HAL open science

Conception et perception d'un changement de forme molle au dos d'une montre connectée

Zhuzhi Fan, Alexis Sanson, Thomas Rames, Céline Coutrix

To cite this version:

Zhuzhi Fan, Alexis Sanson, Thomas Rames, Céline Coutrix. Conception et perception d'un changement de forme molle au dos d'une montre connectée. 35e conférence Francophone sur l'Interaction Humain-Machine, Mar 2024, Paris, France. 10.1145/3649792.3649800 . hal-04451443

HAL Id: hal-04451443

https://hal.science/hal-04451443

Submitted on 11 Feb 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.

Conception et perception d'un changement de forme molle au dos d'une montre connectée
Design and Perception of a Soft Shape Change Beneath a Smartwatch

ZHUZHI FAN*, ALEXIS SANSON*, THOMAS RAMES, and CÉLINE COUTRIX, CNRS, Université Grenoble Alpes, Grenoble-INP, France

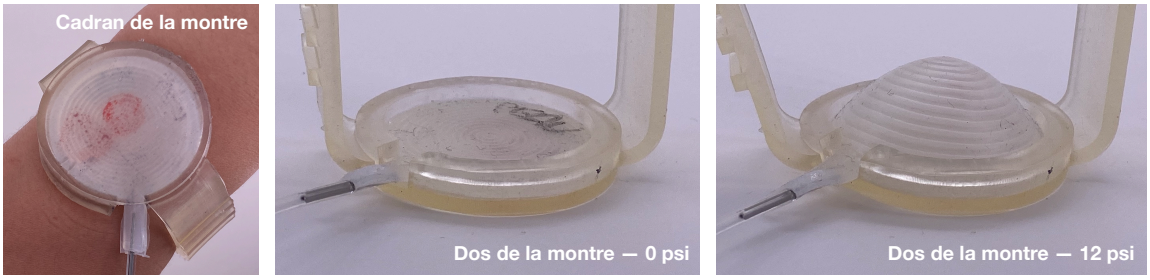


Fig. 1. Nous présentons un nouveau mécanisme de notifications haptiques pour les montres, grâce à la modification de la courbure de la surface molle à l'arrière.

Cet article étudie la conception d'une montre notifiant ses utilisateurs via le changement de courbure de la surface sous le cadran de la montre, qui entre en contact avec le poignet de l'utilisateur. Nous présentons nos choix de conception et les défis auxquels nous avons été confrontés lors de la fabrication de la montre. Nous étudions expérimentalement le seuil de détection absolu (ou Absolute Detection Threshold ADT) de cette nouvelle forme de notification. En particulier, nous comparons deux montres ayant des formes différentes lorsqu'elles sont gonflées à haute pression. Nous menons une procédure expérimentale en escalier adaptative (deux descentes puis une montée) et nous trouvons un ADT de 3,86 psi, c'est-à-dire la pression minimale nécessaire pour gonfler la surface afin d'être détectée par les participants. Nos résultats qualitatifs montrent que les participants ont apprécié ce nouveau type de retour d'information et qu'ils ont ressenti des sensations différentes pour chaque montre.

In this paper, we explore the design of a watch that can deliver notifications through shape changes, with a specific focus on changes in curvature at the back of the watch face. We explain our design choices and the challenges we faced while creating such a watch. We conducted an experimental study to determine the absolute detection threshold (ADT) of this novel form of feedback. We compared the ADT of two different watches, both of which have a back face that can change its curvature and make contact with the wearer's wrist to notify them. These two watches exhibit different shapes when inflated with high air pressure. To determine the ADT, we conducted a standard two-down, one-up adaptive staircase procedure. Our findings show that an ADT of 3.86 psi is required to inflate the back surface for detection by participants. Overall, our qualitative findings indicate that participants enjoyed this novel type of feedback and could feel different sensations with each watch.

CCS Concepts: • **Human-centered computing → Empirical studies in HCI**; **Haptic devices**; **Empirical studies in ubiquitous and mobile computing**; **Mobile devices**.

*Both authors contributed equally to this research.

This is the author's draft version of the work. It is posted here for your personal use. Not for distribution. The definitive version of the record is published in IHM '24: Proceedings of the 35th Conference on l'Interaction Humain-Machine.
© 2024

Additional Key Words and Phrases: Interaction humain-machine, Interaction tangible, Interfaces à changement de forme, Interfaces changeant de courbure, Interfaces portées, Interfaces souples, Actionnement pneumatique, montre connectée, notification, retour haptique.

Additional Key Words and Phrases: Tangible interaction, Shape-changing interfaces, Curvature-changing interfaces, Wearable interfaces, Soft interfaces, Pneumatic actuation, Smartwatch, Notification, Haptic feedback.

Reference:
Zhuzhi Fan, Alexis Sanson, Thomas Rames, and Céline Coutrix. 2024. Conception et perception d'un changement de forme molle au dos d'une montre connectée.

1 INTRODUCTION

Les interfaces changeant de forme physique et portées sur le corps rendent possible de nouvelles expériences haptiques et visuelles pour les utilisateurs (par exemple, [51]). En particulier, les notifications fournies par changement de forme sont moins souvent manquées par les utilisateurs que les vibrations [13]. Vu l'essor des interfaces portées molles et changeant de forme (par exemple, [27, 33, 36, 41, 73]) il est maintenant important d'étudier leurs opportunités pour l'un des emplacements les plus courant –le poignet [85]–, et l'une des utilisations les plus importantes –les notifications [1]. De plus, les utilisateurs préfèrent associer des modalités facilement perceptibles aux notifications importantes [60]. C'est pourquoi il est important de savoir dans quelle mesure ces nouvelles modalités sont perceptibles.

Parmi tous les types de changement de forme [53], le changement de courbure est l'un des plus courants [53]. La question de recherche que nous abordons dans cet article est de connaître **la courbure maximale optimale pour que les utilisateurs remarquent le plus possible la déformation d'une forme molle sur leur poignet**. Les travaux antérieurs ont étudié (1) la perceptibilité de nombreuses modalités sur le poignet, (2) les changements de forme sur le poignet, (3) la perceptibilité des changements de forme, et (4) la perception tactile des surfaces molles et incurvées. Aucun de ces travaux n'a étudié l'impact de la courbure sur la perceptibilité du changement de forme molle sur le poignet.

Pour répondre à notre question de recherche, un défi majeur réside dans l'isolation des paramètres [2]. En particulier, nous devons contrôler la courbure maximale, tout en maintenant la taille de la montre constante. Les prototypes pneumatiques précédents –basés sur de simples chambres à air– ne peuvent pas maintenir la taille de la montre constante tout en faisant varier la courbure maximale. Pour contrôler la courbure au dos de la montre, nous utilisons dans cet article une avancée récente en sciences des matériaux : les baromorphes [75]. Les baromorphes sont des surfaces en silicone intégrant des canaux d'air (Figure 1). La disposition des canaux définit la déformation de la surface lorsqu'elle est gonflée.

Cet article présente les contributions suivantes :

(1) La fabrication d'**une surface baromorphe portée au poignet** d'un diamètre de ∅42 mm et d'une épaisseur de 3 mm,
(2) La mesure de son **seuil de détection absolu (ou *absolute detection threshold* –ADT) sur la face postérieure du poignet à 3,86 psi** – c'est-à-dire avant que la surface ne commence à se courber,
(3) Des éléments qualitatifs pointant que **les participants ont apprécié ce nouveau type de retour d'information**,
(4) Des élements qualitatifs pointant que **les participants ont ressenti des sensations différentes pour chaque courbure maximale**.

2 TRAVAUX PRÉCÉDENTS

Nous positionnons notre travail (Figure 2) vis-à-vis des travaux sur (1) la perception de notifications au poignet, (2) les changements de forme au poignet, (3) la perception du changement de forme et notamment de la courbure, et (4) l'impact de la courbure et de la dureté sur l'expérience tactile.

2.1 Perception de notifications au poignet

Les notifications sont couramment utilisées par les montres connectées. La plupart des dispositifs portés au poignet, que ce soit en recherche ou dans l'industrie, fournissent un retour d'information vibrotactile, par exemple [14, 63]. À titre d'exemple, Graham-Knight et al. ont étudié l'utilisation des vibrations sur une montre connectée pour la communication non visuelle entre proches [32]. D'autres travaux ont démontré que le retour vibrotactile sur le poignet augmente la conscience du temps chez un orateur, facilite la coordination avec son président de séance, et réduit sa distraction [82].

Les notifications visuelles ont également été étudiées. Par exemple, Kao et al. ont étudié la perception des notifications visuelles sur le poignet en présence d'autres personnes [50]. Pohl et al. ont étudié l'illumination indirecte sur le poignet comme moyen de fournir des notifications aux utilisateurs [66]. Les retours d'information vibrotactile et visuel ont également été combinés. Par exemple, Schäfer et al. ont étudié les notifications visuelles (lumière), audio et haptiques (vibrations) sur le poignet pour notifier des questions et réactions pendant une présentation en ligne [71]. D'autres modalités ont été étudiées pour fournir des notifications aux utilisateurs sur leur poignet. Par exemple, Lee and Lee ont étudié le seuil de détection absolu d'un flux d'air sur le poignet [57].

Une pression plus forte sur la peau du poignet a été étudiée pour les notifications. Par exemple, HapticClench [33] utilise des alliages à mémoire de forme pour fournir une sensation de pression autour du bras, et InContact [77] compare les sensations de pincement, d'écrasement et de torsion au retour vibrotactile pour le toucher social médiatisé. Cependant, les deux approches fournissent un effet de cisaillement sur la peau, en plus du retour perpendiculaire à la peau que nous étudions ici. En outre, ces dispositifs n'utilisent pas la courbure pour le retour haptique comme nous le faisons.

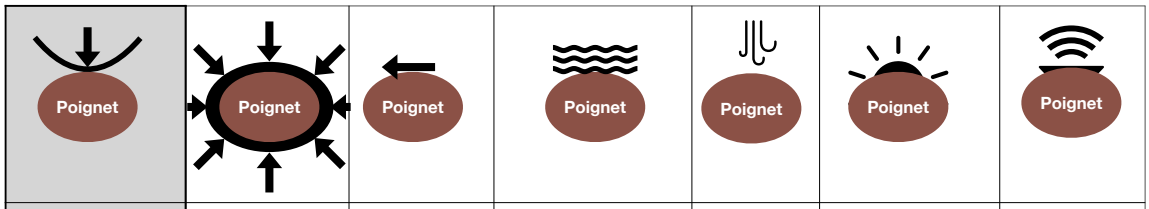
PneuHaptic [36] propose d'utiliser l'actionnement pneumatique indépendant de cinq chambres à air en silicone portées autour du bras. Dans une évaluation informelle, les auteurs montrent l'efficacité du système. Cependant, la courbure des chambres en silicone gonflées est fixée par leur taille, car la déformation est isotrope, c'est-à-dire la même dans toutes les directions (Figure 3). De plus, les chambres sont en contact permanent avec la peau de l'utilisateur. Au contraire, dans cet article, nous proposons d'étudier l'impact d'une déformation anisotrope[1] sur la peau de l'utilisateur, et nous proposons d'explorer l'impact de *deux courbures différentes* touchant la peau de façon *temporaire*, sur le seuil de détection absolu, pour une *même taille de montre*.

2.2 Changements de forme au poignet

Des travaux ont étudié le changement de forme au poignet. Par exemple, Doppio [73] explore l'espace de conception d'un écran modulaire pour les montres connectées. WristOrigami explore l'espace de conception d'une montre connectée multi-écrans pliable [86]. Au contraire, dans cet article, nous explorons un design plus organique et mou, offrant une continuité de surface, et nous étudions la perception de son changement de courbure.

