HAL
open science

Un histogramme cylindrique à changement de forme pour afficher des prévisions de disponibilité de l'énergie

Maxime Daniel, Guillaume Rivière, Nadine Couture

To cite this version:

Maxime Daniel, Guillaume Rivière, Nadine Couture. Un histogramme cylindrique à changement de forme pour afficher des prévisions de disponibilité de l'énergie. 2018. hal-01884382v3

HAL Id: hal-01884382

https://hal.science/hal-01884382v3

Preprint submitted on 7 Nov 2018 (v3), last revised 18 Jan 2021 (v5)

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.

JIPS

Journal d'Interaction Personne-Système
Volume, Numéro, Article, mois année, pages x à y
http://jips.episciences.org

<<NE RIEN INSCRIRE ICI, EN HAUT>>

Le journal de l'Association Francophone d'Interaction Homme-Machine

Un histogramme cylindrique à changement de forme pour afficher des prévisions de disponibilité de l'énergie

Maxime DANIEL

Univ. Bordeaux, ESTIA, LaBRI, UMR 5800
F-64210 Bidart, France

m.daniel@estia.fr

Guillaume RIVIÈRE

Univ. Bordeaux, ESTIA, LaBRI, UMR 5800
F-64210 Bidart, France

Nadine COUTURE

Univ. Bordeaux, ESTIA, LaBRI, UMR 5800
F-64210 Bidart, France

A shape-changing cylindrical chart that displays energy availability forecasts

Abstract. Optimizing microgrids' renewable-energy-consumption rates can be done by energy demand-side management. Shifting consumption at better moments is possible thanks to storage capacities. To explore this context, we consider a new practice aiming at shifting laptops' consumption on workplaces thanks to their batteries. This practice requires providing usage instructions and forecasts on renewable energy availability. In order to do this, we evaluated the usability of a shape-changing cylindrical histogram, during a two-day public event, by asking 90 visitors. We also tested three kinds of motion speed in peripheral vision in order to notify neither disturbing nor irritating, by requiring 30 participants in lab conditions. Our results show success rates over 90% for range and compare tasks, which are necessary to retrieve renewable energy production peaks. Our results that an exponential speed is the best to design perceptible movements, whereas being as calm as a constant speed.

Key words: Tangible User Interface, Shape-Changing Interface, Data Physicalization, Renewable Energy, Demand-Side Management, Energy Shifting, sustainability, notification.

Résumé. Un moyen d'optimiser le taux d'énergie renouvelable consommé sur les micro-réseaux est la gestion de la demande en énergie. Décaler la consommation aux moments propices est possible avec des moyens de stockage. Pour explorer ce contexte, nous envisageons une nouvelle pratique visant à décaler la consommation des ordinateurs portables sur le lieu de travail grâce à leurs batteries. Cette pratique nécessite de fournir des consignes d'usage et des prévisions de disponibilité des énergies renouvelables. Pour ce faire, nous avons évalué l'utilisabilité d'un histogramme cylindrique à changement de forme, lors d'un évènement public sur deux jours, en interrogeant 90 visiteurs. Nous avons aussi testé trois profils de vitesse des mouvements en vision périphérique de sorte à notifier sans perturber ni agacer, en sollicitant 30 participants en condition de laboratoire. Nos résultats montrent des taux de réussite au-delà de 90 % pour des tâches de recherche d'intervalle et de comparaison, nécessaires pour retrouver les pics de production d'énergie renouvelable. Nos résultats montrent qu'une vitesse exponentielle est la plus efficace pour rendre perceptible le mouvement tout en étant aussi peu perturbante qu'une vitesse constante.

Mots-clés : Interface utilisateur tangible, interface à changement de forme, physicalisation de données, énergies renouvelables, gestion de la demande, décalage de la demande, notification.

