil de données en continu permettrait de

détecter des signaux de crises imminentes ou de perte du contrôle de l'asthme afin d'adapter précocement la prise en charge[4].

La troisième raison est que les données recueillies en consultation par l'interrogatoire des patients sont souvent imprécises voire erronées alors qu'elles sont primordiales dans l'adaptation des traitements. Ainsi, l'appréciation du contrôle de l'asthme est très différente entre un enfant, ses parents, et son médecin[5,6] ; les données d'observance, sont – volontairement ou inconsciemment – largement surestimées par les patients[7] ; et certains symptômes, tels que les sifflements, ne recouvrent pas la même réalité pour tous les patients[8]. Si l'appréciation subjective du patient de ses symptômes et de sa maladie est incontournable puisque c'est ce ressenti qui est la raison d'être de sa prise en charge, elle mérite d'être complétée par des données objectives et quantifiables. En effet, il est important d'éviter de traiter insuffisamment des patients mauvais percepteurs de la sévérité de leur asthme ou au contraire de surtraiter des patients rapportant des symptômes ne correspondant pas à de l'asthme. Ceci est particulièrement vrai en pédiatrie où l'adaptation du traitement des jeunes enfants repose essentiellement sur les déclarations parentales avant l'âge des premières explorations fonctionnelles respiratoires.

La quatrième raison est que des objets connectés au domicile des patients permettraient d'obtenir de nouvelles données importantes pour la prise en charge de l'asthme. Par exemple, les appareils de mesure de la qualité de l'air apportent des informations quantifiables sur divers polluants, alors que jusqu'ici l'interrogatoire se limite souvent à demander si le patient habite près d'un grand axe routier. Dans la mesure où il est largement démontré que les polluants impactent le contrôle de l'asthme, pouvoir mesurer ces paramètres afin d'adapter la pression thérapeutique en conséquence pourrait améliorer la prise en charge des patients asthmatiques[9].

La cinquième raison tient à la possibilité offerte par les dispositifs de télésurveillance d'harmoniser les pratiques. Alors qu'il a été montré qu'appliquer les recommandations permettait d'améliorer le contrôle de l'asthme, la plupart des médecins continuent de ne pas les suivre[10,11]. Les raisons invoquées sont diverses : difficulté à changer ses habitudes, désaccord avec les recommandations, manque de temps pour rester à jour, etc.[12]. Le résultat est une grande hétérogénéité des pratiques participant à la morbidité importante observée dans l'asthme. L'utilisation de la télésurveillance, associée à des systèmes électroniques de décision suggérant au patient et/ou au médecin des modèles de prise en charge en fonction des données collectées, pourrait réduire la morbidité liée à l'asthme.

La sixième raison correspond à la possibilité de personnaliser la prise en charge de l'asthme grâce aux données collectées en continu depuis le domicile des patients. En effet, combiner des données provenant des dossiers médicaux des patients à celles collectées lors de la télésurveillance pourrait permettre une médecine personnalisée via : (i) la découverte, grâce à des techniques d'apprentissage machine non supervisées, de sous-groupes de patients très bons répondeurs à certains types de traitement de fond : le choix du traitement de fond pourrait ainsi être personnalisé à chaque patient sur sa probabilité d'y répondre; (ii) la découverte, selon le même modèle, de profils de crises d'asthme différents, nécessitant des prises en charge différenciées (corticothérapie orale d'emblée, modification transitoire du traitement de fond, etc.) ; (iii) l'adaptation en temps réel des thérapeutiques du patient, plutôt que lors des consultations programmées.

Enfin, l'évolution des comportements et des attentes de la population à l'ère digitale pourrait représenter une dernière raison d'utiliser la télésurveillance. A l'ère du « tout domicile » (courses, travail, etc.), la télésurveillance pourrait éviter au maximum les déplacements en consultation en cabinet ou à l'hôpital et les désagréments associés (stress de l'environnement médical, absence de l'école ou du travail). Elle permettrait de personnaliser la prise en charge

des patients en déterminant ceux pour qui une visite en présentiel reste nécessaire, et ceux pour qui un simple renouvellement de prescription en distanciel est suffisant.

3. Quels outils connectés ?

Une fois le rationnel de la télésurveillance dans l'asthme établi, la question est celle de sa faisabilité. Plusieurs outils ont été développés ces dernières années dans cette optique, que l'on peut diviser en deux grandes catégories : les applications mobiles et les objets connectés (Figure 1). Ces deux types d'outils n'auraient pu se multiplier sans la diffusion des smartphones. En 2020, 84% des Français étaient équipés d'un smartphone, un chiffre en nette hausse par rapport à 2019 (77%) [13]. Connectés en permanence à internet, les smartphones permettent l'enregistrement de données sur une application mobile ou leur transit à partir d'un objet connecté, l'envoi de ces données à un professionnel de santé de façon instantanée, et la communication de ce professionnel avec le patient en retour : les trois composantes de la télésurveillance sont donc réunies. Il convient de noter que les exemples d'applications mobiles et d'objets connectés présentés dans cette section sont donnés à titre indicatif et ne recouvrent pas la totalité de l'offre. Il ne s'agit donc pas de recommander ici tel ou tel dispositif mais d'illustrer différentes fonctionnalités et usages de ces outils.

3.1 Applications mobiles

A l'échelle internationale, les applications mobiles pour l'asthme se comptent par centaines [14]. Ces applications associent souvent plusieurs fonctionnalités : certaines directement en lien avec la télésurveillance (la possibilité d'enregistrer ses symptômes et/ou un débit expiratoire de pointe, et d'être en lien avec un professionnel de santé), d'autres sans lien (vidéos ou jeux vidéo sérieux éducationnels et/ou motivationnels, alertes à l'heure du traitement de fond, plan d'action numérique). Les applications mobiles proposant un

enregistrement des symptômes et/ou du débit expiratoire de pointe s'inscrivent pour la plupart dans une démarche de santé mobile (*mobile healthcare, mHealth*), sous la forme d'un plan d'action électronique, plutôt que dans un réel système de télésurveillance permettant au professionnel de santé de suivre les données et d'agir à distance [15]. En France, l'application mobile Asthm'Activ développée par l'assurance maladie à destination des adultes atteints d'asthme ne fait pas exception à la règle. Elle permet d'enregistrer ses symptômes, d'avoir des rappels lors des horaires de prise des traitements de fond, des informations sur l'asthme, des rappels sur les rendez-vous médicaux, mais il n'y a pas de lien avec un professionnel de santé via l'application. Il n'existe pas à notre connaissance d'application mobile francophone à destination des enfants asthmatiques.

3.2 Spiromètres connectés

Le degré d'obstruction bronchique représentant une donnée indispensable dans l'évaluation de l'asthme, plusieurs entreprises proposent des spiromètres ou des débitmètres de pointe connectés, utilisables par le patient à son domicile. Ces dispositifs permettent d'obtenir des données similaires à celles obtenues en cabinet ou en service d'explorations fonctionnelles respiratoires (VEMS, CVF, VEMS/CVF, DEM25-75, DEP, etc.), et intègrent souvent une évaluation automatisée de la qualité de réalisation de l'examen. Ils sont considérés comme des dispositifs médicaux et à ce titre ont dû obtenir le marquage CE pour être commercialisés en Europe, et/ou ont été approuvés par la Food and Drug Administration (FDA) pour avoir accès au marché américain.

Côté spiromètres connectés, on peut citer Nuvoair (<https://www.nuvoair.com/>) aux USA (avec une filiale en Suède) qui a développé un environnement complet de suivi de l'asthme au domicile, incluant un spiromètre connecté ; Aiocare (<https://aiocare.com/doctor/>) en Pologne qui a également son propre spiromètre connecté lié à une application mobile; la société

italienne MIR (<https://www.spirometry.com/>) qui a des relais aux USA et en France, et dont la gamme de spiromètres est actuellement souvent utilisée en France ; et la société suisse NDD medical technologies (<https://nddmed.com/>) qui commercialise EasyOne Air. Côté débitmètres de pointe, la société Smart Respiratory Products basée à l'Imperial College de Londres (<https://smartasthma.com/>) a développé un débitmètre de pointe connecté (Smartasthma) et l'interface médecin nécessaire à la télésurveillance. L'ensemble a fait l'objet d'études montrant leur fiabilité par rapport à des appareils de mesure classiques, le principal problème restant la qualité d'exécution de l'examen par le patient qui ne dépend pas de l'appareil en soi [16–19]. Les prix démarrent à 40 euros pour le débitmètre de pointe connecté Smartasthma, et autour d'une centaine d'euros pour les spiromètres connectés, mais peuvent atteindre un millier d'euros pour les dispositifs les plus avancés.

3.3 Inhalateurs connectés

Les inhalateurs connectés correspondent à des dispositifs qui se fixent sur l'inhalateur du patient et enregistrent automatiquement la date et l'heure de chaque utilisation. De la même manière que les applications mobiles, ils peuvent associer plusieurs fonctionnalités : dans le cadre de la télésurveillance, ils permettent d'obtenir en continu des données objectives sur l'observance des patients grâce aux données d'utilisation des traitements de fond, et sur le contrôle de l'asthme, grâce aux données d'utilisation des traitements d'urgence. Certains sont capables de collecter des données partielles sur la technique d'inhalation. Hors du cadre de la télésurveillance, ils peuvent être associés à des rappels de prise du traitement de fond via des alertes visuelles, auditives, ou l'envoi de SMS ou de notifications sur application mobile. Certains ajoutent une géolocalisation du patient, utile pour paier les données avec des données environnementales par exemple, ou déterminer les zones à risque de déséquilibre de l'asthme du fait d'allergènes et/ou polluants récurrents.