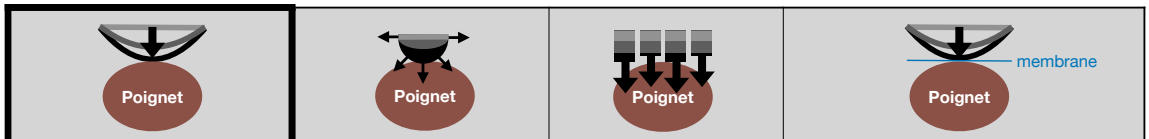
Cito [27] explore les mouvements du cadran de la montre, en particulier la rotation du cadran autour du poignet, sa sortie de la manche, sa rotation autour de son axe central, son inclinaison, et son élévation. Lorsqu'il est relevé, le

[1] La déformation est anisotrope lorsqu'elle n'est pas la même dans toutes les directions.



CET ARTICLE et ~[36, 41, 63]	compression [33, 36, 65]	cisaillement [33, 77]	vibrotactile [14, 32, 63, 71, 82]	flux d'air [57]	lumière [50, 66, 71]	audio [71]

Fig. 2. Positionnement de nos travaux par rapport aux travaux précédents sur le retour d'information au poignet : nous étudions le changement de courbure, alors que les travaux antérieurs ont exploré différents types de retour d'information.



CET ARTICLE	PneuHaptic [36]	RetroShape [41]	Haptic wristwatch [63]
Déformation anisotrope		×	×
Surface continue	×		×
Surface molle	×		×
Basse tension	×	×	
Forte amplitude	×	×	
Contact temporaire		×	

Fig. 3. Positionnement de notre dispositif par rapport aux dispositifs précédents qui changent de courbure au poignet : la chambre à air de PneuHaptic se déforme de façon homogène dans toutes les directions (déformation isotrope), ce qui fait que la courbure est liée au diamètre de la chambre. De plus, Les chambres sont en contact permanent avec le poignet de l'utilisateur [36]. RetroShape offre une faible résolution de courbure à cause de sa surface discrète de 4×4 éléments. De plus, ces éléments sont dur [41]. La montre haptique de Pasquero et al. repose sur une membrane qui est toujours en contact avec le poignet de l'utilisateur, nécessite une tension élevée (jusqu'à 160V par rapport à nos 12V) et offre une amplitude maximale limitée (quelques mm par rapport à la nôtre de 15mm) [63].

cadran peut fournir le même type de retour haptique que celui que nous étudions ici, mais le système ne permet pas de faire varier la courbure du cadran de la montre.

AmbienBeat [10] utilise des électro-aimants sur des membranes en silicone pour fournir aux utilisateurs un retour haptique grâce à la force de répulsion et d'attraction des électro-aimants. Les auteurs ont constaté que le retour haptique d'ambienBeat guide mieux les utilisateurs dans la régulation de leur rythme cardiaque, par rapport au guidage auditif et visuel. Cependant, ils n'ont pas exploré le retour d'information fourni par des surfaces de courbures différentes.

RetroShape [41] fournit un affichage en 2,5D de formes au dos d'une montre connectée. Les auteurs étudient l'impact de la résolution de l'affichage 2,5D sur l'illusion de présence d'objets virtuels. Le dispositif que nous proposons est, au contraire, mou et continu (Figure 3).

La montre haptique de Pasquero et al. [63] utilise un disque piézoélectrique sur la face arrière pour changer sa courbure et frapper une membrane en contact avec la peau de l'utilisateur. Cependant, le changement de courbure ne modifie pas la zone de contact sur la peau de l'utilisateur comme nous le faisons, et nécessite une tension plus élevée tout en offrant une amplitude de changement de forme plus faible (Figure 3).

2.3 Perception du changement de forme

Des travaux antérieurs ont étudié la perception du changement de forme. Par exemple, Lee et al. ont étudié la perception visuelle d'une plante qui change de forme [58]. Parmi de multiples autres types de changement de forme, les auteurs étudient le changement de courbure de la plante. Cependant, son seuil de détection visuelle absolu n'a pas été étudié. La courbure d'une surface plate a également été étudiée comme moyen de fournir des notifications visuelles dans l'environnement de l'utilisateur [48]. Les auteurs ont constaté qu'un tel retour d'information dans la périphérie proche de l'utilisateur était efficace et non distrayant. Toutefois, ces travaux étudient les notifications *visuelles* dans l'environnement de l'utilisateur, pas directement sur son corps.

Plus près du corps des utilisateurs, différents types de changements de forme ont été étudiés dans le cadre d'une étude vidéo sur les notifications [64]. En particulier, environ 82% des participants ont déclaré qu'ils seraient attentifs aux notifications basées sur la courbure. MorePhone [26] fournit des notifications en pliant le téléphone portable en entier, ou ses coins indépendamment. Les auteurs ont constaté que le fait de plier le téléphone entier correspondait plutôt aux notifications urgentes. Hoggan et al. ont étudié si les utilisateurs pouvaient distinguer à la surface d'un téléphone portable des textures changeantes [37] via les informations haptiques fournies par le changement de forme. Au contraire, cet article présente l'étude de la perceptibilité des changements de courbure sur le poignet. Dimitriadis and Alexander ont étudié si différents types de changements de forme de téléphone portables étaient perceptibles dans la poche avant du pantalon [13]. Cependant, il est difficile de généraliser leurs résultats à une autre partie du corps (poignet vs. cuisse) et à d'autres types de changement de forme.

Des travaux antérieurs ont étudié plus particulièrement les interfaces changeant de courbure (par exemple, [9, 25, 34, 68]). Par exemple, HapTag [9] fournit un retour haptique par la déformation d'une fine surface située sur la peau de l'utilisateur. Toutefois, ces travaux n'ont pas étudié l'impact de la courbure de la surface sur le seuil de perception. Pneumatibles [25] diminue la pression de l'air dans un bouton par étapes, à la manière de "crans". Les auteurs ont étudié la précision de la reconnaissance de différentes combinaisons entre nombres de crans et pression maximale initiale du bouton. Cependant, ils n'ont pas étudié le seuil de détection absolu des participants selon la courbure d'un dispositif porté au poignet.

2.4 Toucher, courbure and dureté

Le contact entre un système et un utilisateur peut se produire de manière active ou passive. Le toucher actif se produit lorsque les utilisateurs prennent l'initiative du toucher, par exemple lorsqu'ils touchent volontairement un écran de téléphone. Le toucher passif se produit lorsque les utilisateurs sont touchés, sans en contrôler le mouvement, par exemple comme pour les notifications haptiques.

Lorsqu'ils touchent activement, les utilisateurs peuvent distinguer avec leur index une surface plane d'une surface courbée –dont la hauteur est de 0,09 mm, de la base au sommet [30]. Fan and Coutrix ont ensuite étudié la différence minimale de perception de la courbure (*just noticeable difference*, JND) dans différentes conditions de dureté [17]. Ils n'ont cependant pas étudié le seuil de détection absolu au poignet pour du toucher passif. Hu and Hoffman ont étudié de petites bosses, arrondies ou pointues, sur la peau d'un robot pour le retour d'informations émotionnelles [38–40]. Cependant, ils n'ont pas cherché à les adapter pour une montre connectée, ni à connaitre leur seuil de détection absolu au poignet.

D'autres travaux sur le toucher actif ont étudié la perception lorsque les utilisateurs font glisser leur doigt sur la surface pour en explorer la courbure [67]. Cependant, le toucher actif n'implique pas les mêmes mécanismes de

perception que le toucher passif, comme lors de la réception d'une notification [17]. Lors d'un toucher passif, seuls des indices cutanés entrent en jeu, tandis que le toucher actif [24] implique des indices kinesthésiques [56]. Les indices kinesthésiques font référence à la sensation de position et de mouvement des membres, ainsi qu'aux forces associées, transmises par les récepteurs sensoriels de la peau autour des articulations, des tendons et des muscles [56, 79]. Les indices cutanés, quant à eux, font référence aux réponses des mécanorécepteurs [47] innervant la peau dans et autour de la zone de contact [56, 79].

Lorsque l'index des utilisateurs est touché (passivement), ils ont tendance à juger le stimuli légèrement moins courbé qu'il ne l'est en réalité lorsque la force de contact augmente (par exemple, de 0,196 N à 0,588 N) [28]. De plus, le seuil de discrimination diminue légèrement lorsque la surface de contact augmente [29]. Bien que la force et la surface de contact jouent un rôle dans la perception de la courbure, l'effet de la force de contact [28] et de la surface de contact [29] est beaucoup plus faible que l'effet de la courbure de la surface elle-même. Pour cette raison et par souci de simplicité, nous présentons cet article autour de la *courbure* de la surface, bien que nous soyons conscients que la surface de contact et la force qui en résultent jouent également un rôle.

Toucher activement des objets *mous*, comme le toucher passif, implique des informations cutanées. Selon la théorie du contact de Hertz [46], la surface de contact de la peau avec une autre surface molle augmente au fur et à mesure que la peau s'enfonce dans la surface molle. Plus la surface est molle, plus la surface de contact augmente rapidement. Sur la base de cette théorie, Bicchi et al. ont développé le dispositif CASR (*Contact Area Spread Rate*) [5, 72] pour fournir aux participants des informations cutanées par le biais de la zone de contact entre le doigt et le dispositif. Le dispositif peut faire varier sa zone de contact avec la pulpe du doigt du participant, via un ensemble de cylindres concentriques télescopiques durs. Lorsque le doigt appuie sur la partie supérieure du dispositif, il enfonce le premier cylindre, et entre en contact avec le cylindre suivant, plus grand, ce qui élargit la zone de contact. Bicchi et al. ont fait varier la vitesse d'agrandissement de la zone de contact en fonction de la dureté d'une surface simulée : plus la surface est molle, plus la zone de contact augmente rapidement lorsque le doigt appuie dessus. Ils ont constaté qu'avec les informations cutanées fournies par le CASR, les participants avaient un taux de réussite similaire pour la reconnaissance de la dureté par rapport aux objets réels : 75% en moyenne avec le CASR contre 87% en moyenne en explorant les objets réels. Cette expérience montre le rôle important des informations cutanées, en particulier celui de la zone de contact, dans la perception de la dureté. Dans cet article, au contraire, nos utilisateurs sont touchés passivement par une surface molle. En fonction de sa courbure, nous nous attendons à ce que la zone de contact varie. Nous nous attendons donc à ce que les informations cutanées jouent un rôle majeur dans la détection des notifications.

En définitive, aucun des travaux précédents n'a étudié le seuil de détection absolu au dos d'une montre connectée, dont la surface molle peut changer de courbure. De plus, les travaux les plus proches utilisent des technologies confondant courbure maximale et taille [36], avec une faible résolution de courbure [41], ou avec une courbure maximale limitée [63].

3 CONCEPTION

Pour concevoir notre montre, nous avons considéré son changement de forme, dont sa temporalité et son emplacement.

Changement de forme. Parmi les nombreuses possibilités de changement de forme, telles que la porosité, la modularité ou la taille [53, 69], nous avons choisi de nous concentrer d'abord sur la courbure (Figure 4), car il s'agit de l'un des changements de forme les plus couramment étudiés dans la littérature. Afin de limiter les variables expérimentales pour cette première expérience, nous avons choisi la même courbure tout autour de la surface (symétrie de rotation).