Édité par Joëlle Coutaz, Université de Grenoble et Patrick Girard, Université de Poitiers
Soumis le 15 mars 2015 – Accepté le 30 juin 2015

(NE RIEN INSCRIRE DANS CES 3 LIGNES)

Copyright AFIHM © 2015, Aucun usage commercial ne peut en être fait sans l'accord des éditeurs ou archiveurs électroniques. Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Les articles de JIPS sont publiés sous licence Creative Commons Paternité 2.0 Générique.

1 INTRODUCTION

Depuis les crises pétrolières des années 1970, le secteur de l'énergie est un acteur majeur du développement durable : il cherche à passer d'un système dépendant de sources d'énergie à stocks épuisables, généralement polluantes, appelées sources d'énergies non-renouvelables (EnNR), comme le pétrole, le charbon, le gaz, à des sources d'énergie à flux inépuisables, généralement propres, appelées sources d'énergies renouvelables (EnR), comme le rayonnement solaire, le vent, la marée. Cependant, cette transition énergétique est lente et cette lenteur est en partie la conséquence d'une difficulté à intégrer massivement les énergies renouvelables aux réseaux électriques traditionnels. La production décentralisée et intermittente des énergies renouvelables en est la cause[1]. Afin de faciliter l'intégration des énergies renouvelables, les réseaux électriques intelligents émergent[2]. Le stockage d'énergie est la pierre angulaire des réseaux électriques intelligents (Dunn et al., 2011). Pour autant, les technologies actuelles de stockage de l'énergie sont économiquement et environnementalement coûteuses, ce qui freine le développement des réseaux électriques intelligents (Luo et al., 2015). En parallèle de ce lent changement en profondeur de l'infrastructure des réseaux électriques, des organisations telles que négaWatt appellent les citoyens à devenir acteurs de la transition énergétique[3]. Au travers des systèmes interactifs, l'Interaction Homme-Machine, en tant que discipline, a un rôle à jouer pour encourager les citoyens à devenir plus sobres et plus propres en énergie (Blevis, 2007 ; Mankoff et al., 2007).

La première approche en Interaction Homme-Machine fut impulsée par la « persuasion technologique », dans le but de concevoir des systèmes interactifs aidant à changer les attitudes ou les comportements, c'est-à-dire de « changer ce que les individus pensent et font » (Fogg, 1998 ; Fogg, 2002). DiSalvo et al. (2010) font remarquer que la « conscientisation ambiante » est une autre approche du développement durable « par » la conception de systèmes interactifs, en rendant conscient des conséquences du comportement en périphérie de l'attention (Weiser et Brown, 1996) par des informations intégrées à l'environnement de l'utilisateur (Pousman et Stasko, 2006). Dans la continuité de l'approche persuasive, Froehlich et al. (2010) proposent de concevoir des systèmes d'« éco-rétroinformations » (Eco-Feedback), s'appuyant sur la psychologie environnementale. Hamari et al. (2014a) constatent que la persuasion technologique utilise de plus en plus de fonctions de « ludification » en recourant à des mécanismes de jeu (Deterding et al., 2011) afin d'améliorer la capacité de persuasion des systèmes interactifs résultants. Negri et Senach (2015) baptisent ces systèmes interactifs des « systèmes ludo-persuasifs » (SLP). (Daniel et al., 2016) ont montré que les systèmes issus de cette approche, façonnés par la « persuasion technologique », se limitent majoritairement à la visualisation et à la supervision de la consommation d'énergie sur les espaces domestiques, cherchent principalement à réduire la consommation d'énergie (Pierce et Paulos, 2012a) et proposent majoritairement des interfaces graphiques de type applications mobiles ou des applications web sur terminaux mobiles (type smartphone). L'efficacité de ces systèmes semble plafonner entre 5 % à 20 % de réduction de consommation (Darby, 2006 ; Hazas et al., 2012 ; Vine et al., 2013).