A l'international, Adherium (<https://www.adherium.com/>), entreprise néo-zélandaise, a développé toute une gamme de dispositifs permettant de se fixer sur l'ensemble des dispositifs d'inhalation utilisés communément dans l'asthme (aérosols doseurs, diskus, turbuhaler, etc.). Les sociétés Cohero Health (<https://coherohealth.com/>) et Propeller Health (<https://propellerhealth.com/>) aux Etats-Unis proposent des dispositifs limités aux aérosols-doseurs et aux aérosols-doseurs et diskus, respectivement. En Europe, l'entreprise Findair (<https://findair.eu/>) basée en Pologne délivre des dispositifs limités aux aérosols-doseurs actuellement utilisés dans plusieurs hôpitaux des Pays-Bas dans le cadre du soin. En France, seule la société Kap Code (<https://www.kapcode.fr/>) a développé un dispositif commercialisé, Connect'inh, pour les aérosols doseurs, mais son marquage CE en tant que dispositif médical se fait toujours attendre. Les nébuliseurs commencent également à être équipés de dispositifs de suivi électronique de l'observance, avec le produit e-Track de PARI développé en Allemagne pour ses nébuliseurs e-Flow (<https://www.pari.com/int/eflow-technology-partnering/eflow-technology-platform/>). La gamme de prix de ces dispositifs s'étend de quelques dizaines d'euros pour les dispositifs pour aérosol-doseurs à 100-200 euros pour les dispositifs d'inhalation plus complexes, et atteint 4000 euros par dispositif e-Track associé à l'e-Flow.

3.4 Appareils de mesure du NO expiré

La mesure du NO dans l'air expiré est une méthode non invasive permettant la détection et la quantification de l'inflammation des voies aériennes. Contrairement aux appareils utilisés dans les hôpitaux, qui recourent à la chimioluminescence pour mesurer le NO expiré, ce qui correspond au gold-standard, les appareils portables utilisables au domicile reposent sur l'électrochimie. Cette seconde méthode a l'avantage de ne pas nécessiter de calibration, mais

l'inconvénient de donner des résultats légèrement différents de ceux obtenus via chimioluminescence.

NIOX VERO (<https://www.niox.com/en/>), commercialisé par la société Circassia basée au Royaume-Uni, est le principal appareil portable utilisé jusqu'ici [20]. Il a succédé au NIOX MINO, validé et utilisé dans la plupart des études [21]. L'appareil NObreath (<https://www.bedfont.com/nobreath>) de la société Bedfont toujours au Royaume-Uni a fait aussi l'objet de plusieurs études [22]. Plus récent, l'appareil Vivatmo me (<https://www.vivatmo.com/en/for-doctors/products/vivatmo-me/>) de l'entreprise allemande Bosch commence à être utilisé par certaines équipes[23,24]. Les prix sont plus élevés que pour les spiromètres, démarrant autour de 400 euros pièce pour l'appareil Vivatmo et montant à plus de 2500 euros pièce pour les appareils NIOX VERO et NObreath.

3.5 Montres et bracelet connectés

Les bracelets et les montres connectées peuvent recueillir de nombreuses informations : activité via un actimètre, nombre de pas via podomètre, fréquence cardiaque, saturation en oxygène, paramètres ECG, localisation via GPS etc. Une évaluation portant sur 100 participants a ainsi montré que les valeurs de fréquence cardiaque et de saturation en oxygène mesurées par l'Apple Watch 6 étaient très corrélées avec celles mesurées par des appareils commerciaux validés, avec des coefficients de Pearson à 0.99 et 0.81 respectivement [25]. L'évolution de ces paramètres pourrait être intéressante à suivre dans le cadre de l'asthme, pour prédire une crise d'asthme imminente par exemple. De même l'évaluation du contrôle de l'asthme pourrait s'appuyer sur les données recueillies par un actimètre afin d'évaluer la limitation à l'effort et la qualité du sommeil. De très nombreuses entreprises se sont positionnées sur le marché des bracelets et montres connectés, dont les plus connues sont Misfit, Fitbit, Garmin, Misfit, Apple, Samsung, TomTom, Polar, Fossil, Wego, Motorola,

Sony, et Huawei. Cependant, rares sont les dispositifs qui ont fait l'objet d'études scientifiques [26]. Si plusieurs travaux ont utilisé des bracelets ou des montres connectés dans l'asthme, leur fiabilité n'a pas été étudiée [27].

3.6 Appareils de mesure de la qualité de l'air

Les paramètres environnementaux (conditions météorologiques, polluants, allergènes) ont un rôle reconnu dans le déséquilibre de l'asthme et la survenue des crises[9,28–33]. Dans plusieurs régions du monde, et particulièrement en Europe et en France, des capteurs sont répartis sur le territoire pour recueillir ces données en extérieur. Grâce à leurs fonctions de géolocalisation, les smartphones et les montres connectées peuvent récupérer les données environnementales en fonction du lieu où se trouve leur utilisateur. Le service de surveillance de l'atmosphère Copernicus (<https://atmosphere.copernicus.eu>) fournit ainsi des données et des informations continues sur la composition atmosphérique à l'échelle européenne, avec des développements en cours pour ajouter aux paramètres météorologiques et aux polluants des informations sur les niveaux d'exposition aux allergènes. Ces données collectées via la géolocalisation sont très intéressantes pour la télésurveillance. Elles ont cependant deux limites : elles nécessitent un smartphone ou une montre connectée avec fonction de géolocalisation, ce qui peut être problématique pour les systèmes de télésurveillance incluant des enfants ; et elles ne donnent pas d'indication sur la pollution intérieure, au sein du domicile et du lieu de scolarisation pour l'enfant/ du lieu de travail pour l'adulte. Dans ce cadre, les appareils de mesure de la qualité de l'air connectés sont intéressants. Les nombreux dispositifs commercialisés se distinguent par l'étendue de leurs systèmes de capteurs : certains correspondent à des stations météo (température, humidité, pression atmosphériques), d'autres à des capteurs de pollution (PM1, PM2.5, PM10, NO2, O3, composés organiques volatils etc.), d'autres encore associent des mesures des deux types à des degrés divers. Parmi

ceux à installer dans une pièce de la maison, généralement la chambre ou le salon, on peut citer le Laser Egg de l'entreprise suisse Kaiterra (<https://www.kaiterra.com/en/laser-egg>) qui mesure la température, l'humidité et les niveaux de PM2.5, ou uHoo de l'entreprise du même nom basée au Royaume-Uni (<https://www.uhooair.co.uk/product/uhoo-lite-air-quality-monitor/>) qui ajoute à ces éléments la mesure des composés organiques volatils, du NO₂, de l'ozone, du CO et du CO₂. Deux dispositifs portables, pouvant s'accrocher comme un porte-clé à un sac ou un cartable, sont particulièrement intéressants pour mesurer en temps réel, en intérieur comme en extérieur, les paramètres environnementaux les plus importants pour l'asthme. L'un, Atmotube (<https://atmotube.com/products/atmotube-pro?view=fr>), est américain, et mesure PM1, PM2.5, PM10, les composés organiques volatils, la température, l'humidité et la pression atmosphérique ; l'autre, Flow2 (<https://plumelabs.com/fr/flow/>), est français, ne mesure pas de paramètres météorologiques mais ajoute le NO₂ aux polluants recueillis par l'Atmotube. Ces deux dispositifs permettent, en associant les paramètres recueillis via leurs capteurs et les données provenant des bases de données environnementales, d'améliorer la précision de leurs prédictions quant à la qualité de l'air [34]. Cependant, contrairement aux inhalateurs ou aux spiromètres connectés, qui incluent généralement une interface pour le professionnel de santé, les appareils de mesure de la qualité de l'air n'ont pas été conçus à visée médicale et fournissent donc uniquement une application mobile aux patients. Il est possible de recueillir le flux de données provenant des patients à une base de données, de recherche par exemple, au prix d'un peu de développement informatique. Commercialisés sur internet, les prix s'étalent entre 150 euros (Laser Egg) et 350 euros pièce (Atmotube Pro).

3.7 Autres objets connectés

D'autres dispositifs qui pourraient servir en télésurveillance sont en développement, mais restent encore loin de la maturité technologique acquise par les outils déjà présentés. Plusieurs essais de mesure de la fréquence respiratoire utilisant différentes approches ne se sont pour le moment pas concrétisés[35]. La mesure automatisée de la toux enregistrée par smartphone fait également l'objet de recherches actives [36–38]. Une tentative d'enregistrement passif des fréquences cardiaques et respiratoires grâce à un capteur placé dans le matelas a fait l'objet d'une étude encourageante, mais les développements ne sont pas allés plus loin[39]. Les progrès les plus rapides pourraient venir des méthodes d'auscultation pulmonaire actives, soit via le stéthoscope connecté SKOP (<https://www.wemed.fr>) développé par la société française WeMed qui envoie le son recueilli au professionnel de santé après branchement sur un smartphone, soit via des détecteurs de sifflements ou wheezing comme celui développé par la société japonaise Omicron qui après application sur la poitrine de l'enfant permet de savoir s'il existe des sibilants[40] (<https://www.omron-healthcare.co.uk/nebulisers/wheezescan.html>).

4. Quels résultats scientifiques ?

Selon les principes de la médecine fondée sur les preuves (evidence-based medicine), les systèmes de télésurveillance utilisant les outils connectés décrits au paragraphe précédent doivent faire l'objet d'études scientifiques bien conduites montrant idéalement leur supériorité par rapport à la prise en charge actuelle sur les critères de contrôle de l'asthme, le risque de crise d'asthme, et/ou la préservation de la fonction pulmonaire. En cas d'équivalence, un système de télésurveillance pourrait être préféré s'il permettait des économies au système de santé par rapport à la prise en charge existante, et/ou si la qualité de vie des patients en était significativement améliorée, par exemple grâce à une réduction du poids des soins associés à l'asthme (diminution des allers-retours au cabinet ou à l'hôpital, du nombre de journées

d'école ou de travail perdues, réduction de la charge en traitement de fond grâce à la personnalisation de la prise en charge, etc.). Les études citées dans cette partie correspondent exclusivement à des essais randomisés contrôlés, les essais pré-post ne permettant pas d'obtenir le niveau de preuve suffisant pour démontrer l'intérêt de l'intervention, ici la télésurveillance. Ces essais sont des essais ouverts (et non en double-aveugle) dans la mesure où il est impossible de donner des objets connectés « placebo » au groupe contrôle sans que le patient ou son médecin ne s'aperçoive de leur non-utilisation ou non-fonctionnement.