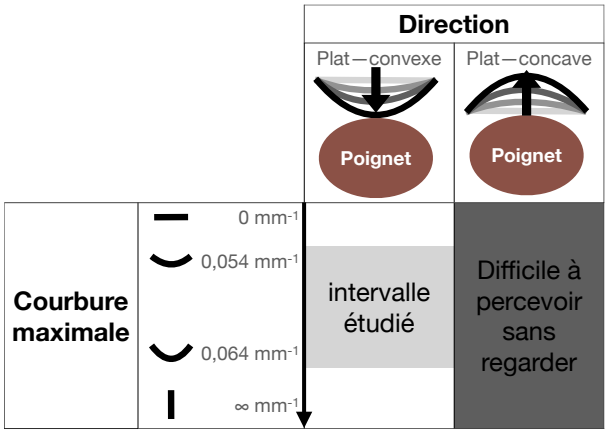


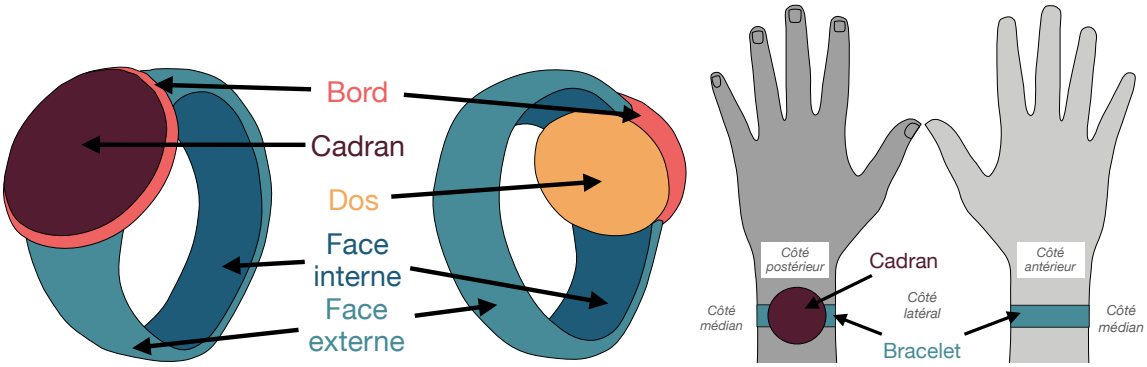
Fig. 4. Espace de conception de la courbure maximale.

Nous avons envisagé des courbures concaves et convexes (Figure 4). Dans une étude pilote, nous avons trouvé que les surfaces allant de plates à concaves –c'est-à-dire s'éloignant du poignet, comme le montre la figure 4– étaient à peine perceptibles si l'on ne regardait pas son poignet. C'est pourquoi nous ne considérons ici que les déformations de surfaces plates à convexes –c'est-à-dire allant vers le poignet. Nous avons ensuite envisagé des courbures maximales allant d'arrondies à pointues. Nous n'avons pas envisagé des courbures maximales extrêmement pointues pour des raisons de sécurité, car même une faible pression sur la peau peut blesser si la zone de contact est extrêmement petite [43]. Comme le montre la figure 4, le prototype le plus pointu que nous avons pu fabriquer offre une courbure maximale de 0,064 mm^{-1}. Nous avons ensuite fabriqué un prototype intermédiaire, moins pointu mais qui puisse tout de même toucher, lorsqu'il est gonflé, la peau de l'utilisateurice, d'une courbure maximale de 0,054 mm^{-1}.

Temporalité du changement de forme. Les paramètres cinétiques du changement de forme, tels que sa vitesse, sa trajectoire et sa direction [69], ouvrent un vaste espace de conception pour les notifications. La temporalité est souvent étudiée pour d'autres mécanismes de notification tels que les vibrations, par exemple [32]. Dans cet article, nous commençons par étudier un modèle simple : la surface passe linéairement d'une surface plane à une surface courbe, reste constamment courbe pendant un temps défini, puis revient linéairement à une surface plane à la même vitesse qu'auparavant.

Emplacement du changement de forme. Nous avons envisagé les emplacements tout autour de la montre (Figure 5). L'extérieur de la montre –le cadran et la partie externe du bracelet dans la Figure 5(a)– permet un retour d'information visuel, tandis que l'intérieur de la montre –le dos de la montre et la partie interne du bracelet dans la Figure 5(a)– permet un retour haptique au contact de la peau. Nous avons également envisagé les différents côtés du poignet (Figure 5(b)) : les côtés postérieur, médian, antérieur et latéral du poignet.

Comme des travaux précédents ont déjà étudié le retour visuel fourni par le changement de courbure près de l'utilisateur [48], nous avons choisi dans cet article de nous concentrer sur le retour haptique fourni par le changement de courbure, c'est-à-dire l'intérieur de la montre. La face postérieure de l'avant-bras étant la plus sensible [16], nous avons choisi de commencer par le dos de la montre (en jaune sur la Figure 5(a)), plutôt que par les autres côtés du poignet.



(a) Zones possibles sur la montre pour le changement de forme.

(b) Côtés du poignet gauche touchés par la montre.

Fig. 5. Emplacements considérés pour le changement de forme, sur la montre et sur le poignet.

Pour fabriquer une surface molle et ronde qui change de courbure au dos de la montre, nous utilisons de récentes avancées en sciences des matériaux [75], à savoir des surfaces en silicone intégrant des canaux d'air, appelés baromorphes (Figure 1). La disposition des canaux définit la déformation de la surface lorsqu'elle est gonflée. Chaque arrangement de canaux définit la courbure locale du matériau lorsqu'il est gonflé à une même pression interne. Dans cet article, nous commençons par nous concentrer sur les arrangements de canaux invariants en rotation (Figure 6), ce qui nous permet d'explorer différentes courbures maximales au centre de la surface (ainsi que les différentes zones de contact et les différentes forces qui en résultent). Ce matériau est le seul que nous ayons trouvé qui permette la déformation anisotrope d'une surface molle continue, avec une amplitude de changement de forme de >1cm, et via une faible tension (12V) (Figure 3).

4 FABRICATION

Nous sommes les premiers à fabriquer des surfaces baromorphes aussi petites. La fabrication de petits prototypes est un grand défi dans la recherche sur le changement de forme et une étape essentielle pour exploiter les résultats de la science des matériaux en vue de la réalisation d'interfaces portées sur le corps [2]. Nous avons été confrontés aux trois défis suivants lors de la fabrication de notre surface de ⌀42 mm de diamètre et de 3 mm d'épaisseur en suivant les instructions de Siéfert et al. pour des surfaces plus épaisses [76].

Impression 3D d'un moule de petite taille à haute résolution. Pour contrôler avec précision la forme d'un baromorphe de 42 mm de diamètre et de 3 mm d'épaisseur, le défi consiste à obtenir une grande densité de canaux d'air dans un volume limité. Lors de l'utilisation d'une imprimante 3D en stéréolithographie (SLA) (Form3 [19]), nous avons été confrontés à un problème de précision d'impression et à un problème de nettoyage. La précision de l'imprimante et la résine utilisée ont été critiques pour obtenir des canaux d'air fins. Lors du nettoyage avec de l'alcool isopropylique [20] dans la FormWash [18] après l'impression, le moule se déforme légèrement. À cette échelle, de tels défauts de fabrication entraînent une déformation indésirable relativement importante lorsqu'on gonfle la surface. Pour résoudre ces problèmes, nous avons systématiquement imprimé des moules avec des canaux d'air de 0,1 mm à 1 mm de large, avec les résines noires, blanches et transparentes [21]. Nous avons remarqué que la résine transparente était la plus efficace. Nous avons également remarqué que le fait de changer l'alcool isopropylique dans la FormWash plus souvent que ne l'exige le

fabricant, prévenait la formation de résidus à la surface du moule. Les plus petits canaux d'air dont le moule était d'une qualité suffisante pour obtenir la déformation voulue avaient une largeur de 0,4 mm.

Élimination des bulles d'air piégées dans le silicone non polymérisé. La structure interne de notre baromorphe étant très fine, même une petite bulle d'air à l'intérieur du baromorphe entraîne une forte déformation locale autour de la bulle et donc une forme indésirable lors du gonflage. Pour résoudre ce problème, nous éliminons soigneusement tout l'air emprisonné dans le mélange de silicone après avoir versé le silicone dans le moule. Pour ce faire, nous retirons l'air dans le mélange en le mettant sous vide pendant 3 minutes et nous utilisons une aiguille pour faire remonter à la surface les bulles restées emprisonnées dans le moule.

Collage du couvercle sur les canaux. Pour terminer la fabrication du baromorphe, nous démoulons les canaux, et nous étalons une membrane de silicone de 0,4 mm d'épaisseur pour fabriquer leur couvercle. Lors du collage d'une membrane aussi fine sur des canaux aussi fins et peu profonds, le risque est d'obstruer les canaux de 0,6 mm de haut. Si les canaux d'air sont obstrués par la colle, ou ne sont pas parfaitement collés au couvercle, une déformation indésirable relativement importante apparait lorsqu'on gonfle la surface. Pour résoudre ce problème, nous utilisons la colle Sil-Poxy [78] au lieu du silicone [75]. La viscosité plus élevée de la colle permet un contrôle plus précis de son épaisseur. Nous utilisons un applicateur de film de haute précision [7] pour contrôler précisément l'épaisseur de la colle [78] à 0,3 mm, ce qui est suffisamment épais pour coller solidement les canaux au couvercle, mais suffisamment fin pour éviter l'obstruction des canaux.

Nous avons testé différents silicones : Shore 00-10, Shore 00-50, Shore A-10, Shore A-20 et Shore A-30. Nous avons choisi un silicone Shore A-10 [42], car il offre un compromis entre une grande capacité de changement de forme, et un durcissement et une fabrication rapides.

Nous avons imprimé en 3D le cadran et le bracelet de la montre avec de la résine flexible [21] avec la même imprimante [19].

Pour contrôler le changement de forme au dos de la montre, nous avons développé un script python qui contrôle trois pompes [31]. Nous avons accordé une attention particulière dans le logiciel aux paramètres du contrôleur proportionnel-intégral-dérivé (PID), afin d'éviter la sensation de picotement que nous avons remarquée lors des premiers essais. Nous partageons, dans les fichiers additionnels de cet article, toutes les ressources nécessaires à la fabrication de notre prototype, y compris les modèles 3D et les scripts python avec les paramètres du contrôleur PID. Nous partagerons également un tutoriel avec tous les détails nécessaires pour permettre la reproduction de ces petits baromorphes.

5 SEUIL DE DÉTECTION ABSOLU

Le seuil de détection absolu (*absolute detection threshold* ou ADT) est une première mesure psychophysique fondamentale [23] qui définit le seuil à partir duquel les utilisateurs peuvent remarquer le retour d'information au dos de la montre. Plutôt que de mesurer la sensibilité humaine, l'objectif de notre expérience est de déterminer une valeur de pression de référence pour que le système envoie une notification. Cette mesure est nécessaire pour concevoir de futures montres connectées avec une surface molle et changeant de courbure au dos. Nous avons mené cette étude en laboratoire, sans distraction, afin d'identifier la valeur de référence *minimale* pour les notifications. Déterminer d'abord l'ADT sans distraction est une procédure standard, par exemple [4, 33, 65]. Pour assurer de l'intégrité de nos résultats [22], nous avons enregistré notre plan d'expérience et d'analyse avant de collecter les données[2].

[2]https://osf.io/cqv7f/?view_only=3f9b0f47a67b40268e7204286bd9a458

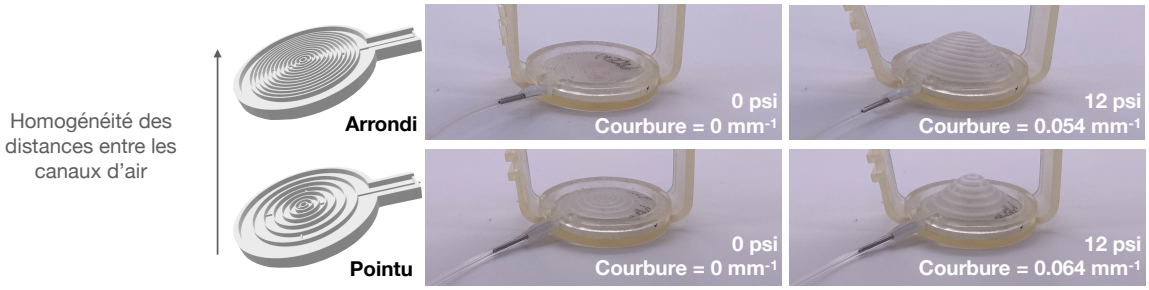


Fig. 6. Conception des moules pour les surfaces que nous comparons, et montre correspondante présentée à l'envers, montrant la forme intérieure à différentes pressions.