Plusieurs articles remettent en cause cette approche visant la sobriété (c.-à-d. la réduction de la consommation) individuelle (Brynjarsdóttir et al., 2012 ; Knowles, 2013 ; Knowles et al., 2014b ; Knowles et al., 2014a), prenant même la tournure d'une controverse

---

[1] Intégration des EnRs, Commission de régulation de l'énergie (CRE), http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=integrationenr-smart-grids

[2] Comprendre les smartgrids, Commission de régulation de l'énergie (CRE), http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=comprendre-les-smart-grids

[3] Les grandes lignes du scénario négaWatt 2017-2050, négaWatt, https://negawatt.org/IMG/pdf/scenario-negawatt_2017-2050_brochure-12pages.pdf

(Rivière, 2018). Une autre approche est suggérée : accompagner de nouvelles pratiques partagées socialement (Pierce et al., 2013 ; Knowles et al., 2018). Cette nouvelle approche est encore peu explorée et la forme des systèmes pouvant y contribuer reste encore à déterminer.

Dans cet article, nous nous focalisons sur la propreté énergétique (c.-à-d. consommer mieux, consommer « vert ») sur les espaces publics et collectifs, dans le contexte de micro-réseaux[4]. Pour ce faire, nous imaginons une nouvelle pratique sur le lieu de travail visant à décaler la consommation d'énergie aux moments les plus propices en exploitant un moyen de stockage : décaler la consommation d'un ordinateur portable vers les pics de production d'énergie renouvelable grâce à sa batterie. Aussi, nous présentons et étudions un nouvel affichage des prévisions de disponibilité de l'énergie « verte » susceptible de favoriser la mise en œuvre par un groupe de personnes de nouvelles pratiques de décalage de la consommation : un diagramme cylindrique à changement de forme.

Le plan de cet article est le suivant. La section 2 présente la pratique visée de décalage de la demande en énergie sur le lieu de travail. Ensuite, dans la section 3, une revue systématique de la littérature en Interaction Homme-Machine pour la maîtrise de l'énergie analyse les systèmes existants au regard de cette nouvelle pratique. La section 4 discute des travaux relatifs aux affichages lisibles à 360 degrés sur les espaces publics et aux interfaces à changement de forme. La section 5 présente le diagramme cylindrique à changement de forme favorisant la pratique de décalage de la demande en énergie. La section 6 explique comment présenter les données de prévision de production d'énergie renouvelable avec cet affichage. Les sections 7 et 8 décrivent deux études utilisateur sur l'utilisabilité du diagramme pour retrouver les pics de production et pour notifier les variations de production. Enfin, la section 9 conclue et indique des pistes pour des travaux futurs.

LES APPORTS DE CETTE RECHERCHE :

- ✓ **Une pratique de décalage de consommation testable avec des moyens de stockage déjà répandus**
- ✓ **Un nouveau mécanisme d'anneau extensible illuminé**
- ✓ **Un prototype fonctionnel d'histogramme cylindrique à changement de forme**
- ✓ **Évaluer la recherche d'information avec des histogrammes physiques**
- ✓ **Optimisation de la vitesse de mouvements lors de la notification en vision périphérique**