4.1 Systèmes de télésurveillance reposant sur l'enregistrement des symptômes

L'enregistrement à distance par les patients asthmatiques de leurs symptômes sur des sites web puis sur des applications à mobile a fait l'objet de plusieurs études. Cependant la plupart n'évaluaient pas un système de télésurveillance, mais une version électronique du plan d'action : il s'agissait en fonction des symptômes et/ou valeurs de spirométrie entrés par le patient de proposer automatiquement une conduite à tenir, avec recommandation de contacter un professionnel de santé en cas de besoin [41–44]. En France, l'étude française multicentrique PANAME (Plan d'action numérique pour l'asthme en exacerbation), dont les résultats sont en attente, a ainsi évalué une web app réalisant un diagnostic de sévérité de l'exacerbation et donnant un conseil thérapeutique adapté[45]. Seules huit études ont évalué de réels systèmes de télésurveillance reposant sur l'enregistrement des symptômes, intégrant au minimum une alerte automatique au professionnel de santé en cas de détérioration de l'asthme, et au maximum un suivi en continu des données entrées par les patients afin d'adapter leur prise en charge. Nous avons fait le choix de ne pas présenter uniquement les études reposant sur des applications mobiles, mais de remonter dans le temps et d'inclure également celles qui ont utilisé des sites web, afin de voir si le changement de support pour une application mobile permettait d'obtenir de meilleurs résultats. Ces études sont reprises

dans le tableau I. Six d'entre elles ont eu recours à un site web, tandis que les deux études les plus récentes publiées en 2017 et 2019 ont utilisé une application mobile [46,47]. L'évaluation de la télésurveillance a porté essentiellement sur des enfants et adolescents asthmatiques (six études versus deux chez l'adulte). Les symptômes, entrés à l'aide de questions construites spécifiquement par chaque équipe, ou via les questionnaires validés de l'asthma control test (ACT), childhood ACT (c-ACT), et Control of Allergic Rhinitis and Asthma Test (CARAT) devaient être entrés avec une fréquence variable, d'une fois par jour à une fois par mois. Le professionnel de santé au cœur du système de télésurveillance était un infirmier ou un médecin dans six études, et un pharmacien dans deux autres. Dans deux études il n'intervenait qu'en cas d'alerte du système, dans trois études il revoyait les symptômes entrés par le patient tous les mois, dans une autre toutes les semaines, alors que pour deux autres cela n'était pas précisé. Dans quatre études, l'idée était essentiellement d'utiliser les données enregistrées pour alerter le professionnel de santé en cas de détérioration de l'asthme et/ou de non-adhérence au traitement, qui donnait alors la conduite à tenir [46,48–50]. Dans deux autres études la prise en charge était plus globale, avec des interactions régulières avec le professionnel de santé pour revoir avec le patient l'évolution des symptômes, prodiguer des conseils sur l'adaptation des traitements, et y associer des séances d'information sur l'asthme [51,52]. Une étude utilisait les symptômes pour adapter le traitement de fond de façon plus fréquente (tous les mois) que lors d'une prise en charge classique (tous les 4 mois)[53]. Une dernière étude correspondait plus à un partenariat patient-pharmacien, avec différentes interactions possibles (conseils, envoi de vidéos informatives) en lien avec les symptômes entrés [47].

Au sein de ces huit essais randomisés contrôlés dont la durée variait entre 6 et 16 mois, sept ont comparé l'évolution des symptômes de l'asthme entre les bras « télésurveillance » et le bras contrôle via l'utilisation des scores c-ACT, ACT, asthma control questionnaire (ACQ) et

CARAT : quatre études n'ont pas retrouvé de différence significative[46–49], tandis que les trois autres montraient une amélioration en faveur du bras télésurveillance qui, si statistiquement significative, était peu pertinente cliniquement [50,52,53]. En effet, l'amélioration de l'ACQ était de 0,3 et l'amélioration de l'ACT de 1 et 1,2 points, soit en dessous des seuils de changement minimal cliniquement important établis à 0,5 points pour l'ACQ, à 2 points pour l'ACT entre 12 et 18 ans, et à 3 points pour l'ACT chez l'adulte [54]. Il n'y avait pas non plus de différence significative quant au nombre d'exacerbations sévères ou de recours aux soins (5 études), la fonction respiratoire (2 études) ou la qualité de vie (4 études). La dose de corticothérapie inhalée reçue était inférieure, avec un contrôle des symptômes équivalent, entre le groupe ayant une adaptation mensuelle du traitement de fond sur la base des scores ACT enregistrés par rapport au groupe contrôle ayant des consultations classiques tous les quatre mois[53]. (Tableau 1)

4.2 Systèmes de télésurveillance reposant sur l'enregistrement des données de spirométrie ou de débitmètre de pointe

L'utilisation des données provenant de spiromètres ou de débitmètres de pointe dans le cadre de la télésurveillance a fait l'objet de 10 études à ce jour. Une seule a utilisé un spiromètre connecté, c'est-à-dire un spiromètre électronique permettant la transmission automatisée des données au professionnel de santé. Cette étude a inclus des enfants et adolescents âgés de 6 à 16 ans avec asthme sévère dans le nord de la France[55]. L'objectif était de déterminer si le suivi au domicile du VEMS permettait une action précoce et en ce sens une diminution des exacerbations sévères. Seuls 15 enfants du groupe télésurveillance et 20 contrôle ont terminé l'étude, sur les 50 enfants inclus. Il n'y avait pas de différence observée sur le nombre d'exacerbations observées mais le faible nombre de patients limitait la puissance de l'étude.

De même, le VEMS et la qualité de vie en fin d'étude n'étaient pas significativement différents entre les deux groupes.

Les autres études ont utilisé soit des spiromètres ou des débitmètres de pointe standard, soit leurs équivalents électroniques mais non connectés, nécessitant tous la saisie manuelle sur un site web ou une application mobile des valeurs obtenues. Nous avons choisi de les intégrer au tableau II pour voir ici encore si les résultats de ces études étaient différents par rapport aux résultats de celle utilisant un spiromètre connecté. Comme pour les systèmes de télésurveillance reposant sur l'unique enregistrement des symptômes, l'utilisation des données obtenues étaient variables : pour trois études, le professionnel de santé était alerté en cas de dégradation des valeurs afin de proposer une prise en charge précoce adaptée[56–58] ; pour trois autres, la finalité était une adaptation du traitement de fond sur des données plus objectives et longitudinales que celles recueillies en consultation classique[59–61] ; pour une autre, le recueil de ces données s'inscrivait dans le cadre plus large d'un programme d'éducation[62] ; pour une dernière, il s'agissait de remplacer des consultations en présentiel par des consultations virtuelles[63]. La seule étude ayant montré une différence cliniquement significative quant à la proportion de patients ayant vu leur contrôle de l'asthme, leur qualité de vie et leur VEMS améliorés par rapport au groupe contrôle, avait pour objectif une adaptation mensuelle du traitement de fond. Cette adaptation était basée sur un système électronique d'aide à la décision recommandant au médecin le traitement sur la base des symptômes et des données de spirométrie recueillis une et deux fois par jour respectivement[60]. Une autre étude a montré une amélioration de la qualité de vie chez des femmes enceintes qui obtenaient un retour automatisé sur le statut de leur asthme en fonction de leurs symptômes et de leurs VEMS enregistrés, et une prise en charge par leur professionnel de santé en cas de dégradation[64]. L'amélioration du contrôle de l'asthme n'était pas cliniquement significative par rapport au groupe contrôle, tout comme le nombre

d'exacerbations et la fonction pulmonaire. Les autres études n'ont pas permis de montrer de différence entre les patients qui transmettaient régulièrement leurs données de spirométrie ou de débitmètre de pointe, et les patients des groupes contrôles qui recevaient soit une prise en charge classique, soit devaient inscrire chaque jour sur un cahier leurs résultats sans qu'ils ne soient transmis directement. (Tableau II)

4.3 Systèmes de télésurveillance reposant sur les inhalateurs connectés

Autant il peut être intéressant d'étudier l'évolution de la télésurveillance des symptômes et de la spirométrie au cours du temps, avant et après l'arrivée des applications mobiles et des objets connectés, autant il ne fait pas sens d'étudier la télésurveillance avant l'ère des inhalateurs connectés tant il est démontré que les valeurs spontanément rapportées par les patients étaient inexactes. Les études ayant utilisés des inhalateurs pour recueillir des données objectives sur l'utilisation des traitements de fond et/ou d'urgence des patients asthmatiques en lien avec leur médecin peuvent être divisées en deux catégories : celles pour lesquelles les données collectées étaient revues lors de consultations médicales souvent dans le cadre de programmes d'éducation thérapeutique (catégorie 1), et celles pour lesquelles ces mêmes données étaient utilisées en temps réel par les professionnels de santé (catégorie 2). L'ensemble de ces études sont présentées dans le tableau III. L'utilisation de données objectives d'observance pour appuyer un programme d'éducation thérapeutique (catégorie 1) était associée à une observance supérieure d'au moins 10% par rapport au groupe contrôle dans cinq des six études ayant évalué ce paramètre[65–70]. Pour autant, cette différence d'observance entre les deux groupes ne s'accompagnait pas d'amélioration cliniquement significative du contrôle de l'asthme, de la qualité de vie, de la fonction pulmonaire ou du risque d'exacerbation. Ces mêmes résultats ont été retrouvés par une revue systématique de la littérature avec méta-analyse qui a également inclus les études au cours desquelles les

inhalateurs connectés n'étaient pas utilisés à des fins de télésurveillance, mais associés à des alarmes audiovisuelles ou l'envoi de SMS lors du moment de la prise du traitement de fond pour favoriser l'observance[71].