5.1 Plan expérimental

Nous avons mené une expérience croisée, c'est-à-dire où les participants ont pris part au différentes conditions (mesures répétées), pour déterminer le seuil absolu à partir duquel les utilisateurs remarquent le retour haptique fourni par la montre. Les participants ont fait l'expérience de deux modèles différents de changement de forme (Figure 6).

Variables indépendantes. Nous faisons varier l'*homogénéité des distances* entre les canaux d'air comme le montre la Figure 6 afin de comparer les deux COURBURES MAXIMALES suivantes :

R: La surface plate–arrondie présente des canaux d'air denses et régulièrement espacés (Figure 6, en haut). Avec un baromorphe d'un diamètre de 42 mm, la surface a une courbure au sommet à 12 psi de 0,054 mm^{-1}, soit un rayon de courbure de 18,52 mm (Annexe A).

P: La surface plate–pointue présente des canaux d'air éloignés les uns des autres à la périphérie et des canaux d'air proches les uns des autres au centre (Figure 6, en bas). Avec un baromorphe d'un diamètre de 42 mm, la surface a une courbure au sommet à 12 psi de 0,064 mm^{-1}, soit un rayon de courbure de 15,53 mm (Annexe A).

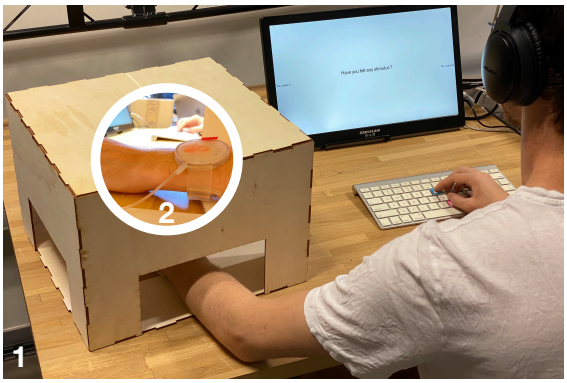
Nous avons mesuré expérimentalement la courbure de nos prototypes dans l'intervalle de 1 à 13 psi (procédure détaillée en Annexe A). Dans l'intervalle de 1 à 10 psi, les courbures sont très similaires. Dans l'intervalle entre 10 et 13 psi, le centre de la surface P est plus courbé que le centre de la surface R.

La moitié des participants ont commencé l'expérience avec R et l'autre moitié avec P.

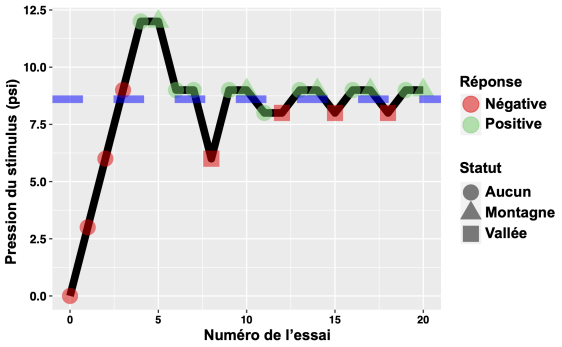
Variables mesurées. Nous recueillons les réponses des participants, c'est-à-dire s'ils remarquent un stimulus à chaque essai. Nous recueillons également leurs réponses à un questionnaire AttrakDiff [35] pour chaque COURBURE MAXIMALE, leur classement des COURBURES MAXIMALES en termes de préférence et de facilité subjective de détection, et leurs retours qualitatifs via des entretiens semi-structurés. Nous avons choisi de ne pas collecter de données physiques, comme la pression sur la peau ou le déplacement de la peau qui en résulte, car notre objectif est de concevoir un dispositif utilisable (Interaction Humain-Machine) plutôt que de comprendre les mécanismes biologiques (psychophysique).

5.2 Dispositif expérimental

Les participants portent le bracelet illustré dans les figures 1, 6 et 7(a). Nous fabriquons le prototype comme expliqué en partie 4. Le cadran de la montre est plein pour garantir une déformation du baromorphe vers le poignet des participants. L'expérimentateur s'assure que le bracelet est bien fermé avec du ruban adhésif. Nous contrôlons l'ajustement du bracelet en mesurant le tour de poignet des participants (C en cm), et en ajustant la longueur du bracelet (L en cm) à



(a) (1) Vue d'ensemble du dispositif expérimental et (2) gros plan de la main non dominante portant la montre à l'intérieur de la boîte.



(b) Exemple de procédure en escalier avec la troisième série d'escaliers pour P9 avec la surface plate–pointue (P). La ligne pointillée bleue montre le seuil de détection absolu calculé pour cette série.

(c) Déroulement de l'expérience.

Fig. 7. Plan et procédure de l'expérience.

cette mesure en suivant $L = 0,8 \times C + 5,8$. Pour trouver ce modèle, nous avons réalisé une expérience pilote avec 5 participants (R^2 ajusté = 0,93), où nous nous sommes assurés que le bracelet était aussi serré que possible tout en étant confortable à porter.

Nous avons développé un logiciel en Python pour mener l'expérience. Nous fournissons les éléments nécessaires à la reproduction de notre expérience dans les fichiers additionnels de cet article.

5.3 Participants

Nous avons recruté 12 participants (6 femmes et 6 hommes) sur notre campus. Ce chiffre est le plus courant en IHM [8] et nous permet de tester les deux ordres de présentation des deux COURBURES MAXIMALES. Les participants étaient âgés de 21 à 40 ans (médiane = 27). Quatre d'entre eux possèdent une montre connectée, à retour vibrotactile, qu'ils portent régulièrement ou au quotidien. Tous les participants ont une sensibilité normale de tous les côtés du poignet, sauf P7, dont la sensibilité sur la face antérieure du poignet (Figure 5(b)) est légèrement altérée.

5.4 Procédure expérimentale

Les participants s'assoient et reposent leur avant-bras sur une table (Figure 7(a)). Nous mesurons d'abord la sensibilité des participants en utilisant un test monofilament de Semmes-Weinstein [44] sur les côtés postérieur, antérieur, latéral et médian du poignet (Figure 5(b)).

L'expérimentateur installe la surface avec la première COURBURE MAXIMALE au dos de la montre. Pour se concentrer sur la sensation haptique et éviter tout retour visuel, les participants cachent leur avant-bras dans une boîte comme dans

[33, 87]. L'expérimentateur installe la montre à l'intérieur de la boîte, autour du poignet non dominant des participants, comme dans [33, 65, 87] (Figure 7(a)). Même si le côté dominant est plus sensible que le côté non dominant au niveau de l'avant-bras médio-postérieur [16], tester le retour d'information du côté non dominant est plus écologique : la plupart des utilisateurs portent leur montre sur le poignet non dominant [84]. De plus, pour éviter tout impact du bruit des pompes, les participants portent des écouteurs diffusant du bruit brownien.

Comme ce type de retour d'information est nouveau pour les participants, l'expérimentateur demande aux participants de tester le prototype au début de chaque bloc (un pour chaque COURBURE MAXIMALE, Figure 7(c)). Pour ce faire, l'expérimentateur présente dans un ordre pseudo-aléatoire soit aucun stimulus (0 psi), soit un stimulus fort (10 psi). L'entrainement s'arrête une fois que les participants ont correctement reconnu successivement deux stimuli nuls et deux stimuli forts[3]. Nous suivons ensuite une procédure standard d'escalier à deux descentes et une montée [59]. Dans chaque série d'escaliers, le premier essai commence avec le baromorphe à 0 psi (Figure 7(b)). Nous maintenons la pression souhaitée pendant 1 s comme dans [57, 87]. Nous ne considérons pas les temps plus longs tels que 2s [33] ou 5s [65] car notre étude pilote a montré que les utilisateurs remarquent davantage les changements de courbure et s'habituent à une courbure stable. Nous diminuons ensuite la pression à 0 psi, avant que les participants n'indiquent s'ils ont ressenti un stimulus ou non, en appuyant sur la touche correspondante du clavier (Figure 7(a)). Il s'agit de la procédure standard pour les expériences de seuil de détection absolu sans distraction [33, 57, 65, 87].

Comme le montre la figure 7(b), si les participants n'ont ressenti aucun stimulus, nous augmentons la pression cible du prochain essai d'un pas constant de 3 psi. Si les participants ont ressenti le stimulus, nous gardons la même pression cible pour le prochain essai. Si les participants ressentent un stimulus deux fois de suite, la pression cible de l'essai suivant est réduite du même pas constant.

Les pas d'augmentation/diminution sont égaux et constants avant chaque inversion[4] [59]. Entre la troisième et la quatrième inversion, nous diminuons la valeur du pas à 1 psi pour améliorer la précision de notre mesure du seuil [33, 87]. La série d'escaliers se termine après neuf inversions [33]. Nous calculons ensuite le seuil comme la moyenne des cinq dernières inversions [33].

Les participants font une pause après chaque série d'escaliers (Figure 7(c)). Nous répétons chaque série d'escaliers trois fois pour chaque COURBURE MAXIMALE pour améliorer encore la précision. Ainsi, nous collectons 2 COURBURES MAXIMALES × 3 répétitions × 12 participants = 72 mesures du seuil.

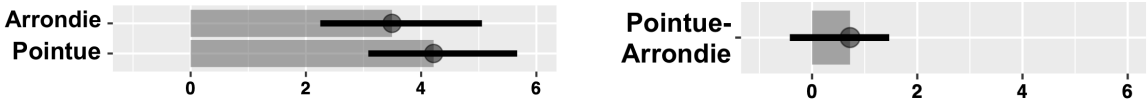
À la fin de chaque bloc, les participants remplissent un questionnaire AttrakDiff [35]. À la fin de l'expérience, ils classent les prototypes en termes de préférence et de facilité de détection. Nous menons ensuite un entretien semi-directif pour recueillir les commentaires qualitatifs des participants. Les sujets prévus dans cet entretien sont l'emplacement et la description des sensations, les différences entre les conditions, ainsi que leurs stratégies pour répondre à la question de perception. L'expérience dure environ 60 minutes pour chaque participant.

5.5 Analyse des données récoltées

D'après les réponses des participants, nous calculons le seuil de détection absolu en faisant la moyenne des cinq dernières inversions –comme dans, par exemple, [33, 65, 87]. Nous présentons ici les seuils calculés en psi. Ces seuils peuvent être convertis en bar ou en kPa comme dans [87] et en mm^{-1} (Annexe A). Nous utilisons des techniques d'estimation basées sur des moyennes géométriques. Les chiffres entre parenthèses montrent des intervalles de confiance (IC) bootstrappés

[3]La plupart des participants ont réussi l'entrainement lors des 4 premiers essais avec à la fois 2 stimuli nuls et 2 stimuli forts. Seuls 3 participants ont eu besoin d'un peu plus d'essais pour s'entraîner avec la surface pointue, c'est-à-dire 5 essais pour P5 et P11 et 7 essais pour P10.

[4]Une inversion est un changement de direction, c'est-à-dire un extremum local représenté sous la forme d'un triangle (montagne) ou d'un carré (vallée) dans la figure 7(a).



(a) Seuil de détection absolu (en psi) pour les surfaces R et P.

(b) Différence par paire des seuils de détection absolus (en psi).