2 DÉCALER LA DEMANDE EN ÉNERGIE

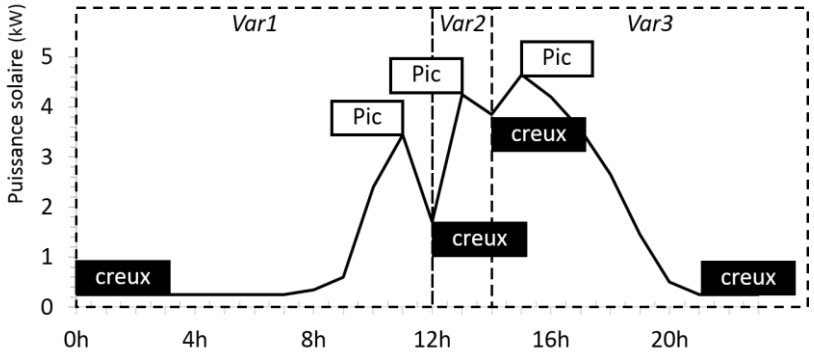
Pierce et Paulos (2012a) constatent que les systèmes interactifs pour la maîtrise de l'énergie sont principalement conçus pour promouvoir la sobriété énergétique (c.-à-d. consommer moins) sur les espaces domestiques. Ils appellent les chercheurs à s'intéresser à d'autres stratégies de maîtrise de l'énergie telle que la propreté énergétique (c.-à-d. consommer mieux, consommer « vert ») et à promouvoir ces stratégies sur d'autres espaces sociaux que le foyer, tel que le lieu de travail. Appliquer une stratégie de propreté énergétique au travail telle que décaler la demande en énergie vers les moments de disponibilité des énergies renouvelables peut s'avérer difficile : quand peu d'énergie renouvelable est disponible sur le réseau électrique, les employés peuvent ne pas avoir d'autre choix que de consommer de l'énergie pour accomplir leur activité professionnelle quotidienne. Kjeldskov et al. (2015) mentionnent par exemple que décaler la demande en énergie dans les foyers était plus réaliste avec des équipements pouvant être séparés des routines quotidiennes telles que lancer le lave-linge, lancer le lave-vaisselle ou brancher des chargeurs de batteries. En 2014, 66 % des entreprises des 28 états membres de l'Union Européenne avaient équipé leurs employés de technologies de l'information et de la communication (TICs) telles que des ordinateurs portables, des smartphones et d'autres

[4] Les micro-réseaux sont des lieux de production, de stockage, de consommation et de partage local de l'énergie.

appareils mobiles[5]. Les appareils mobiles tels que les ordinateurs portables fonctionnent sur batterie et ouvrent l'opportunité de décaler leur demande en énergie sans pour autant interrompre l'activité des employés nécessitant du calcul informatique.

Suivant les recommandations de Pierce et Paulos (2012a), nous souhaitons concevoir et étudier un système interactif pour encourager les employés à optimiser la part d'énergie renouvelable dans l'alimentation de leur ordinateur portable au travail. La production d'énergie renouvelable pendant la journée de travail est rarement une seule variation mais plutôt une succession de variations. Une variation commence depuis un niveau minimum de disponibilité de l'énergie (minimum local ou global), qui augmente jusqu'à atteindre un maximum (local ou global), puis décroit jusqu'au minimum suivant (local ou global). Chaque variation est une opportunité pour décaler, grâce à sa batterie, la consommation d'un ordinateur portable vers le moment de pic de production des énergies renouvelables (figure 1).

Figure 1. Trois variations de production d'énergie, par l'installation de 5 kW de panneaux photovoltaïques sur le toit de notre école, lors d'une journée d'été partiellement nuageuse (ESTIA, Bidart, France).



Dans un premier temps, nous avons observé la pratique actuelle de charge d'un ordinateur portable au travail. Puis, nous avons développé un outil en ligne permettant de simuler les charges et décharges d'un ordinateur portable afin de définir des consignes appropriées pour décaler la charge d'un ordinateur portable au travail favorisant une attitude éco-responsable.

2.1 Pratique actuelle de charge d'un ordinateur portable au travail

Pour encourager les employés à décaler la charge de leur ordinateur portable, il est nécessaire d'identifier une pratique qui sera appropriée au contexte professionnel. Dans un premier temps, nous avons caractérisé la pratique de charge d'un ordinateur portable la plus commune sur le lieu de travail. Pour cela, nous avons interrogé 22 personnes (8 femmes, 14 hommes) de notre laboratoire. Parmi ces 22 personnes, 18 d'entre elles déclarent utiliser un ordinateur portable au travail. Parmi ces 18 personnes, 15 d'entre-elles déclarent garder leur ordinateur portable souvent ou toujours branché au secteur (même lorsque la batterie est complètement chargée). Nous considérons cette pratique comme la pratique par défaut pour décaler la charge de la batterie d'un ordinateur portable au travail.