Les études ayant évalué l'utilisation en temps réel des données d'inhalateurs connectés ont des résultats plus prometteurs. Objectiver les prises de bronchodilatateurs de courte durée d'action (BCDA) a permis, via une information du patient et de son médecin, de réduire significativement leur utilisation, de l'ordre de 19% [72]; surveiller la bonne réalisation au domicile des nébulisations de traitement de fond chez des enfants d'âge préscolaire, et contacter les parents en cas de non-réalisation de la nébulisation a montré son efficacité pour réduire le nombre d'enfants nécessitant une corticothérapie orale (6/30 enfants (20%) dans le bras intervention versus 16/35 (45.7%) dans le bras contrôle, $p=0.03$)[73]. L'étude la plus complète et dont les résultats sont les plus intéressants a porté sur plus de 250 enfants et adolescents suivis sur un an[74]. Une alerte à leur équipe de soins était déclenchée si le traitement de fond n'était pas pris pendant plus de quatre jours, ou si le BCDA était utilisé plus de quatre fois par jour. L'équipe devait alors contacter la famille pour adapter la prise en charge. Au bout de 12 mois, le contrôle de l'asthme a été amélioré de façon significative par rapport au groupe contrôle (différence de 2,2 point sur l'ACT), mais ces systèmes d'alerte ont également généré plus de consultations médicales ayant conduit à une corticothérapie orale (chez 72,5 % d'enfants du groupe intervention contre 34,6 % du groupe contrôle, $p=0,01$), plus de consultations aux urgences et plus d'hospitalisations. Si les enfants du groupe intervention avaient un score ACT en début d'étude un peu plus bas que ceux du groupe contrôle, témoignant d'un moins bon contrôle de l'asthme, cela ne semble pas suffire à expliquer ce surcroît de recours aux soins. Dans cette étude, la multiplication des alertes était associée à plus de recours aux soins, ce qui peut s'interpréter de deux façons : soit les alertes ont permis de mettre en évidence et de traiter des exacerbations sévères dont la gravité avait

tendance à être minimisée par les familles au domicile, soit les seuils d'alerte, trop faibles, ont entraîné une surréaction des familles et de leurs médecins dommageables pour les enfants qui ont reçu plus de corticothérapie orale. Il paraît important de reproduire cette étude avec des seuils d'alerte plus élevés pour le BCDA afin de faire la part des choses. Par ailleurs, un autre enseignement de cet essai conduit aux Etats-Unis est que les enfants noirs, dont la morbidité liée à l'asthme est plus importante que chez les autres populations, bénéficiaient le plus de cette intervention. Plus généralement, de tels systèmes pourraient avoir un intérêt pour des familles défavorisées qui ont plus difficilement recours aux soins que les familles plus aisées, en standardisant et automatisant les seuils d'alerte. (Tableau III)

4.4 Systèmes de télésurveillance reposant sur la mesure du NO expiré

Les études portant sur le NO expiré ont essentiellement cherché à savoir si cet examen permettait d'améliorer la prise en charge des patients asthmatiques en orientant le choix de leur traitement de fond. Sur la base de résultats montrant une diminution des exacerbations lorsque le NO expiré participe à la décision thérapeutique, l'*American Thoracic Society* a émis en 2021 une recommandation faible quant à son utilisation dans ce cadre[77–79]. Une seule étude, publiée en 2005, a évalué si l'ajout d'une mesure quotidienne du NO expiré au domicile permettait d'améliorer le contrôle de l'asthme d'enfants et adolescents âgés de 6 à 18 ans en comparaison à une mesure quotidienne des symptômes uniquement[80]. Sur la base des mesures effectuées, une adaptation du traitement de fond avait lieu toutes les trois semaines selon un algorithme prédéfini. Aucune différence n'a pu être mise en évidence entre les deux groupes sur les 30 semaines de l'étude, que ce soit en matière de symptômes, d'exacerbations, de fonction pulmonaire, de qualité de vie ou d'inflammation bronchique.

4.5 Autres systèmes de télésurveillance reposant sur des objets connectés

Parmi les autres objets connectés présentés à la section précédente (actimètres, montres connectées, appareils de mesure de la qualité de l'air, détecteurs de toux, de wheezing), nous n'avons retrouvé aucun essai randomisé contrôlé évaluant leur intérêt dans la prise en charge de l'asthme.

4.6 Synthèse

Avec l'essor des télécommunications, la télésurveillance s'est appuyée sur des outils divers au fil du temps : le cahier papier sur lequel il fallait noter ses symptômes et/ou ses mesures de spirométrie a été remplacé successivement par des boîtes vocales interactives, des envois de SMS, des interfaces web, et actuellement des applications mobiles et des objets connectés. Les résultats des études sont constants quel que soit le support utilisé : l'enregistrement actif par le patient de ses symptômes et/ou de ses données de spirométrie une à deux fois par jour, que ce soit pour les revoir lors de la prochaine consultation avec son médecin, ou pour alerter un professionnel de santé en cas de problème, n'apporte pas de bénéfice dans la prise en charge de l'asthme. En réalité, les études négatives se sont succédé en changeant d'outil mais sans changer de stratégie. A l'inverse, une prise en charge reposant sur l'enregistrement de données objectives et pertinentes jusqu'ici non recueillies telles que les données d'observance ou d'utilisation du traitement d'urgence, sans aucun effort supplémentaire de la part du patient (enregistrement passif), associé à des alertes bien définies, représente une stratégie prometteuse. Il pourrait en être de même avec l'ajout des données environnementales, pertinentes, objectives, et recueillies passivement, avec la limite d'une plus grande difficulté à agir sur ces paramètres contrairement aux actions possibles en cas de mauvaise observance. Enfin, il pourrait être intéressant de recueillir des données sur les exacerbations en temps réel via les applications mobiles qui intègrent un plan d'action numérique. Il deviendrait ainsi possible au professionnel de santé de savoir si une exacerbation est en cours, mais également,

en fonction des symptômes entrés par le patient, de connaître le degré de sévérité de l'exacerbation comme dans l'application du projet PANAME, et d'agir en conséquence [45].

5. Quelles limites ?

Les limites à l'utilisation des outils connectés sont résumées par la figure 2.

La première limite correspond au manque de preuves scientifiques quant à leur apport dans la prise en charge des patients, tel que décrit à la section précédente. Ils ne pourront être recommandés par les sociétés savantes et perçus positivement par les médecins attachés à la médecine basée sur les preuves que si leur utilisation est associée à de meilleurs résultats pour les patients.

Une seconde limite correspondait jusqu'ici à leur manque de fiabilité et/ou de validation. Cependant, lorsque des objets connectés sont utilisés dans le cadre médical, la réglementation a été renforcée par une réglementation européenne applicable depuis mai 2021. Le marquage CE en dispositif médical, nécessaire à la commercialisation, requière un dossier technique incluant les résultats d'évaluation cliniques dont la complexité dépend de la place du dispositif évalué dans la prise en charge du patient (collection de données uniquement, intervention dans la stratégie de prise en charge, etc.)

Une troisième limite des outils connectés est leur acceptation par les patients. Enregistrer ses symptômes, utiliser un spiromètre deux fois par jour alourdissent le poids de la prise en charge de l'asthme. L'observance de ces mesures a tendance à rapidement décroître avec le temps. Au bout de 12 mois, les symptômes n'étaient plus enregistrés que par 28% des participants dans une étude [52]. Il est probable que les mêmes patients peu observants de leurs traitements soient peu observants de ces mesures, et abandonnent rapidement ces enregistrements actifs. Les outils connectés permettant un enregistrement passif ne sont également pas épargnés : selon les études, les inhalateurs connectés dits « cassés » ou

« perdus » représentaient 4 à 50% des inhalateurs donnés initialement [67,69,74]. Il est possible qu'en dehors des petits accidents domestiques et des réelles pertes, certains patients adultes, enfants ou leurs familles décident volontairement de considérer ce type d'appareil perdu ou cassé. L'acceptation des objets connectés pourrait être différente entre les patients aisés et les patients défavorisés, avec un risque d'aggravation des inégalités de soins. Après avoir interrogé près de 300 parents d'enfants asthmatiques en France, nous avons montré que l'acceptation d'un environnement numérique était deux fois supérieure parmi les familles aisées, connectées et qui ont souvent bénéficié de la révolution numérique, qu'au sein des familles défavorisées pour qui objets connectés et intelligence artificielle peuvent être perçus comme des menaces [81]. Or, si les familles défavorisées sont réticentes à participer aux programmes de recherche dans ce secteur, le risque est que ces environnements connectés ne soient pensés que pour les familles les plus aisées, avec à terme des algorithmes optimisés pour cette population, et peu performants pour les autres, aggravant les inégalités de soins. L'objectif est d'éviter « l'effet Matthieu » selon les termes de l'évangile : « Car on donnera à celui qui a, et il sera dans l'abondance, mais à celui qui n'a pas on ôtera même ce qu'il a. ». Pour autant, l'étude de Gupta et al. a montré que l'utilisation d'inhalateurs connectés pouvait être au contraire un facteur de plus grande égalité devant les soins, en automatisant les recours aux soins chez des populations qui n'ont pas toujours la même propension et la même facilité à accéder à un professionnel de santé : la décision de recourir aux soins devient moins la prérogative du patient que celle du système de télésurveillance instauré par le professionnel de santé [74]. Sur un autre plan, l'acceptation des objets connectés est également liée à l'acceptation de partager ses données de santé. Les patients peuvent craindre une fuite de leurs données, voire un détournement de l'usage de leurs données de santé à leurs dépens. Lorsque les données sont recueillies à visée de recherche par un établissement public, plus de 80% des patients atteints d'asthme sont enclins à partager leurs données [82]. En revanche, lorsque ces

données sont acquises par des entreprises privées mettant sur le marché les objets connectés, les patients pourraient s'interroger à juste titre sur la finalité des données qu'ils partagent. La lecture des conditions générales d'utilisation devient ici primordiale afin qu'ils puissent effectuer un choix éclairé sur l'acquisition de l'objet connecté ou non.

Une quatrième limite correspond au coût des objets connectés, dans un contexte où les ressources attribuées à la santé sont limitées. En plus du volet scientifique, il est nécessaire d'associer des études médico-économiques à ces systèmes de télésurveillance. En effet, la réduction d'une part du poids de l'asthme (symptômes, exacerbations, etc.), et d'autre part du poids la prise en charge de l'asthme (allers-retours à l'hôpital, etc.) doit être mise en balance avec les coûts supplémentaires induits. Certaines études ont montré qu'en réduisant le nombre de consultations, de telles approches de télésurveillance étaient rentables, mais ces évaluations sont spécifiques à chaque système de télésurveillance et dépendantes du contexte de chaque pays[83]. Dans tous les cas, il faudrait éviter l'aggravation des inégalités, et le risque en France d'un remboursement uniquement par des mutuelles d'objets connectés qui seraient inaccessibles à la population ne pouvant cotiser à ces mutuelles.