Fig. 8. Analyse des seuils absolus de détection. Les barres d'erreur indiquent des intervalles de confiance bootstrappés à 95%.

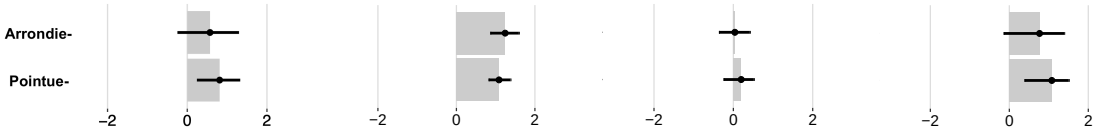
à 95%, comme recommandé par Dragicevic [15]. Nous utilisons des différences par paires pour montrer les tailles d'effet. Ces méthodes sont recommandées par l'APA [3] et largement adoptées en IHM (par exemple, [11, 12, 17, 45, 52, 55, 61]). Plutôt que l'inférence dichotomique réalisée avec des valeurs p, nous avons opté pour cette analyse plus nuancée de la direction et de l'ampleur de l'effet. Une lecture des résultats présentés dans cet article équivalente aux valeurs p peut être effectuée en comparant l'espacement des IC avec l'espacement de valeur p commun, comme le montre la figure 3 dans [54]. Une différence par paire est une mesure intra-individu, exprime la taille de l'effet, et est calculée entre chacune des moyennes géométriques. Nous avons réalisé une analyse thématique [70] des transcriptions des entretiens.

5.6 Résultats

5.6.1 Seuil de détection absolu. La figure 8 présente le seuil de détection absolu. La figure 8(a) montre que la surface plate–arrondie (R) a un seuil de détection absolu moyen de 3,49 psi [2,25, 5,07], et que la surface plate–pointue (P) a un seuil de détection absolu moyen de 4,22 psi [3.11, 5.65]. Bien que la surface P ait un seuil de détection absolu légèrement plus élevé (M = +0,72 [-0,44, 1,46]) que la surface R (Figure 8(b)), la différence est très faible et l'intervalle de confiance à 95% dépasse 0, ce qui signifie que la différence réelle pourrait même être un peu inverse. En effet, nous constatons qu'aucune différence de courbure n'est visible au centre des surfaces R et P à des pressions aussi basses (< 10 psi, Figure 10(c) en annexe A). En définitive, la COURBURE MAXIMALE de la surface a très peu ou pas d'impact *sur le seuil de détection absolu.* De plus, cette modalité de notification a un faible seuil de détection absolu (M = 3,86 psi [2,96, 4,91]).

5.6.2 Qualités pragmatiques et hédoniques. La figure 9 présente les résultats du questionnaire AttrakDiff [35]. Une interface notée comme neutre se situe dans l'intervalle [-1, 1], tandis que [-3, 1] ou [1, 3] désigne respectivement des notes plutôt négatives ou positives. La figure 9(a) montre que les participants ont perçu les deux montres plutôt neutres en termes d'utilisabilité et de facilité d'utilisation (P M=0,81 [0,24, 1,33], R M=0,57 [-0,25, 1,30]). Cela peut s'expliquer par le fait que les niveaux de stimulus étaient très faibles car nous cherchions à mesurer le seuil de détection absolu. La figure 9(b) montre que les participants ont trouvé que les deux montres avaient des qualités de stimulation plutôt positives (P M=1,09 [0,82, 1,38], R M=1,24 [0,86, 1,59]). La figure 9(c) montre que les participants ont jugé neutre la capacité des deux montres à prendre en charge une fonction sociale et à communiquer l'identité des utilisateurs (P M=0,20 [-0,25, 0,52], R M=0,1 [-0,36, 0,42]). La figure 9(d) montre que les participants ont trouvé la surface P légèrement attrayante (M=1,08 [0,38, 1,51]), alors qu'ils ont trouvé la surface R légèrement plus neutre (M=0,77 [-0,14, 1,39]).

5.6.3 Classement. Nous n'avons trouvé aucune différence dans le classement de préférences entre les surfaces R et P. Nous expliquons cela par les très faibles niveaux de stimuli ressentis par les participants pour la recherche du seuil de détection absolu. Parmi les 12 participants, la moitié ont préféré la surface R, tandis que l'autre moitié préférait la surface P. Sept participants pensent que la déformation de la surface R était plus facile à percevoir, tandis que les 5 autres participants ont trouvé le contraire. Comme P10 a mentionné qu'il préférait P parce que c'était la première fois



(a) Qualités pragmatiques (b) Qualités hédoniques (stimulation) (c) Qualités hédoniques (identité) (d) Attractivité globale

Fig. 9. Scores AttrakDiff. Les barres d'erreur indiquent des intervalles de confiance bootstrappés à 95%.

qu'il expérimentait ce stimulus nouveau et agréable, nous avons exploré si l'ordre de présentation de chaque surface avait eu un impact sur le classement, et n'avons trouvé aucun impact.

5.6.4 Retours qualitatifs. Nous avons identifié les quatre thèmes principaux suivants lors des entretiens. Nous avons explicitement abordé certains thèmes lors de l'entretien (par ex. emplacement et description des sensations), mais le thème du plaisir a émergé de l'analyse.

Plaisir. Cinq participants ont explicitement mentionné que la sensation était agréable. Par exemple, P9 a dit que c'était « très doux, délicat », P10 a dit que c'était « apaisant » et « sympa », et P12 a dit que c'était « attrayant ». P10 a déclaré : « il y a [...] une [grosse] part d'émotion qui joue ». Des travaux antérieurs ont étudié la relation entre le changement de forme et les émotions [64, 81, 83]. Cependant, ces travaux s'appuient sur des stimuli visuels et non haptiques comme dans cet article. Bien que des travaux supplémentaires soient nécessaires pour mesurer quantitativement l'impact positif de ce prototype sur les utilisateurs, ces retours qualitatifs positifs de nos participants montrent que cette nouvelle modalité de notification peut être complémentaire à celles existantes. En effet, en comparaison avec leurs smartphones –ils ne possédaient pas de montre connectée– P2 et P8 ont mentionné que ce nouveau type de feedback était plus agréable que le feedback vibrotactile (P2) ou sonore (P8).

Emplacement des sensations. Comme attendu, tous les participants (sauf P9) ont mentionné des sensations du côté postérieur du poignet. P1 a explicitement mentionné qu'elle sentait « sur le dessus, pour les grosses pressions », c'est-à-dire que la sensation principale se trouvait sur le côté postérieur du poignet lorsque le stimulus était supérieur au seuil. Le deuxième emplacement le plus mentionné était les côtés latéral et médian du poignet. Les participants pouvaient déjà ressentir la très faible force de stimulus sur les côtés du poignet. Comme le dit P4 : « Sur les côtés, j'ai moins senti ». Les participants mentionnent moins la face antérieure du poignet, et pour la même sensation que les côtés latéral et médian. Comme notre expérience étudiait des stimuli très subtils, P12 a même mentionné qu'il pouvait ressentir ces stimuli à l'endroit de la connexion par câble. Cela montre que les utilisateurs sont très sensibles à cette nouvelle modalité de notification. Ceci est prometteur pour nos futures expériences explorant le seuil de détection absolu pendant que les utilisateurs seront distraits par une autre tâche, où ils ressentiront par exemple des sensations haptiques supplémentaires, comme lorsqu'ils font du vélo.

Description des sensations. Nous avons trouvé 21 sous-thèmes décrivant les sensations des participants : masser, appuyer, piquer, aspirer, picoter, toucher, vibrer, bouger, serrer, souffler, respirer, pouls, vagues, courbure, gonfler, étaler, dégonfler, enlever, poils, et peau.

Le thème le plus abordé lors des entretiens était le gonflement (9 participants). Cinq participants ont déclaré qu'ils pouvaient ressentir le gonflement plus clairement (P4-8) que le dégonflement, tandis qu'un seul a trouvé le dégonflement plus facile à détecter (P2).

Les thèmes les deuxièmes plus discutés étaient le toucher (P2-5, P9-11), l'appui (P4, P6-7, P9, P11-12), et la vibration (P3, P4, P8, P10, P12). Les participants ont décrit une sensation de pression locale : « ça appuyait à un point » (P7). Les participants ont également ressenti la propagation de la pression : « j'avais vraiment l'impression que ça s'écrasait et que ça s'étalait... sur ma peau » (P11) et « ça touche à un coin et puis que ça s'étale » (P2).

P3-4-8 ont mentionné que la vibration était très subtile. P3, par exemple, a dit : « là je suis vraiment dans un environnement contrôlé mais je pense que si je fais des gestes de tous les jours, je vais peut-être pas m'apercevoir de la vibration ». Comme nous avons testé des niveaux de stimuli très faibles pour les besoins de notre expérience, les participants ont ressenti la vibration du système avant le changement de forme.

Différences ressenties entre les surfaces pointues (P) et arrondies (R). Comme attendu grâce à notre mesure de l'ADT, P1-2, P4-6, P8 et P12 ont mentionné que les surfaces R et P étaient similaires lors de cette expérience de seuil de détection absolu, par ex. : « j'avais l'impression que c'était les deux mêmes » (P1).

Pourtant, P2-5, P7 et P11-12 ont pu identifier différentes sensations : « ce n'était pas la même sensation » (P11). P2 a dit, par exemple, que « [R] doit être plus arrondi, enfin... plus plat », et « avec [P] t'avais l'impression que ça touche ». P4 a dit que « [R avait] une surface plus grande, l'autre, c'était plus petit. Ça faisait un peu plus... pas aiguille, mais *tac* ». P1 et P5 ont également évoqué une différence dans l'emplacement de leur sensation : tous deux sentaient R plutôt sur les côtés latéral et médian, et P au centre du côté postérieur du poignet.

P1-4 et P10 ont expliqué lors des entretiens pourquoi ils préféraient P : « C'était plus facile de savoir si je l'avais senti » (P1), « [J'ai trouvé R] moins détectable, et, du coup, vu qu'il est moins détectable, c'est celle que je préfère le moins » (P2), « J'ai eu plus de sensations avec le [P] » (P3), et « quand [les stimuli] étaient clairs, j'ai l'impression que c'était un peu plus clair en [P] » (P4). Ceci explique les qualités pragmatiques (Figure 9(a)) et l'attractivité globale (Figure 9(d)).

6 DISCUSSION

Variance entre participants. Nous avons constaté des différences entre nos participants. Même si nous nous sommes assurés que tous les participants avaient une sensibilité normale sur la face postérieure de leur poignet, nous n'avons pas mesuré leur seuil de sensibilité avec un test monofilament de Semmes-Weinstein plus précis [44]. Nous pensons que les variations du seuil de sensibilité des participants pourraient avoir un impact sur l'ADT de notre prototype. Lors des entretiens, deux hommes (P2 et P11) ont mentionné que leur sensation provenait des poils : tous deux pouvaient ressentir le mouvement avant même le contact avec la peau car la surface attirait leurs poils ou les faisait bouger. Pour ces raisons, nous pensons qu'une expérience plus écologique de cette nouvelle modalité de notification devra inclure une calibration initiale afin d'adapter le stimulus à la sensibilité individuelle.

Ajustement du bracelet. Nous avons contrôlé l'ajustement du bracelet (voir section 5.2) afin de comparer les résultats entre participants et entre blocs. Cependant, dans des situations plus écologiques, les utilisateurs ajustent différemment le bracelet de leur montre : certains aiment l'avoir bien ajusté à leur poignet, tandis que d'autres préfèrent le porter plus large. Les futurs travaux sur cette modalité de notification pourront explorer l'impact de l'ajustement du bracelet sur le seuil de détection absolu. Pour cette raison aussi, des expériences plus écologiques de cette nouvelle modalité

devront inclure une calibration initiale afin de l'adapter aux préférences de chacun, comme c'est déjà le cas avec le retour vibrotactile sur les montres connectées actuelles.