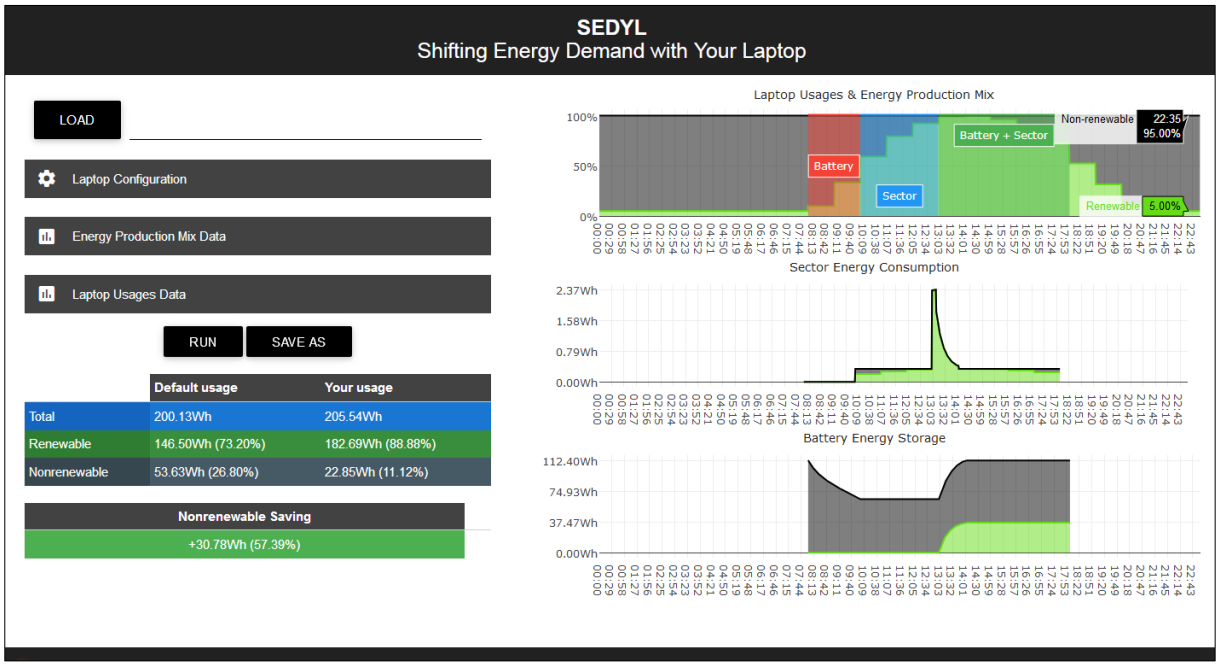
2.2 Simuler le décalage de la charge d'un ordinateur portable

Par la suite, nous avons développé SEDYL[6] (« Shifting Energy Demand with Your Laptop »), un outil en ligne permettant de simuler le décalage de la charge d'un ordinateur

[5] Statistiques sur la société de l'information - entreprises, Eurostat, http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Information_society_statistics/fr
[6] http://itame.pythonanywhere.com/CairnFORM/Sedyl/

portable. L'outil permet de comparer une pratique donnée avec la pratique par défaut précédemment identifiée. L'outil implémente un modèle dynamique de batterie lithium-ion (Tremblay et Dessaint, 2009) et prend en paramètres : la configuration de l'ordinateur portable ; le mix de la production électrique[7] ; et les usages de l'ordinateur portable. L'outil calcule la quantité d'énergie non-renouvelable non consommée par la pratique donnée par rapport à la pratique par défaut. En revanche, l'outil ne calcule pas l'usure induite de la batterie (p. ex., l'impact de la profondeur de (dé)charge sur la durée de vie de la batterie). La figure 2 présente une capture d'écran de l'outil.