Une cinquième limite est liée à l'implémentation des systèmes de télésurveillance dans les systèmes de soins. Actuellement, le modèle est celui de consultations programmées, alors que les systèmes de télésurveillance nécessitent à l'inverse des professionnels de santé disponibles si ce n'est en permanence, au minimum aux heures ouvrables pour gérer des alertes arrivant de façon inopinée, contacter les patients et adapter leur prise en charge. Le système de soin français étant actuellement saturé, l'utilisation de tels systèmes doit être réfléchie afin de ne pas participer à l'épuisement professionnel en ajoutant une charge de travail supplémentaire ; autrement dit ces systèmes doivent remplacer certaines consultations, et non pas s'ajouter aux consultations existantes. Une autre approche serait d'impliquer davantage les professions paramédicales pour les mettre au cœur des dispositifs de télésurveillance, comme cela est

réalisé à l'étranger : ainsi dans la plupart des études citées, la personne en première ligne était souvent un infirmier ou une infirmière. Cette personne avait en charge de faire un premier tri dans les alertes, et mettait à profit ses compétences en éducation thérapeutique pour répondre aux nombreuses interrogations des patients, comme le font les infirmières coordinatrices des centres de ressources et de compétences de la mucoviscidose. Par ailleurs, l'utilisation de ces systèmes pose la question de la responsabilité du soignant face à ces alertes : sa responsabilité peut-elle être engagée s'il ne parvient pas à répondre à un pic d'alertes (en saison automnale par exemple) dans les temps impartis ? Si une alerte sévère survient en dehors des heures ouvrables ? Ces situations méritent d'être réfléchies avant la mise en place de ces systèmes.

Une sixième limite correspond à l'impact de ces objets connectés dans le contexte actuel de réchauffement climatique. Créer un environnement d'objets connectés pour chaque patient asthmatique a un coût climatique lié à leur fabrication, mais également à l'entretien des serveurs qui permettent la transmission et le stockage de données de plus en plus volumineuses. Le monde virtuel a un net impact sur le monde réel, les réseaux de transmission de données représentant déjà 1% des émissions de carbone[84]. Les systèmes de télésurveillance pourraient réduire les émissions de carbone liés aux allers-retours à l'hôpital en voiture ou ambulance, et via le recueil de données environnementales, entraîner des changements de comportement des patients et/ou à l'échelle des collectivités. Cependant il semble peu probable que cela compense les émissions générées par la production des objets connectés.

6. Quelles perspectives ?

La transformation numérique dans l'asthme s'est essentiellement manifestée jusqu'ici par une digitalisation du recueil des données, que ce soit à l'hôpital via les dossiers médicaux informatisés ou les logiciels d'explorations fonctionnelles respiratoires, ou au domicile via l'utilisation d'application mobile et d'objets connectés. Pour autant, cette multiplication des

données récoltées n'a pas changé la prise en charge des 90% de patients atteints d'asthme léger ou modéré. Le développement rapide de techniques statistiques et/ou d'apprentissage machine pourrait permettre, après la digitalisation du recueil, la digitalisation de la décision[85]. Basés sur ces « big data » reposant largement sur l'utilisation des outils connectés, des algorithmes sophistiqués pourraient détecter l'imminence d'une crise d'asthme, personnaliser la prise en charge d'une crise d'asthme, ou choisir le traitement de fond ayant le plus de chance d'aboutir à des résultats selon le profil du patient. Depuis plusieurs décennies, des équipes cherchent à introduire des systèmes électroniques d'aide à la décision dans l'asthme, à destination des médecins, sans succès[86]. Les principaux obstacles sont liés au fait que ces systèmes ne s'intègrent pas dans les logiciels médicaux faisant donc perdre du temps aux professionnels de santé, ou qu'ils proposent des interfaces peu ergonomiques à leurs utilisateurs. Cependant, dans le contexte actuel de pénurie médicale, ces systèmes d'aide à la décision pourraient être remplacés par des systèmes autonomes de prise de décision reposant sur les algorithmes ne nécessitant plus d'intervention médicale directe. Selon le principe de « garantie humaine », l'équipe médicale associée à l'équipe de développement resteraient conjointement responsables des décisions prises par le système autonome, et surveillerait l'évolution des décisions d'un tel système grâce à des audits répétés d'échantillons de décisions. Une consultation en présentiel, un fois par an ou tous les deux ans, resterait nécessaire pour mettre à jour un certain nombre de données utilisées par le système autonome. Le stade du « jumeau numérique » serait alors franchi (figure 3) : des données provenant du patient seraient continuellement recueillies et, intégrées grâce à des modèles mathématiques donneraient une vision fine de l'état du patient correspondant à une « ombre digitale ». L'association de cette « ombre digitale » à un retour vers le patient sous forme de recommandations ou prescriptions correspond à la définition d'un jumeau numérique[87,88]. De tels jumeaux numériques existent déjà avec les systèmes de « pancréas

artificiels » destinés aux patients atteints de diabète de type 1. Ces systèmes associent un recueil continu de la glycémie du patient grâce à un dispositif de mesure du glucose interstitiel, des modèles mathématiques donnant une représentation virtuelle de l'état du patient à partir des données entrantes de glycémie et de modèles préexistants de métabolisme du glucose, et des algorithmes déterminant à partir de la modélisation réalisée la dose d'insuline à administrer via la pompe à insuline connectée, l'ensemble réalisant un « jumeau numérique » [89]. La transposition de tels systèmes dans l'asthme est bien plus complexe, et il est difficile de dire si elle pourra se réaliser un jour, si tant est que cela soit souhaitable, ce qui est laissé à l'appréciation du lecteur. « La prévision est difficile, surtout quand elle concerne l'avenir » selon les mots de l'humoriste Pierre Dac. A l'heure de la digitalisation de la société, l'important est sans doute d'avoir connaissance de tels scénarios pour être capable de prendre part à l'évolution du système de soins sans naïveté.

7. Conclusion

Les outils connectés ne modifient pas la prise en charge de l'asthme lorsqu'ils sont utilisés de la même façon que les précédents outils, non connectés. C'est particulièrement le cas des applications mobiles recueillant les symptômes, et des spiromètres connectés. En revanche, lorsque ces outils connectés permettent le recueil passif de nouvelles données pertinentes pour la prise en charge de l'asthme, tels que les inhalateurs connectés pour les données d'observance et d'utilisation du traitement d'urgence, et qu'ils sont intégrés dans un système de télésurveillance adapté, leur bénéfice sur la prise en charge des patients asthmatiques se concrétise. L'étape suivante est à la création d'écosystèmes d'objets connectés permettant le recueil passif et en continu de données provenant des patients et de leur environnement, ouvrant la voie à des systèmes de décision algorithmiques autonomes adaptant en continu la prise en charge des patients. Là encore, la démonstration scientifique de la plus-value de tels

systemes par rapport à une prise en charge classique, et leur acceptabilité par les patients et leurs professionnels de santé seront primordiales.

Références

- [1] Article R6316-1 - Code de la santé publique - Légifrance n.d. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000022934375 (accessed December 4, 2021).
- [2] Conseil National de l'ordre des médecins. Santé connectée: De la e-santé à la santé connectée 2015.
- [3] Messinger AI, Luo G, Deterding RR. The doctor will see you now: How machine learning and artificial intelligence can extend our understanding and treatment of asthma. *J Allergy Clin Immunol* 2020 ;145 :476–8.
- [4] Fleming L. Asthma exacerbation prediction : recent insights. *Curr Opin Allergy Clin Immunol* 2018 ;18 :117–23.
- [5] Davis KJ, Disantostefano R, Peden DB. Is Johnny wheezing? Parent-child agreement in the Childhood Asthma in America survey. *Pediatr Allergy Immunol Off Publ Eur Soc Pediatr Allergy Immunol* 2011 ;22 :31–5.
- [6] Dell SD, Foty R, Becker A, Franssen E, Chapman KR. Parent-reported symptoms may not be adequate to define asthma control in children. *Pediatr Pulmonol* 2007 ;42 :1117–24.
- [7] Burgess SW, Sly PD, Morawska A, Devadason SG. Assessing adherence and factors associated with adherence in young children with asthma. *Respirol Carlton Vic* 2008 ;13 :559–63.
- [8] Michel G, Silverman M, Strippoli M-PF, Zwahlen M, Brooke AM, Grigg J, et al. Parental understanding of wheeze and its impact on asthma prevalence estimates. *Eur Respir J* 2006 ;28 :1124–30.
- [9] Bouazza N, Foissac F, Urien S, Guedj R, Carbajal R, Tréluyer J-M, et al. Fine particulate pollution and asthma exacerbations. *Arch Dis Child* 2018 ;103 :828–31.
- [10] FitzGerald JM, Boulet L-P, McIvor RA, Zimmerman S, Chapman KR. Asthma control in Canada remains suboptimal: the Reality of Asthma Control (TRAC) study. *Can Respir J* 2006 ;13 :253–9.
- [11] Cicutto L, Dingae MB, Langmack EL. Improving Asthma Care in Rural Primary Care Practices: A Performance Improvement Project. *J Contin Educ Health Prof* 2014 ;34 :205–14.
- [12] Wisnivesky JP, Lorenzo J, Lyn-Cook R, Newman T, Aponte A, Kiefer E, et al. Barriers to adherence to asthma management guidelines among inner-city primary care providers. *Ann Allergy Asthma Immunol* 2008 ;101 :264–70.
- [13] Le Parisien. Internet : 84% des Français utilisent au quotidien un smartphone. <https://www.leparisien.fr/high-tech/internet-84-des-francais-utilisent-au-quotidien-un-smartphone-01-07-2021-MXMVNU7HRNCGBE4UQPRQRHJK4I.php> (accessed December 10, 2021).
- [14] Wu AC, Carpenter JF, Himes BE. Mobile health applications for asthma. *J Allergy Clin Immunol Pract* 2015 ;3 :446-448.e16.
- [15] Tinschert P, Jakob R, Barata F, Kramer J-N, Kowatsch T. The Potential of Mobile Apps for Improving Asthma Self-Management : A Review of Publicly Available and Well-Adopted Asthma Apps. *JMIR MHealth UHealth* 2017 ;5 : e7177.
- [16] Fonseca JA, Costa-Pereira A, Delgado L, Silva LN, Magalhães M, Castel-Branco MG, et al. Pulmonary Function Electronic Monitoring Devices: A Randomized Agreement Study. *Chest* 2005 ;128 :1258–65.