Effet mémoire. Lors des entretiens, trois participants ont évoqué un possible effet mémoire. P1 et P11 ont mentionné qu'ils ne savaient pas si la sensation qu'ils ressentaient provenait du stimulus actuel ou de celui d'avant. Au contraire, P4 a mentionné qu'il était difficile de se souvenir de la sensation. Nous n'avons pas pu explorer l'existence d'un effet mémoire lors de notre expérience. Les travaux futurs devraient mesurer si un effet existe afin de pouvoir le compenser lors de la conception de notification avec cette nouvelle modalité.

ADT et vibrations. Le câble qui sort de la montre la relie à trois pompes et ne touche pas la peau des participants (Figure 7(a)-2). Le seuil de détection minimal sans distraction est si bas qu'il n'implique pas (encore) le changement de forme. Néanmoins nous pensons qu'il ne remet pas en cause l'ADT mesuré, car nous avons minimisé les vibrations en supprimant le contact avec le câble et les pompes (placées sur une autre table). En effet, nos prototypes présentent des canaux d'air longs et fins (par exemple pour le prototype arrondi, 664 mm de longueur et 0.4 mm de largeur). L'inflation radiale des canaux peut induire des vibrations dans les canaux eux-mêmes en raison de la turbulence du flux d'air [6, 62]. Ces vibrations font donc partie intégrante de la modalité haptique présentée. Ces vibrations sont perceptibles par nos participants, et proviennent du dessous de notre prototype, au contraire de celles issues d'un tuyau ou d'un moteur.

Comparaison. Afin de mieux connaitre cette nouvelle modalité, nous avons choisi dans cette étude de comparer deux alternatives de courbure pour cette même modalité. En revanche, nous n'avons pas comparé cette nouvelle modalité à une autre existante, telles que celles présentées aux figures 2 et 3. Positionner cette nouvelle modalité par rapport à l'état de l'art sera nécessaire lors de travaux futurs.

Mobilité. Bien que nous ayons étudié cette nouvelle modalité dans le cas d'une montre connectée, le prototype actuel n'est pas encore mobile. Bien que la technologie ne soit pas encore prête aujourd'hui pour permettre ce type de retour d'information sur les montres actuelles, nous pensons qu'il est important d'étudier aujourd'hui ses opportunités pour l'interaction avec les utilisateurices en parallèle des avancées technologiques comme la miniaturisation des pompes.

7 CONCLUSION

Les matériaux souples offrent des opportunités sans précédent pour la conception d'interfaces portées, notamment pour les notifications au poignet. Dans cet article, nous proposons d'utiliser une solution molle, et changeant de courbure, pour notifier les utilisateurs au dos de leur montre connectée : les surfaces baromorphes [75] nous permettent de contrôler la courbure maximale, tout en gardant les autres paramètres constants, par ex. la taille de la montre. Nous sommes les premiers à avoir fabriqué une surface baromorphe aussi petite que 42 mm de diamètre et d'une épaisseur de 3 mm pour permettre son port au poignet. Nous avons présenté une expérience standard, en escalier adaptative à deux descentes et une montée. Nous avons trouvé le seuil de détection absolu (ADT) à 3,86 psi, c'est-à-dire la pression minimale nécessaire pour que la notification de la montre puisse être détectée par les utilisateurs. Nos résultats qualitatifs montrent que les participants ont apprécié cette nouvelle modalité de retour d'information, et que les participants ont pu ressentir des sensations différentes avec chaque montre.

Cet article ouvre la voie à d'autres études pour approfondir nos connaissances sur cette nouvelle modalité. *Du côté de la perception*, maintenant que nous connaissons le stimulus minimal détectable, les travaux futurs devront mesurer l'ADT des utilisateurs lorsqu'ils se concentrent sur une autre tâche, telle que marcher ou faire du vélo, ou une tâche

exigeante cognitivement [33]. Les travaux futurs pourront également mesurer la différence minimale de perception des utilisateurs entre deux courbures.

Les travaux précédents ont révélé que les utilisateurs aimaient disposer de modalités persistantes pour les notifications [60]. Le changement de forme pourrait fournir une telle modalité. Pour cela, les travaux futurs devront explorer comment les utilisateurs perçoivent le changement de forme sur un temps long.

Du côté de la conception, les travaux futurs pourront proposer cette modalité au niveau du bracelet ou même ailleurs sur le corps, où la sensibilité n'est pas la même [16, 74], et proposer d'autres changements de forme [53]. Nous prévoyons d'organiser un atelier de conception pour étudier systématiquement les notifications par changement de forme molle.

Du côté implémentation, comme pour les travaux précédents (par exemple, [36, 41, 63]), un aspect critique pour une future adoption est la taille du matériel : les travaux futurs devront notamment proposer la miniaturisation des pompes. De plus, des pompes plus puissantes lorsqu'elles seront miniaturisées permettront une déformation plus rapide.

ACKNOWLEDGEMENTS

Nous remercions Benoît Roman, le Fablab MASTIC, le CNRS (80 Prime MeMorI), l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-21-CE33-0018) et l'Université Grenoble Alpes.

REFERENCES

[1] Neil Aitken. 2023. Most Used Features of Smartwatches. https://whatphone.com.au/guide/most-used-features-of-smartwatches/ Last retrieved: 2023-06-15.

[2] Jason Alexander, Anne Roudaut, Jürgen Steimle, Kasper Hornbæk, Miguel Bruns Alonso, Sean Follmer, and Timothy Merritt. 2018. Grand Challenges in Shape-Changing Interface Research. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Montreal QC, Canada) *(CHI '18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–14. https://doi.org/10.1145/3173574.3173873

[3] American Psychological Association et al. 2019. *Publication Manual of the American Psychological Association, (2020)*. American Psychological Association.

[4] Olivier Bau, Ivan Poupyrev, Ali Israr, and Chris Harrison. 2010. TeslaTouch: Electrovibration for Touch Surfaces. In *Proceedings of the 23nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (New York, New York, USA) *(UIST '10)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 283–292. https://doi.org/10.1145/1866029.1866074

[5] A. Bicchi, E.P. Scilingo, and D. De Rossi. 2000. Haptic discrimination of softness in teleoperation: the role of the contact area spread rate. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 16, 5 (2000), 496–504. https://doi.org/10.1109/70.880800

[6] W N Bond. 1931. Turbulent flow through tubes. *Proceedings of the Physical Society* 43, 1 (jan 1931), 46. https://doi.org/10.1088/0959-5309/43/1/306

[7] BYK. 2023. Film Casting Knife. https://www.byk-instruments.com/en/Physical-Properties/Paint-Application/Manual-Film-Applicators/Film-Casting-Knife/c/p-5974?variant=2328 Last retrieved July 26, 2023.

[8] Kelly Caine. 2016. Local Standards for Sample Size at CHI. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (San Jose, California, USA) *(CHI '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 981–992. https://doi.org/10.1145/2858036.2858498

[9] Yanjun Chen, Xuewei Liang, Si Chen, Yuwen Chen, Hongnan Lin, Hechuan Zhang, Chutian Jiang, Feng Tian, Yu Zhang, Shanshan Yao, and Teng Han. 2022. HapTag: A Compact Actuator for Rendering Push-Button Tactility on Soft Surfaces. In *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (Bend, OR, USA) *(UIST '22)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 70, 11 pages. https://doi.org/10.1145/3526113.3545644

[10] Kyung Yun Choi and Hiroshi Ishii. 2020. AmbienBeat: Wrist-Worn Mobile Tactile Biofeedback for Heart Rate Rhythmic Regulation. In *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction* (Sydney NSW, Australia) *(TEI '20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 17–30. https://doi.org/10.1145/3374920.3374938

[11] Kurtis Danyluk, Bernhard Jenny, and Wesley Willett. 2019. Look-From Camera Control for 3D Terrain Maps. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Glasgow, Scotland Uk) *(CHI '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–12. https://doi.org/10.1145/3290605.3300594

[12] Ruta Desai, Fraser Anderson, Justin Matejka, Stelian Coros, James McCann, George Fitzmaurice, and Tovi Grossman. 2019. Geppetto: Enabling Semantic Design of Expressive Robot Behaviors. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Glasgow, Scotland Uk) *(CHI '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–14. https://doi.org/10.1145/3290605.3300599

[13] Panteleimon Dimitriadis and Jason Alexander. 2014. Evaluating the Effectiveness of Physical Shape-Change for in-Pocket Mobile Device Notifications. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Toronto, Ontario, Canada) *(CHI '14)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2589–2592. https://doi.org/10.1145/2556288.2557164

[14] Taylor Dixon. 2019. Good Vibrations: How Apple Dominates the Touch Feedback Game. https://www.ifixit.com/News/16768/apple-taptic-engine-haptic-feedback Last retrieved July 13, 2023.

[15] Pierre Dragicevic. 2016. Fair Statistical Communication in HCI. In *Modern Statistical Methods for HCI*. Springer, 291 – 330. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26633-6_13

[16] Cem Erçalık and Seçil Özkurt. 2022. Two-point discrimination assessment of the upper extremities of healthy young Turkish individuals. *Turkish journal of physical medicine and rehabilitation* 68 (March 2022), 136–141. Issue 1. https://doi.org/10.5606/tftrd.2022.6263

[17] Zhuzhi Fan and Céline Coutrix. 2023. Impact of Softness on Users' Perception of Curvature for Future Soft Curvature-Changing UIs. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Hamburg, Germany) *(CHI '23)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 747, 19 pages. https://doi.org/10.1145/3544548.3581179

[18] FormLabs. 2023. Form Wash. https://formlabs.com/post-processing/wash-cure/ Last retrieved July 25, 2023.

[19] FormLabs. 2023. Form3 high precision Stereolithography (SLA) 3D printer. https://formlabs.com/3d-printers/form-3/ Last retrieved July 25, 2023.

[20] FormLabs. 2023. Isopropyl Alcohol. https://support.formlabs.com/s/article/Isopropyl-Alcohol-IPA?language=en_US Last retrieved July 25, 2023.

[21] FormLabs. 2023. Materials. https://formlabs.com/material-selector/ Last retrieved July 25, 2023.

[22] Wolfgang Forstmeier, Eric-Jan Wagenmakers, and Timothy H. Parker. 2017. Detecting and avoiding likely false-positive findings – a practical guide. *Biological Reviews* 92 (November 2017), 1941–1968. Issue 4. https://doi.org/10.1111/brv.12315

[23] George A Gescheider. 2016. *Psychophysics: the fundamentals* (third ed.). Routledge, Milton Park, Abingdon-on-Thames, Oxfordshire, England, UK. 46–54,183–186 pages. https://www.routledge.com/Psychophysics-The-Fundamentals/Gescheider/p/book/9781138984158

[24] James J Gibson. 1962. Observations on active touch. *Psychological review* 69, 6 (1962), 477.