Figure 2. Capture d'écran de SEDYL, un simulateur en ligne de décalage de la charge d'une batterie.



2.3 Consignes pour décaler la charge d'un ordinateur portable

Dans notre exploration des pratiques avec l'outil SEDYL, nous avons utilisé la configuration d'un ordinateur portable de notre laboratoire: un ordinateur portable Lenovo ThinkPad T540p d'une puissance nominale de 20 W équipé d'une batterie lithium-ion à 6 cellules (4400 mAh, 11,1 V). Pour le mix de la production électrique, nous avons utilisé comme jeu de données des courbes de production d'énergie solaire de l'installation photovoltaïque de notre laboratoire (d'une capacité de 5 kW), mesurées et enregistrées entre le 13 janvier 2012 et le 12 janvier 2013 (ESTIA, Bidart, France). À partir de ces courbes, nous avons simulé des pratiques en combinant trois usages différents de l'ordinateur portable (p. ex., de 12h à 13h, ordinateur sur batterie ; de 13h à 14h, ordinateur sur secteur uniquement ; de 14h à 15h, ordinateur sur batterie et secteur). De manière empirique, à partir de quatre profils de journées types (obtenus en appliquant l'algorithme de partitionnement de données KmlShape (Genolini et al., 2016) sur notre jeu de données), puis par une trentaine de simulations avec SEDYL pour déterminer le seuil de débranchement (prenant en compte la courbe de charge et de décharge, sur les 305 variations de notre jeu de données), nous avons déterminé les trois consignes suivantes pour décaler de manière optimale, c'est-à-dire en utilisant le maximum d'énergie renouvelable, la charge d'un ordinateur portable. Les trois consignes sont les suivantes :

[7] La part du thermique, du nucléaire ou encore de l'hydraulique et des autres énergies renouvelables dans la production d'électricité (p. ex., de 14h à 15h, 20 % d'énergie renouvelable produite contre 80 % d'énergie non-renouvelable).

- En attendant un pic d'énergie renouvelable, travailler sur batterie et lorsqu'elle est déchargée à 50 %, enlever la batterie et travailler sur secteur ;
- Pendant un pic d'énergie renouvelable, charger la batterie en se branchant au secteur ;
- Après le dernier pic d'énergie renouvelable, continuer à charger la batterie en restant branché au secteur jusqu'à la fin de la journée.

Afin de concevoir et mettre en œuvre un système interactif pour aider au décalage de la charge des ordinateurs portables au travail, nous avons réalisé une revue de la littérature sur les systèmes interactifs pour la maîtrise de l'énergie.

3 REVUE DE SYSTÈMES INTERACTIFS DE MAÎTRISE DE L'ENERGIE

Dans leur état de l'art sur les recherches en Interaction Homme-Machine (IHM) en relation avec l'énergie, Pierce et Paulos (2012a) constatent que les systèmes interactifs étudiés cherchent principalement à promouvoir la sobriété énergétique sur les espaces domestiques en visualisant ou supervisant la consommation d'énergie. Ils soulignent que peu de travaux s'intéressent à d'autres espaces, comme le lieu de travail ou les lieux publics (cafés, parcs, écoles, musées). Les deux états de l'art de Hamari et al. sur la persuasion technologique (2014a) et un autre sur la ludification (2014b) extraient respectivement 52 systèmes et 24 systèmes de la littérature. Ils analysent les méthodes utilisées pour évaluer la capacité de persuasion (quantitative, qualitative, mixte), les résultats obtenus de ces évaluations (positif, partiellement positif, négatif ou autre), les fonctions implantées (ex. : accomplissement, retours d'information, suggestion), les effets psychologiques recherchés (ex. : engagement, motivation, conscience) et les domaines ciblés (ex. : santé, écologie). La revue de la littérature sur la persuasion technologique dédiée à la maîtrise de l'énergie de Cano et al. (2015) extrait 10 systèmes du domaine. Ils les analysent pour définir un espace de classification composé de six dimensions : domaine, fonction de persuasion, représentation, interaction, échelles et dispositifs.