- [17] Rothe T, Karrer W, Schindler C. Accuracy of the Piko-1 Pocket Spirometer. *J Asthma* 2012 ;49 :45–50.
- [18] Degryse J, Buffels J, Dijck YV, Decramer M, Nemery B. Accuracy of Office Spirometry Performed by Trained Primary-Care Physicians Using the MIR Spirobank Hand-Held Spirometer. *Respiration* 2012 ;83 :543–52.
- [19] Walters JAE, Wood-Baker R, Walls J, Johns DP. Stability of the EasyOne ultrasonic spirometer for use in general practice. *Respirology* 2006 ;11 :306–10.
- [20] Alving K, Anolik R, Crater G, LaForce CF, Rickard K. Validation of a New Portable Exhaled Nitric Oxide Analyzer, NIOX VERO® : Randomized Studies in Asthma. *Pulm Ther* 2017 ;3 :207–18.
- [21] Boot JD, de Ridder L, de Kam ML, Calderon C, Mascelli MA, Diamant Z. Comparison of exhaled nitric oxide measurements between NIOX MINO® electrochemical and Ecomedics chemiluminescence analyzer. *Respir Med* 2008 ;102 :1667–71.
- [22] Harnan SE, Tappenden P, Essat M, Gomersall T, Minton J, Wong R, et al. Measurement of exhaled nitric oxide concentration in asthma: a systematic review and economic evaluation of NIOX MINO, NIOX VERO and NObreath. *Health Technol Assess Winch Engl* 2015 ;19 :1–330.
- [23] Smith S, Gillespie L, Heaney L, Brightling C, Mcconnachie A, Siddiqui S, et al. Adapting asthma clinical trials in response to the COVID-19 pandemic - the BenRex study design. *Eur Respir J* 2021 ;58.
- [24] Harrison T, Pavord ID, Chalmers JD, Whelan G, Fagerås M, Rutgersson A, et al. Variability in airway inflammation, symptoms, lung function and reliever use in asthma: anti-inflammatory reliever hypothesis and STIFLE study design. *ERJ Open Res* 2020 ;6.
- [25] Pipek LZ, Nascimento RFV, Acencio MMP, Teixeira LR. Comparison of SpO2 and heart rate values on Apple Watch and conventional commercial oximeters devices in patients with lung disease. *Sci Rep* 2021 ;11 :18901.
- [26] King CE, Sarrafzadeh M. A Survey of smartwatches in remote health monitoring. *J Healthc Inform Res* 2018 ;2 :1–24.
- [27] Honkoop PJ, Simpson A, Bonini M, Snoeck-Stroband JB, Meah S, Chung KF, et al. MyAirCoach: the use of home-monitoring and mHealth systems to predict deterioration in asthma control and the occurrence of asthma exacerbations; study protocol of an observational study. *BMJ Open* 2017 ;7 : e013935.
- [28] Orellano P, Quaranta N, Reynoso J, Balbi B, Vasquez J. Effect of outdoor air pollution on asthma exacerbations in children and adults : Systematic review and multilevel meta-analysis. *PLOS ONE* 2017 ;12 : e0174050.
- [29] Liu Y, Pan J, Zhang H, Shi C, Li G, Peng Z, et al. Short-Term Exposure to Ambient Air Pollution and Asthma Mortality. *Am J Respir Crit Care Med* 2019 ;200 :24–32.
- [30] Schachter EN, Rohr A, Habre R, Koutrakis P, Moshier E, Nath A, et al. Indoor air pollution and respiratory health effects in inner city children with moderate to severe asthma. *Air Qual Atmosphere Health* 2020 ;13 :247–57.
- [31] Carreiro-Martins P, Papoila AL, Caires I, Azevedo S, Cano MM, Virella D, et al. Effect of indoor air quality of day care centers in children with different predisposition for asthma. *Pediatr Allergy Immunol* 2016 ;27 :299–306.
- [32] Xu Z, Crooks JL, Davies JM, Khan AF, Hu W, Tong S. The association between ambient temperature and childhood asthma : a systematic review. *Int J Biometeorol* 2018 ;62 :471–81.
- [33] Zhang H, Liu S, Chen Z, Zu B, Zhao Y. Effects of variations in meteorological factors on daily hospital visits for asthma : A time-series study. *Environ Res* 2020 ;182 :109115.
- [34] Cassard T, Jauvion G, Lissmyr D. High-Resolution Air Quality Prediction Using Low-Cost Sensors. *ArXiv200612092 Cs Eess Stat* 2020.

- [35] Massaroni C, Nicolò A, Lo Presti D, Sacchetti M, Silvestri S, Schena E. Contact-Based Methods for Measuring Respiratory Rate. *Sensors* 2019 ;19 :908.
- [36] Tinschert P, Rassouli F, Barata F, Steurer-Stey C, Fleisch E, Puhan M, et al. Smartphone-based cough detection predicts asthma control – description of a novel, scalable digital biomarker. *Eur Respir J* 2020 ;56.
- [37] Porter P, Abeyratne U, Swarnkar V, Tan J, Ng T, Brisbane JM, et al. A prospective multicentre study testing the diagnostic accuracy of an automated cough sound centred analytic system for the identification of common respiratory disorders in children. *Respir Res* 2019 ;20 :81.
- [38] Swarnkar V, Abeyratne U, Tan J, Ng TW, Brisbane JM, Choveaux J, et al. Stratifying asthma severity in children using cough sound analytic technology. *J Asthma* 2021 ;58 :160–9.
- [39] Huffaker MF, Carchia M, Harris BU, Kethman WC, Murphy TE, Sakarovitch CCD, et al. Passive Nocturnal Physiologic Monitoring Enables Early Detection of Exacerbations in Children with Asthma. A Proof-of-Concept Study. *Am J Respir Crit Care Med* 2018 ;198 :320–8.
- [40] Dramburg S, Dellbrügger E, van Aalderen W, Matricardi PM. The impact of a digital wheeze detector on parental disease management of pre-school children suffering from wheezing—a pilot study. *Pilot Feasibility Stud* 2021 ;7 :185.
- [41] Montalbano L, Ferrante G, Cilluffo G, Gentile M, Arrigo M, La Guardia D, et al. Targeting quality of life in asthmatic children: The MyTEP pilot randomized trial. *Respir Med* 2019 ;153 :14–9.
- [42] Rikkers-Mutsaerts ERVM, Winters AE, Bakker MJ, van Stel HF, van der Meer V, de Jongste JC, et al. Internet-based self-management compared with usual care in adolescents with asthma: a randomized controlled trial. *Pediatr Pulmonol* 2012 ;47 :1170–9.
- [43] Poureslami I, Shum J, Lester RT, Tavakoli H, Dorscheid DR, FitzGerald JM. A pilot randomized controlled trial on the impact of text messaging check-ins and a web-based asthma action plan versus a written action plan on asthma exacerbations. *J Asthma Off J Assoc Care Asthma* 2018 :1–13.
- [44] Real FJ, Beck AF, DeBlasio D, Zackoff M, Henize A, Xu Y, et al. Dose Matters: A Smartphone Application to Improve Asthma Control Among Patients at an Urban Pediatric Primary Care Clinic. *Games Health J* 2019 ;8 :357–65.
- [45] Beydon N, Delclaux C, Groupe PANAME. [Digital action plan for asthma exacerbations (PANAME)]. *Rev Mal Respir* 2017 ;34 :1026–33.
- [46] Kuipers E, Wensing M, de Smet P, Teichert M. Self-management research of asthma and good drug use (SMARAGD study) : a pilot trial. *Int J Clin Pharm* 2017 ;39 :888–96.
- [47] Kosse RC, Bouvy ML, de Vries TW, Koster ES. Effect of a mHealth intervention on adherence in adolescents with asthma: A randomized controlled trial. *Respir Med* 2019 ;149 :45–51.
- [48] Fiks AG, Mayne SL, Karavite DJ, Suh A, O’Hara R, Localio AR, et al. Parent-reported outcomes of a shared decision-making portal in asthma: a practice-based RCT. *Pediatrics* 2015 ;135 : e965-973.
- [49] Ahmed S, Ernst P, Bartlett SJ, Valois M-F, Zaihra T, Paré G, et al. The Effectiveness of Web-Based Asthma Self-Management System, My Asthma Portal (MAP): A Pilot Randomized Controlled Trial. *J Med Internet Res* 2016 ;18 : e313.
- [50] van den Wijngaart LS, Roukema J, Boehmer ALM, Brouwer ML, Hugen CAC, Niers LEM, et al. A virtual asthma clinic for children: fewer routine outpatient visits, same asthma control. *Eur Respir J* 2017 ;50 :1700471.