[25] Kristian Gohlke, Eva Hornecker, and Wolfgang Sattler. 2016. Pneumatibles: Exploring Soft Robotic Actuators for the Design of User Interfaces with Pneumotactile Feedback. In *Proceedings of the TEI '16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction* (Eindhoven, Netherlands) *(TEI '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 308–315. https://doi.org/10.1145/2839462.2839489

[26] Antonio Gomes, Andrea Nesbitt, and Roel Vertegaal. 2013. MorePhone: A Study of Actuated Shape Deformations for Flexible Thin-Film Smartphone Notifications. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Paris, France) *(CHI '13)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 583–592. https://doi.org/10.1145/2470654.2470737

[27] Jun Gong, Lan Li, Daniel Vogel, and Xing-Dong Yang. 2017. Cito: An Actuated Smartwatch for Extended Interactions. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Denver, Colorado, USA) *(CHI '17)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 5331–5345. https://doi.org/10.1145/3025453.3025568

[28] AW Goodwin, KT John, and AH Marceglia. 1991. Tactile discrimination of curvature by humans using only cutaneous information from the fingerpads. *Experimental brain research* 86, 3 (1991), 663–672. https://doi.org/10.1007/BF00230540

[29] AW Goodwin and HE Wheat. 1992. Human tactile discrimination of curvature when contact area with the skin remains constant. *Experimental brain research* 88, 2 (1992), 447–450. https://doi.org/10.1007/BF02259120

[30] Ian E Gordon and Victoria Morison. 1982. The haptic perception of curvature. *Perception & psychophysics* 31, 5 (1982), 446–450. https://doi.org/10.3758/BF03204854

[31] Goso. 2023. Peristaltic Pump. https://www.amazon.fr/dp/B079GRP174/ref=pe_3044141_189395771_TE_3p_dp_1 Last retrieved July 29, 2023.

[32] John Brandon Graham-Knight, Jon Michael Robert Corbett, Patricia Lasserre, Hai-Ning Liang, and Khalad Hasan. 2021. Exploring Haptic Feedback for Common Message Notification Between Intimate Couples with Smartwatches. In *Proceedings of the 32nd Australian Conference on Human-Computer Interaction* (Sydney, NSW, Australia) *(OzCHI '20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 245–252. https://doi.org/10.1145/3441000.3441012

[33] Aakar Gupta, Antony Albert Raj Irudayaraj, and Ravin Balakrishnan. 2017. HapticClench: Investigating Squeeze Sensations Using Memory Alloys. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (Québec City, QC, Canada) *(UIST '17)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 109–117. https://doi.org/10.1145/3126594.3126598

[34] Chris Harrison and Scott E. Hudson. 2009. Providing Dynamically Changeable Physical Buttons on a Visual Display. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Boston, MA, USA) *(CHI '09)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 299–308. https://doi.org/10.1145/1518701.1518749

[35] Marc Hassenzahl. 2005. *The Thing and I: Understanding the Relationship between User and Product*. Kluwer Academic Publishers, USA, 31–42.

[36] Liang He, Cheng Xu, Ding Xu, and Ryan Brill. 2015. PneuHaptic: Delivering Haptic Cues with a Pneumatic Armband. In *Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers* (Osaka, Japan) *(ISWC '15)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 47–48. https://doi.org/10.1145/2802083.2802091

[37] Eve Hoggan, Yi-Ta Hsieh, Kalle Myllymaa, Vuokko Lantz, Johan Kildal, Julian Eiler, and Giulio Jacucci. 2017. An Exploration of Mobile Shape-Changing Textures. In *Proceedings of the Eleventh International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction* (Yokohama, Japan) *(TEI '17)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 275–282. https://doi.org/10.1145/3024969.3024983

[38] Yuhan Hu and Guy Hoffman. 2020. Using Skin Texture Change to Design Emotion Expression in Social Robots. In *Proceedings of the 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction* (Daegu, Republic of Korea) *(HRI '19)*. IEEE Press, 2–10.

[39] Yuhan Hu and Guy Hoffman. 2023. What Can a Robot's Skin Be? Designing Texture-Changing Skin for Human–Robot Social Interaction. *J. Hum.-Robot Interact.* 12, 2, Article 26 (apr 2023), 19 pages. https://doi.org/10.1145/3532772

[40] Yuhan Hu, Isabel Neto, Jin Ryu, Ali Shtarbanov, Hugo Nicolau, Ana Paiva, and Guy Hoffman. 2022. Touchibo: Multimodal Texture-Changing Robotic Platform for Shared Human Experiences. In *Adjunct Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (Bend, OR, USA) *(UIST '22 Adjunct)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 68, 3 pages. https://doi.org/10.1145/3526114.3558643

[41] Da-Yuan Huang, Ruizhen Guo, Jun Gong, Jingxian Wang, John Graham, De-Nian Yang, and Xing-Dong Yang. 2017. RetroShape: Leveraging Rear-Surface Shape Displays for 2.5D Interaction on Smartwatches. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (Québec City, QC, Canada) *(UIST '17)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 539–551. https://doi.org/10.1145/3126594.3126610

[42] Smooth On Inc. [n.d.]. https://www.smooth-on.com/products/dragon-skin-10-nv/ Last retrieved July 24, 2023.

[43] ISO/DIS 10218-1 2018. *Robotics — Safety requirements for robot systems in an industrial environment — Part 1: Robots*. Standard. International Organization for Standardization, Geneva, CH.

[44] Jamar. 2023. Semmes-Weinstein monofilmanent sensory tests. https://www.performancehealth.com/jamar-monofilaments Last retrieved July 29, 2023.

[45] Yvonne Jansen, Jonas Schjerlund, and Kasper Hornbæk. 2019. Effects of Locomotion and Visual Overview on Spatial Memory When Interacting with Wall Displays. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Glasgow, Scotland Uk) *(CHI '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–12. https://doi.org/10.1145/3290605.3300521

[46] K. L. Johnson. 1985. *Normal contact of elastic solids – Hertz theory*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 84–106. https://doi.org/10.1017/CBO9781139171731.005

[47] Kenneth O Johnson. 2001. The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors. *Current Opinion in Neurobiology* 11, 4 (2001), 455–461. https://doi.org/10.1016/S0959-4388(00)00234-8

[48] Lee Jones, John McClelland, Phonesavanh Thongsouksanoumane, and Audrey Girouard. 2017. Ambient Notifications with Shape Changing Circuits in Peripheral Locations. In *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces* (Brighton, United Kingdom) *(ISS '17)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 405–408. https://doi.org/10.1145/3132272.3132291

[49] Kenichi Kanatani and Prasanna Rangarajan. 2011. Hyper least squares fitting of circles and ellipses. *Computational Statistics & Data Analysis* 55, 6 (2011), 2197–2208. https://doi.org/10.1016/j.csda.2010.12.012

[50] Cindy Hsin-Liu (Cindy) Kao, Min-Wei Hung, Ximeng Zhang, Po-Chun Huang, and Chuang-Wen You. 2021. Probing User Perceptions of On-Skin Notification Displays. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.* 4, CSCW3, Article 244 (jan 2021), 20 pages. https://doi.org/10.1145/3432943

[51] Pavel Karpashevich, Pedro Sanches, Rachael Garrett, Yoav Luft, Kelsey Cotton, Vasiliki Tsaknaki, and Kristina Höök. 2022. Touching Our Breathing through Shape-Change: Monster, Organic Other, or Twisted Mirror. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 29, 3, Article 22 (feb 2022), 40 pages. https://doi.org/10.1145/3490498

[52] Elio Keddisseh, Marcos Serrano, and Emmanuel Dubois. 2021. *KeyTch: Combining the Keyboard with a Touchscreen for Rapid Command Selection on Toolbars*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. https://doi.org/10.1145/3411764.3445288

[53] Hyunyoung Kim, Celine Coutrix, and Anne Roudaut. 2018. Morphees+: Studying Everyday Reconfigurable Objects for the Design and Taxonomy of Reconfigurable UIs. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Montreal QC, Canada) *(CHI '18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–14. https://doi.org/10.1145/3173574.3174193

[54] Martin Krzywinski and Naomi Altman. 2013. Error bars: The meaning of error bars is often misinterpreted, as is the statistical significance of their overlap. *Nature Methods* 10 (2013), 921 – 922. Issue 10. https://doi.org/10.1038/nmeth.2659

[55] Caitlin Kuhlman, Diana Doherty, Malika Nurbekova, Goutham Deva, Zarni Phyo, Paul-Henry Schoenhagen, MaryAnn VanValkenburg, Elke Rundensteiner, and Lane Harrison. 2019. Evaluating Preference Collection Methods for Interactive Ranking Analytics. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Glasgow, Scotland Uk) *(CHI '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–11. https://doi.org/10.1145/3290605.3300742

[56] Susan J Lederman and Roberta L Klatzky. 2009. Haptic perception: A tutorial. *Attention, Perception, & Psychophysics* 71, 7 (2009), 1439–1459. https://doi.org/10.3758/APP.71.7.1439

[57] Jaeyeon Lee and Geehyuk Lee. 2016. Designing a Non-Contact Wearable Tactile Display Using Airflows. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology* (Tokyo, Japan) *(UIST '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 183–194. https://doi.org/10.1145/2984511.2984583

[58] Jarrett G.W. Lee, Bongshin Lee, and Eun Kyoung Choe. 2023. Decorative, Evocative, and Uncanny: Reactions on Ambient-to-Disruptive Health Notifications via Plant-Mimicking Shape-Changing Interfaces. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Hamburg, Germany) *(CHI '23)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 320, 16 pages. https://doi.org/10.1145/3544548.3581486

[59] H. Levitt. 2005. Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America* 49, 2B (08 2005), 467–477. https://doi.org/10.1121/1.1912375 arXiv:https://pubs.aip.org/asa/jasa/article-pdf/49/2B/467/12184369/467_1_online.pdf

[60] Afra Mashhadi, Akhil Mathur, and Fahim Kawsar. 2014. The Myth of Subtle Notifications. In *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication* (Seattle, Washington) *(UbiComp '14 Adjunct)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 111–114. https://doi.org/10.1145/2638728.2638759

[61] Pranathi Mylavarapu, Adil Yalcin, Xan Gregg, and Niklas Elmqvist. 2019. Ranked-List Visualization: A Graphical Perception Study. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Glasgow, Scotland Uk) *(CHI '19)*. Association for Computing Machinery, New

York, NY, USA, 1–12. https://doi.org/10.1145/3290605.3300422

[62] R. Neelamegam and V. Shankar. 2015. Experimental study of the instability of laminar flow in a tube with deformable walls. *Physics of Fluids* 27, 2 (02 2015), 024102. https://doi.org/10.1063/1.4907246 arXiv:https://pubs.aip.org/aip/pof/article-pdf/doi/10.1063/1.4907246/14843752/024102_1_online.pdf

[63] Jerome Pasquero, Scott J. Stobbe, and Noel Stonehouse. 2011. A Haptic Wristwatch for Eyes-Free Interactions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Vancouver, BC, Canada) *(CHI '11)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 3257–3266. https://doi.org/10.1145/1978942.1979425

[64] Esben W. Pedersen, Sriram Subramanian, and Kasper Hornbæk. 2014. Is My Phone Alive? A Large-Scale Study of Shape Change in Handheld Devices Using Videos. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Toronto, Ontario, Canada) *(CHI '14)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2579–2588. https://doi.org/10.1145/2556288.2557018

[65] Henning Pohl, Peter Brandes, Hung Ngo Quang, and Michael Rohs. 2017. Squeezeback: Pneumatic Compression for Notifications. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Denver, Colorado, USA) *(CHI '17)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 5318–5330. https://doi.org/10.1145/3025453.3025526

[66] Henning Pohl, Justyna Medrek, and Michael Rohs. 2016. ScatterWatch: Subtle Notifications via Indirect Illumination Scattered in the Skin. In *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services* (Florence, Italy) *(MobileHCI '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 7–16. https://doi.org/10.1145/2935334.2935351

[67] Sylvia C Pont, Astrid ML Kappers, and Jan J Koenderink. 1999. Similar mechanisms underlie curvature comparison by static and dynamic touch. *Perception & Psychophysics* 61, 5 (1999), 874–894. https://doi.org/10.3758/BF03206903

[68] Michael Raitor, Julie M. Walker, Allison M. Okamura, and Heather Culbertson. 2017. WRAP: Wearable, restricted-aperture pneumatics for haptic guidance. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 427–432. https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989055

[69] Majken K. Rasmussen, Esben W. Pedersen, Marianne G. Petersen, and Kasper Hornbæk. 2012. Shape-Changing Interfaces: A Review of the Design Space and Open Research Questions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Austin, Texas, USA) *(CHI '12)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 735–744. https://doi.org/10.1145/2207676.2207781

[70] Sage (Ed.). 2022. *Thematic analysis: A practical guide.*

[71] René Schäfer, Tobias Wagner, Ulyana Lavnikevich, and Jan Borchers. 2023. Enhancing Notification Awareness for Online Presenters via a Wrist-Worn Device. In *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Hamburg, Germany) *(CHI EA '23)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 103, 6 pages. https://doi.org/10.1145/3544549.3585855

[72] Enzo Pasquale Scilingo, Matteo Bianchi, Giorgio Grioli, and Antonio Bicchi. 2010. Rendering Softness: Integration of Kinesthetic and Cutaneous Information in a Haptic Device. *IEEE Transactions on Haptics* 3, 2 (2010), 109–118. https://doi.org/10.1109/TOH.2010.2

[73] Teddy Seyed, Xing-Dong Yang, and Daniel Vogel. 2016. Doppio: A Reconfigurable Dual-Face Smartwatch for Tangible Interaction. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (San Jose, California, USA) *(CHI '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 4675–4686. https://doi.org/10.1145/2858036.2858256

[74] Kannathu Shibin and Asir Samuel. 2013. The Discrimination of Two-point Touch Sense for the Upper Extremity in Indian Adults. *International Journal of Health and Rehabilitation Sciences* 2 (01 2013), 38–43.