Notre travail de revue de la littérature des systèmes pour la maîtrise de l'énergie complète les revues précédentes car nous analysons la conception et la mise en œuvre des systèmes pour la sobriété et la propreté énergétique au regard de quatre composantes : le contexte, le système (données et fonctions), l'interface et l'utilisateur.

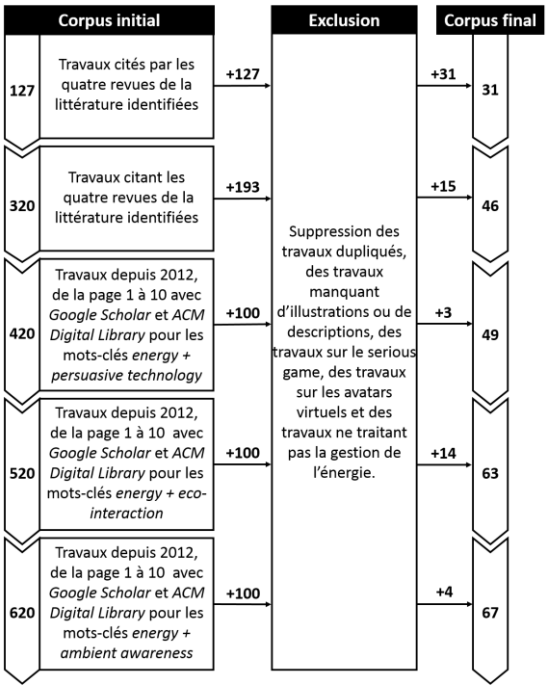
Dans cette section, nous expliquons tout d'abord comment nous avons constitué le corpus de 67 systèmes interactifs dédiés à la maîtrise de l'énergie, puis nous présentons les critères d'analyse et la classification qui en résulte. Enfin, nous analysons cette classification au regard de la pratique que nous ciblons : en exploitant un moyen de stockage, décaler la consommation d'énergie aux moments les plus propices de la journée permettant de consommer le maximum d'énergie renouvelable produite localement.

3.1 Méthode d'identification du corpus

En suivant une approche systématique de revue de la littérature, comme réalisé par (Johnson et al., 2016) pour la ludification en santé, nous avons constitué un corpus de 67 systèmes interactifs pour la maîtrise de l'énergie. Les 67 systèmes interactifs identifiés proviennent de la littérature scientifique entre 2005 et 2017. Dans un premier temps, nous avons rassemblé les travaux citant et cités par quatre revues de la littérature (Cano et al., 2015 ; Hamari et al., 2014b ; Hamari et al., 2014a ; Pierce et Paulos, 2012a). Puis, et nous avons utilisé les banques de données « Google Scholar » et « ACM Digital Library » pour rechercher des travaux depuis 2012 combinant les mots-clés « energy », « persuasive technology », « eco-feedback » et « ambient awareness », nous avons conservé les dix premières pages de chaque résultat de recherche. Nous avons ainsi identifié 620 travaux. Pour obtenir le corpus final de 67 systèmes interactifs, nous avons conservé les travaux traitant de la maîtrise de l'énergie, enlevé les travaux dupliqués et rejeté les travaux sur les jeux sérieux et les avatars (car ces approches sont différentes de celles que nous souhaitons adopter), ainsi que ceux dont le système était insuffisamment décrit ou illustré. La majorité

des systèmes interactifs identifiés proviennent d'articles de conférences et de revues scientifiques avec comité de lecture et évaluation par les pairs[8] (95,5 % ; 64 sur 67). Seuls trois systèmes interactifs proviennent de deux mémoires de master (4,5 % ; 3 sur 67). Le processus d'identification du corpus est illustré par la figure 3.