- [51] Jacobson JS, Lieblein A, Fierman AH, Fishkin ER, Hutchinson VE, Rodriguez L, et al. Randomized trial of an electronic asthma monitoring system among New York City children. *Am J Manag Care* 2009;15:809–14.
- [52] Gustafson D, Wise M, Bhattacharya A, Pulvermacher A, Shanovich K, Phillips B, et al. The effects of combining Web-based eHealth with telephone nurse case management for pediatric asthma control: a randomized controlled trial. *J Med Internet Res* 2012 ;14 : e101.
- [53] Voorend-van Bergen S, Vaessen-Verberne AA, Brackel HJ, Landstra AM, van den Berg NJ, Hop WC, et al. Monitoring strategies in children with asthma: a randomised controlled trial. *Thorax* 2015 ;70 :543–50.
- [54] Bonini M, Paolo MD, Bagnasco D, Baiardini I, Braido F, Caminati M, et al. Minimal clinically important difference for asthma endpoints: an expert consensus report. *EUR Respira Revu* 2020 ; 29: 190137
- [55] Deschildre A, Béghin L, Salleron J, Iliescu C, Thumerelle C, Santos C, et al. Home telemonitoring (forced expiratory volume in 1 s) in children with severe asthma does not reduce exacerbations. *Eur Respir J* 2012 ;39 :290–6.
- [56] Kim M-Y, Lee S-Y, Jo E-J, Lee S-E, Kang M-G, Song W-J, et al. Feasibility of a smartphone application based action plan and monitoring in asthma. *Asia Pac Allergy* 2016 ;6 :174–80.
- [57] Araújo L, Jacinto T, Moreira A, Castel-Branco MG, Delgado L, Costa-Pereira A, et al. Clinical efficacy of web-based versus standard asthma self-management. *J Investig Allergol Clin Immunol* 2012;22:28–34.
- [58] Nemanic T, Sarc I, Skrgat S, Flezar M, Cukjati I, Marc Malovrh M. Telemonitoring in asthma control: a randomized controlled trial. *J Asthma Off J Assoc Care Asthme* 2019 ;56 :782–90.
- [59] Willems DCM, Joore MA, Hendriks JJE, Nieman FHM, Severens JL, Wouters EFM. The effectiveness of nurse-led telemonitoring of asthma: results of a randomized controlled trial. *J Eval Clin Pract* 2008 ;14 :600–9.
- [60] Rasmussen LM, Phanareth K, Nolte H, Backer V. Internet-based monitoring of asthma : a long-term, randomized clinical study of 300 asthmatic subjects. *J Allergy Clin Immunol* 2005 ;115 :1137–42.
- [61] Jan R-L, Wang J-Y, Huang M-C, Tseng S-M, Su H-J, Liu L-F. An internet-based interactive telemonitoring system for improving childhood asthma outcomes in Taiwan. *Telemed J E-Health Off J Am Telemed Assoc* 2007 ;13 :257–68.
- [62] Wiecha JM, Adams WG, Rybin D, Rizzodepaoli M, Keller J, Clay JM. Evaluation of a web-based asthma self-management system: a randomised controlled pilot trial. *BMC Pulm Med* 2015 ;15 :17.
- [63] Chan DS, Callahan CW, Hatch-Pigott VB, Lawless A, Proffitt HL, Manning NE, et al. Internet-based home monitoring and education of children with asthma is comparable to ideal office-based care: results of a 1-year asthma in-home monitoring trial. *Pediatrics* 2007 ;119 :569–78.
- [64] Zairina E, Abramson MJ, McDonald CF, Li J, Dharmasiri T, Stewart K, et al. Telehealth to improve asthma control in pregnancy: A randomized controlled trial. *Respirol Carlton Vic* 2016 ;21 :867–74.
- [65] Onyirimba F, Apter A, Reisine S, Litt M, McCusker C, Connors M, et al. Direct clinician-to-patient feedback discussion of inhaled steroid use: its effect on adherence. *Ann Allergy Asthma Immunol Off Publ Am Coll Allergy Asthma Immunol* 2003 ;90 :411–5.

- [66] Burgess SW, Sly PD, Devadason SG. Providing feedback on adherence increases use of preventive medication by asthmatic children. *J Asthma Off J Assoc Care Asthma* 2010 ;47 :198–201.
- [67] Foster JM, Usherwood T, Smith L, Sawyer SM, Xuan W, Rand CS, et al. Inhaler reminders improve adherence with controller treatment in primary care patients with asthma. *J Allergy Clin Immunol* 2014 ;134 :1260-1268.e3.
- [68] Apter AJ, Wang X, Bogen DK, Rand CS, McElligott S, Polsky D, et al. Problem solving to improve adherence and asthma outcomes in urban adults with moderate or severe asthma: a randomized controlled trial. *J Allergy Clin Immunol* 2011 ;128 :516-523.e1-5.
- [69] Morton RW, Elphick HE, Rigby AS, Daw WJ, King DA, Smith LJ, et al. STAAR: a randomised controlled trial of electronic adherence monitoring with reminder alarms and feedback to improve clinical outcomes for children with asthma. *Thorax* 2017 ;72 :347–54.
- [70] Sulaiman I, Greene G, MacHale E, Seheult J, Mokoka M, D’Arcy S, et al. A randomised clinical trial of feedback on inhaler adherence and technique in patients with severe uncontrolled asthma. *Eur Respir J* 2018 ;51 :1701126.
- [71] Lee JR, Leo S, Liao S, Ng WR, Tay TYN, Wang Y, et al. Electronic adherence monitoring devices for children with asthma: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Int J Nurs Stud* 2021 ;122 :104037.
- [72] Merchant RK, Inamdar R, Quade RC. Effectiveness of Population Health Management Using the Propeller Health Asthma Platform : A Randomise Clinicat Trial. *J Allergy Clin Immunol Pract* 2016 ;4 :455–63.
- [73] Zhou Y, Lu Y, Zhu H, Zhang Y, Li Y, Yu Q. Short-term effect of a smart nebulizing device on adherence to inhaled corticosteroid therapy in Asthma Predictive Index-positive wheezing children. *Patient Prefer Adherence* 2018 ;12 :861–8.
- [74] Gupta RS, Fierstein JL, Boon KL, Kanaley MK, Bozen A, Kan K, et al. Sensor-Based Electronic Monitoring for Asthma: A Randomized Controlled Trial. *Pediatrics* 2021 ;147 : e20201330.
- [75] Otsuki M, Eakin MN, Rand CS, Butz AM, Hsu VD, Zuckerman IH, et al. Adherence feedback to improve asthma outcomes among inner-city children: a randomized trial. *Pédiatriques* 2009 ;124 :1513–21.
- [76] Weinstein AG, Singh A, Laurenceau J-P, Skoner DP, Maiolo J, Sharara R, et al. A Pilot Study of the Effect of an Educational Web Application on Asthma Control and Medication Adherence. *J Allergy Clin Immunol Pract* 2019 ;7 :1497–506.
- [77] Petsky HL, Kew KM, Turner C, Chang AB. Exhaled nitric oxide levels to guide treatment for adults with asthma. *Cochrane Database Syst Rev* 2016 ;9 :CD011440.
- [78] Petsky HL, Kew KM, Chang AB. Exhaled nitric oxide levels to guide treatment for children with asthma. *Cochrane Database Syst Rev* 2016.
- [79] Khatri SB, Iaccarino JM, Barochia A, Soghier I, Akuthota P, Brady A, et al. Use of Fractional Exhaled Nitric Oxide to Guide the Treatment of Asthma: An Official American Thoracic Society Clinical Practice Guideline. *Am J Respir Crit Care Med* 2021 ;204 : e97–109.
- [80] de Jongste JC, Carraro S, Hop WC, CHARISM Study Group, Baraldi E. Daily telemonitoring of exhaled nitric oxide and symptoms in the treatment of childhood asthma. *Am J Respir Crit Care Med* 2009 ;179 :93–7.
- [81] Abdoul C, Cros P, Coutier L, Hadchouel A, Neuraz A, Burgun A, et al. Parents’ views on artificial intelligence for the daily management of childhood asthma: a survey. *J Allergy Clin Immunol Pract* 2021 ;9 :1728-1730.e3.
- [82] Data Sharing Report. Asthma UK n.d. <https://www.asthma.org.uk/datareport> (accessed January 5, 2022).

- [83] van den Wijngaart LS, Kievit W, Roukema J, Boehmer ALM, Brouwer ML, Hugen CAC, et al. Online asthma management for children is cost-effective. *EUR Respira J* 2017 ;50 :1701413.
- [84] Data Centres and Data Transmission Networks – Analysis. IEA n.d. <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks> (accessed December 10, 2021).
- [85] Drummond D. Between competence and warmth: the remaining place of the physician in the era of artificial intelligence. *Npj Digit Med* 2021 ;4 :1–4.
- [86] Matui P, Wyatt JC, Pinnock H, Sheikh A, McLean S. Computer decision support systems for asthma : a systematic review. *NPJ Prim Care Respir Med* 2014 ;24 :14005.
- [87] Chase JG, Zhou C, Knopp JL, Shaw GM, Näswall K, Wong JHK, et al. Digital Twins in Critical Care: What, When, How, Where, Why? *IFAC-Pap* 2021 ;54 :310–5.
- [88] Braun M. Représenta me : pelasse ! Towards an ethics of digital twins in medicine. *J Med Ethics* 2021 ;47 :394–400.
- [89] Kovatchev B. A Century of Diabetes Technology: Signals, Models, and Artificial Pancreas Control. *Trends Endocrinol Metab TEM* 2019 ;30 :432–44.

Légende des figures

Figure 1.

Principaux objets connectés disponibles dans l'asthme

Figure 2

Principales limites des outils connectés dans l'asthme

Figure 3.

Système de "Jumeau Numérique". Dans un tel système, des données sont recueillies en continu et utilisées afin de créer une représentation numérique du patient (ombre digitale) permettant des prises de décision.

Tableau I : Caractéristiques des essais randomisés contrôlés ayant évalué un système de télésurveillance par enregistrement des symptômes.