[75] Emmanuel Siéfert, Etienne Reyssat, José Bico, and Benoît Roman. 2019. Bio-inspired pneumatic shape-morphing elastomers. *Nature materials* 18, 1 (2019), 24–28. https://doi.org/10.1038/s41563-018-0219-x

[76] Emmanuel Siefert and Benoit Roman. 2019. https://vimeo.com/420256797 Last retrieved July 13, 2023.

[77] Melanie F. Simons, Alice C. Haynes, Yan Gao, Yihua Zhu, and Jonathan Rossiter. 2020. In Contact: Pinching, Squeezing and Twisting for Mediated Social Touch. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Honolulu, HI, USA) *(CHI EA '20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–9. https://doi.org/10.1145/3334480.3382798

[78] Smooth-on. 2023. Sil Poxy Glue. https://www.smooth-on.com/products/sil-poxy/ Last retrieved July 25, 2023.

[79] M. A. Srinivasan and R. H. LaMotte. 1995. Tactual discrimination of softness. *Journal of Neurophysiology* 73, 1 (1995), 88–101. https://doi.org/10.1152/jn.1995.73.1.88 arXiv:https://doi.org/10.1152/jn.1995.73.1.88 PMID: 7714593.

[80] Andrew A. Stanley, James C. Gwilliam, and Allison M. Okamura. 2013. Haptic jamming: A deformable geometry, variable stiffness tactile display using pneumatics and particle jamming. In *2013 World Haptics Conference (WHC)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Daejeon, Korea (South), 25–30. https://doi.org/10.1109/WHC.2013.6548379

[81] Paul Strohmeier, Juan Pablo Carrascal, Bernard Cheng, Margaret Meban, and Roel Vertegaal. 2016. An Evaluation of Shape Changes for Conveying Emotions. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (San Jose, California, USA) *(CHI '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 3781–3792. https://doi.org/10.1145/2858036.2858537

[82] Diane Tam, Karon E. MacLean, Joanna McGrenere, and Katherine J. Kuchenbecker. 2013. The Design and Field Observation of a Haptic Notification System for Timing Awareness during Oral Presentations. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Paris, France) *(CHI '13)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1689–1698. https://doi.org/10.1145/2470654.2466223

[83] Haodan Tan, John Tiab, Selma Šabanović, and Kasper Hornbæk. 2016. Happy Moves, Sad Grooves: Using Theories of Biological Motion and Affect to Design Shape-Changing Interfaces. In *Proceedings of the 2016 ACM Conference on Designing Interactive Systems* (Brisbane, QLD, Australia) *(DIS '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1282–1293. https://doi.org/10.1145/2901790.2901845

[84] Hui-Shyong Yeo, Juyoung Lee, Hyung-il Kim, Aakar Gupta, Andrea Bianchi, Daniel Vogel, Hideki Koike, Woontack Woo, and Aaron Quigley. 2019. WRIST: Watch-Ring Interaction and Sensing Technique for Wrist Gestures and Macro-Micro Pointing. In *Proceedings of the 21st International*

Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (Taipei, Taiwan) *(MobileHCI '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 19, 15 pages. https://doi.org/10.1145/3338286.3340130

[85] Clint Zeagler. 2017. Where to Wear It: Functional, Technical, and Social Considerations in on-Body Location for Wearable Technology 20 Years of Designing for Wearability. In *Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers* (Maui, Hawaii) *(ISWC '17)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 150–157. https://doi.org/10.1145/3123021.3123042

[86] Kening Zhu, Morten Fjeld, and Ayça Ünlüer. 2018. WristOrigami: Exploring Foldable Design for Multi-Display Smartwatch. In *Proceedings of the 2018 Designing Interactive Systems Conference* (Hong Kong, China) *(DIS '18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1207–1218. https://doi.org/10.1145/3196709.3196713

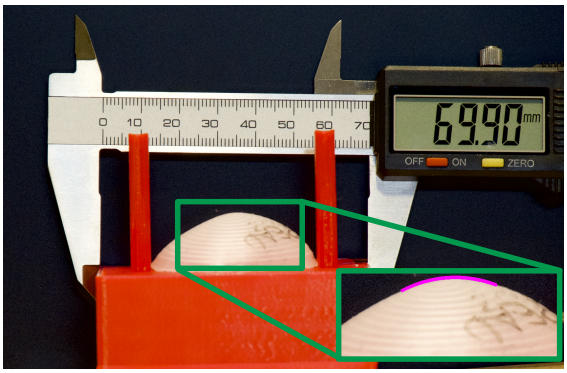
[87] Mengjia Zhu, Amirhossein H. Memar, Aakar Gupta, Majed Samad, Priyanshu Agarwal, Yon Visell, Sean J. Keller, and Nicholas Colonnese. 2020. PneuSleeve: In-Fabric Multimodal Actuation and Sensing in a Soft, Compact, and Expressive Haptic Sleeve. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Honolulu, HI, USA) *(CHI '20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–12. https://doi.org/10.1145/3313831.3376333

A MESURES DE LA COURBURE

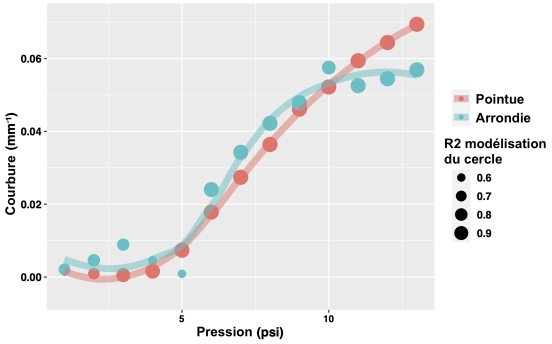
Nous avons vérifié la courbure de nos prototypes comme dans [80]. Nous avons d'abord pris des photos de nos prototypes (Figure 10(a)) avec un appareil Panasonic Lumix G Hybrid équipé d'un objectif LUMIX G VARIO 14-140 (Focale f=135 mm, résolution 1096× 2160). Les images ont été calibrées pour supprimer la distorsion de l'objectif avec OpenCV 4.6.0[5]. Pour garantir la précision des mesures, nous avons pris trois photos de chaque prototype à chaque pression, en les regonflant de 0 psi à la pression cible à chaque fois.

Nous avons ensuite détecté le contour de la surface incurvée de chaque stimulus avec OpenCV. Nous avons modélisé un cercle sur ce contour (Figure 10(a)) à l'aide du package python circle-fit 0.1.3 [49], pour calculer sa courbure (encart vert de la figure 10(a)). Nous avons calculé uniquement la courbure de la partie centrale (15 mm), où le prototype entre en contact avec la peau des participants. Le recadrage d'images <15 mm conduit à un échec de modélisation du cercle en raison d'un nombre insuffisant de pixels et du bruit. Pour convertir la courbure des pixels (px) aux mm, comme indiqué sur l'ordonnée de la figure 10(b), nous avons fixé une échelle physique sur le support imprimé en 3D (Figure 10(a)). Nous avons mesuré que 69,9 mm sur l'échelle physique équivaut à 1213 px sur les images. Nous convertissons donc nos mesures de courbure à 0,058 mm/px. La figure 10(b) présente en ordonnée nos mesures de la courbure moyenne de chaque prototype à chaque pression. Sur la figure 10(c), nous pouvons voir que lorsque la pression est faible (c'est-à-dire, pour R <6 psi et pour P < 5 psi), nos prototypes changent à peine de forme et restent presque plats. Ceci est cohérent avec le R^2 faible quand la pression est basse : la modélisation du cercle illustré dans la figure 10(b) donne de mauvais résultats. Les valeurs exactes de la Figure 10(b) et le code pour calculer la courbure sont disponibles dans les fichiers additionnels de cet article.

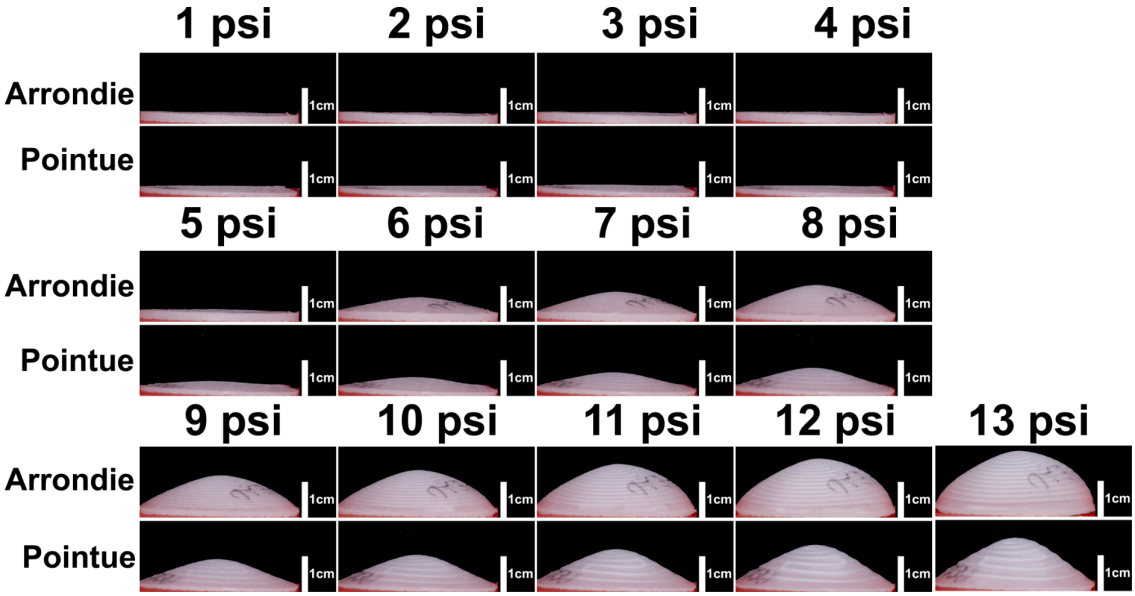
[5]https://docs.opencv.org/4.X/



(a) Installation pour la mesure de courbure. L'arc calculé est affiché en violet.



(b) Mesures de courbure de chaque prototype gonflé à différentes pressions.



(c) Prototypes gonflé à différentes pressions.

Fig. 10. Installation et résultats des mesures de courbure.