Auteur	Support	Population (n intervention/n contrôle)	Durée (mois)	Type et fréquence d'enregistrement des symptômes	Professionnel de santé	Type de retour	Résultats – Symptômes	Résultats – crises et/ou consultation urgentes	Résultats – VEMS	Résultats – Qualité de vie
Jacobson 2009[51]	Console	Enfants 8-17 ans (n=29/30)	12	QS x1/j	IDE/medicine	Surveillance quotidienne, appel de la famille pour vérifier les symptômes, changer les traitements, organiser une consultation	NA	NS	NA	NA
Gustafson 2012[52]	Site web	Enfants 4-12 ans (n= 127/132)	12	QS x2/m	IDE	Discussions avec la famille tous les 15 jours, éducation personnalisée	ACQ SS non-CS (+0.3)	NA	NA	NA
Voeren-van Bergen 2015[53]	Site web	Enfants 4-18 ans (n=91/89)	12	ACT x1/m	IDE	Adaptation du traitement de fond tous les mois selon symptômes	ACT SS non-CS (+1)	NS	NS	NS
Fis 2015[48]	Site web	Enfants 6-12 ans (n =26/27)	6	QS x1/m	Médecin	Gestion personnalisée en cas d'alerte du système	ACT NS	NS	NA	NS
Ahmed 2016[49]	Site web	Adultes (n=49/51)	6	QS x1/s	IDE	Gestion personnalisée en cas d'alerte du système	ACT NS	NA	NA	NS
Van Den Wijngaart 2017[50]	Site web	Enfants 6-16 ans (n=105/105)	16	c-ACT/ACT x1/m	NP	Gestion personnalisée en cas d'alerte du système	c ACT SS non-CS (+ 1.2) chez les 6-11 ans ACT NS chez les 12-16 ans	NS	NS	NA
Kuipers 2017[46]	Appli mobile	Adultes (n= 41/39)	6	CARAT x2/m	Pharmacien	Gestion personnalisée en cas d'alerte du système	CARAT NS	NS	NA	NA
Kosse 2019[47]	Appli mobile	Adolescents 12-18	6	CARAT x1/s	Pharmacien	Echanges d'informations, de	CARAT NS	NA	NA	NS

		(n= 87/147)				vidéo d'éducation avec le patient				
--	--	-------------	--	--	--	--------------------------------------	--	--	--	--

ACT : asthma control test ACQ : asthma control questionnaire ; CARAT : Control of Allergic Rhinitis and Asthma Test ; CS : cliniquement significatif ; IDE : infirmier diplômé d'état ; NA : non évalué ; NP : non précisé ; NS : statistiquement non significatif ; QS : questionnaire spécifique à l'étude ; SS : statistiquement significatif ; x1/j : une fois par jour ; x 1/s : une fois par semaine ; x 1/m : une fois par mois

Tableau II : Caractéristiques des essais randomisés contrôlés ayant évalué un système de télésurveillance par enregistrement de données de spirométrie ou de débitmètre de pointe

Auteur	Support	Population (n intervention /n contrôle)	Durée (mois)	Type et fréquence d'enregistrement des symptômes	Type et fréquence d'enregistrement de la spirométrie	Type de spiromètre	Professionnel de santé	Type de retour	Résultats – Symptômes	Résultats – crises et/ou consultations urgentes	Résultats – VEMS	Résultats – Qualité de vie
Rasmussen 2005[60]	Site web	Adultes (n=100/200)	6	QS x1/j	DEP x 2/j	Standard	Médecin	Adaptation du traitement de fond/mois	% adultes avec amélioration symptômes sur QS : SS et CS	NS	% d'adultes avec > +300mL de VEMS SS et CS	% d'adultes avec amélioration AQLQ SS et CS
Chan 2007[63]	Site web	Enfants 6-17 (n=60/60)	12	QS x1/j	DEP x1/j	Standard	IDE + médecin	Gestion personnalisée avec conseils, rappel du plan d'action	Jours sans symptômes NS	NS	NS	NS
Jan 2007[61]	Site web	Enfants 6-12 (n=88/76)	3	QS x1/j	DEP x1/j	Electronique	Médecin	Adaptation du traitement de fond/mois	c-ACT NS	NA	NS	NA
Willems 2008[59]	Console	Enfants et adultes (n=55/54)	12	QS NP	DEP et VEMS x2/j	Standard	IDE	Adaptation du traitement de fond/mois	QS NS	NS	NA	NS
Araujo 2012[57]	Site web	Jeunes adultes (n=21/21)	2	QS x1/j	DEP et VEMS x1/j	Electronique	Médecin	Gestion personnalisée en cas d'alerte du	ACQ NS	NA	NS	NS

								système				
Deschildre 2012[55]	Site web	Enfants 6-16 avec asthme sévère (n=21/23)	12	None	VEMS x2/j	Electronique connecté par modem	Médecin	Gestion personnalisée en cas de dégradation du VEMS	NA	NS	NS	NS
Wiecha 2015[62]	Site web	Enfants 9-17 (n=28/14)	6	QS à la demande	DEP à la demande	Electronique	IDE + médecin	Adaptation du traitement de fond et éducation/2 mois	QS NS	NS	NA	NA
Kim 2016[56]	Site web	Adultes (n=22/22)	2	QS x2/j	DEP x2/j	Standard	Médecin	Gestion personnalisée en cas d'alerte du système	ACT NS	NA	NS	NS
Zairina 2016[64]	Appli mobile	Femmes enceintes (n=36/36)	6	QS x1/s	VEMS x1/j	Electronique	Pharmacien	Gestion personnalisée en cas d'alerte du système	ACQ SS non-CS (+0.3)	NS	NS	mAQLQ SS et CS (+0.7)
Nemanic 2019[58]	Appli mobile	Adultes (n=51/49)	12	ACT x1/m	DEP x1/s	Standard	IDE + médecin	Gestion personnalisée en cas d'alerte du système	ACT NS	NS	NS	NA

ACT : asthma control test ACQ : asthma control questionnaire ; AQLQ : asthma quality of life questionnaire ; mAQLQ ; mini AQLQ ; CS : cliniquement significatif ; DEP : débit expiratoire de pointe ; IDE : infirmier diplômé d'état ; NA : non évalué ; NP : non précisé ; NS : statistiquement non significatif ; QS : questionnaire spécifique à l'étude ; SS : statistiquement significatif ; VEMS : volume expiré maximal en une seconde. x1/j : une fois par jour ; x 1/s : une fois par semaine ; x 1/m : une fois par mois

Tableau III : Caractéristiques des essais randomisés contrôlés ayant évalué un système de télésurveillance utilisant un inhalateur connecté

Auteur	Population (n)	Durée (mois)	Type de traitement	Intervention	Contrôle	Professionnel de santé	Résultats – Observance ou	Résultats – Symptôme	Résultats – crises et/ou	Résultats – s –	Résultats – Qualité
--------	----------------	--------------	--------------------	--------------	----------	------------------------	---------------------------	----------------------	--------------------------	-----------------	---------------------

	intervention/ n contrôle))	t connecté				utilisation BCDA	s	consultation urgentes	VEMS	de vie
Onyirimba 2003[65]	Adultes (n=10/9)	2,5	Fond et urgence	Education + feedback sur observance et utilisation BCDA	Educatio n seule	IDE/médecin	Obs : 81%/47% SS et CS BCDA : NS	QS NS	NA	NS	NS
Otsuki 2009[75]	Enfants 2-12 (n=83/84)	18	Fond	Education + feedback sur observance	Educatio n seule	NP	Obs : NA	QS NS	NS	NA	NA
Burgess 2010[66]	Enfants 6-14 (n=14/12)	4	Fond	Feedback sur observance	Prise en charge habituelle	Médecin	Obs : 79%/56.9% SS et CS	QS NS	NS	NS	NA
Apter 2011[68]	Adultes (n= 165/168)	6	Fond	Education interactive + feedback sur observance	Educatio n passive	NP	Obs : 55%/52% NS	ACT NS	NS	NS	NS
Foster 2014[67]	Adultes (n= 21/35/32/43)	6	Fond	Education sur observance ; feedback sur observance + rappels ; les 2 associés	Prise en charge habituelle	Médecin	Obs : 46%/71%/76%/46 % SS et CS pour les groupes ayant le smartinhaler vs les autres	ACT NS	NS	NS	NS
Morton 2017[69]	Enfants 6-16 (n=39/38)	1	Fond	Feedback sur observance + rappels audio	Prise en charge habituelle	Médecin	Obs : 70%/49% SS et CS	ACQ NS	NS	NS	NS
Sulaiman 2018[70]	Adultes sévéres (n=111/107)	3	Fond	Education + feedback sur observance	Educatio n seule	Médecin	Obs : 73%/63% SS et CS	NA	NA	NA	NA
Weinstein	Adultes	3	Fond	Education	Prise en	Médecin	Obs : NA	ACQ SS	NA	NS	NA

2019[76]	(n=27/23)			interactive + feedback sur observance	charge habituelle			mais non CS (0.3)			
Merchant 2016[72]	Enfants et adultes (n=250/245)	12	Urgence	Feedback sur utilisation du traitement d'urgence + surveillance par médecin	Prise en charge habituelle	Médecin	BCDA : - 14.9% jours sans utilisation SS et CS	ACT/c- ACT NS	NA	NA	NA
Zhou 2018[73]	Enfants 0-5 (n=30/35)	3	Fond	Alerte au médecin si nébulisation non faite qui contacte la famille	Prise en charge habituelle	Médecin	Obs : 67%/40% SS et CS	QS meilleur	Moins de corticothérapie orale SS et CS	NA	NA
Gupta 2021[74]	Enfants 4-17 (n=125/127)	12	Fond et urgence	Alerte si > 4 jours sans traitement de fond ou > 4 BCDA/jour	Prise en charge habituelle	NP	Obs : NA BCDA : NA	c- ACT/ACT +2,2 SS CS	Plus de corticothérapie orale, de passage aux urgences et d'hospitalisations SS et CS	NA	PACQL Q + 0,3 SS non CS

ACT : asthma control test ACQ : asthma control questionnaire ; BCDA : bronchodilatateur de courte durée d'action ; PACQLQ : pediatric asthma caregiver quality of life questionnaire ; CS : cliniquement significatif ; ; IDE : infirmier diplômé d'état ; NA : non évalué ; NP : non précisé ; NS : statistiquement non significatif ; Obs : Observance ; QS : questionnaire spécifique à l'étude ; SS : statistiquement significatif ; VEMS : volume expiré maximal en une seconde. Les études apparaissant sur fond gris représentent les études avec suivi en continu de l'utilisation des traitements, tandis que les études précédentes correspondent à une utilisation pendant les consultations des données collectées au domicile

**Applications
mobiles**



**Montres
connectées**

**Inhalateurs
connectés**



**Capteurs de
qualité de l'air**



**Débitmètres de pointe,
spiromètres connectés**



**Appareils de
mesure du NO**