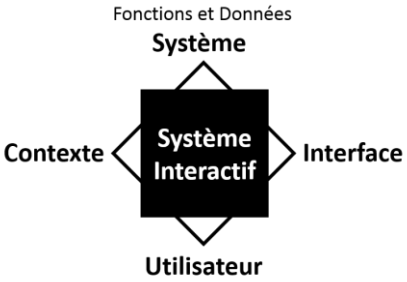
Figure 3. Processus d'identification du corpus.



3.2 Critères d'analyse du corpus

Coutaz (2013) propose d'évaluer les systèmes interactifs en termes de conformité fonctionnelle (relative au « système »), conformité interactionnelle (relative à l'« interface »), conformité hédoniste (relative à l'« utilisateur ») et conformité contextuelle (relative au « contexte »). Nous considérons donc dans ce travail un système interactif comme la composition de quatre entités interdépendantes : le « contexte », le « système » (données et fonctions), l'« interface » et l'« utilisateur ». À partir de cette définition, nous organisons un cadre d'analyse, illustré figure 4, que nous utilisons dans la suite pour décrire les systèmes interactifs, comme la composition de quatre entités interdépendantes que sont : le système (les données et les fonctions), l'interface, l'utilisateur et le contexte.

Figure 4. Les quatre composantes d'un système interactif.



[8] Un peu moins des deux tiers des travaux (64,2 % ; 43 sur 67) proviennent de conférences et de journaux ACM (CHI, DIS, NordiCHI, OzCHI, UbiComp, Persuasive, AVI, C&C, C&T, ChineseCHI, Ergo'IHM, IUI, MUM, and TOCHI). Environ un tiers des travaux (31,3 % ; 24 sur 67) proviennent de conférences et journaux IEEE (CTS, MultiMedia, SustainIT, TVCG), Springer (INTERACT, SouthCHI, AmI, AI&Society, EnviroInfo, PUC, SID), Elsevier (Applied Energy, ECIS, Energy and Buildings, Energy), IARIA, BCS IWC, and DRS.

Pour analyser le corpus, nous avons défini 16 critères organisés en cinq classes.

3.2.1 La classe du contexte

Cette première classe informe sur le contexte qui entoure le système interactif. Nous avons défini quatre critères :

- La « sobriété énergétique » informe sur les stratégies de sobriété énergétique adoptées par le système interactif. Trois stratégies apparaissent : réduire ou mutualiser la consommation d'énergie (p. ex., réduire la luminosité des écrans), décaler la consommation d'énergie vers les heures creuses (p. ex., lancer le lave-linge pendant le creux global de demande en énergie de 0h et 7h) et stocker de l'énergie pendant les heures creuses pour la consommer ou la partager ultérieurement (p. ex., stocker de l'énergie pendant le creux global de demande en énergie de 0h à 7h pour lancer le lave-linge plus tard dans la journée).
- La « propreté énergétique » informe sur les stratégies de propreté énergétique adoptées par le système interactif. Deux stratégies apparaissent : décaler la consommation d'énergie vers les heures vertes (p. ex., lancer le lave-vaisselle pendant le pic local de production d'énergie solaire de 12h à 14h) et stocker de l'énergie pendant les heures vertes pour la consommer ou la partager ultérieurement (p. ex., stocker de l'énergie pendant le pic local de production d'énergie solaire de 12h à 14h pour lancer le lave-vaisselle plus tard dans la journée).
- L'« espace social » informe sur l'espace social sur lequel le système interactif cherche à opérer : espace non spécifique, espace domestique, espace collectif (p. ex., lieu de travail) et espace public (p. ex., gare, métro).
- Le « contrôle » informe sur le contrôle des équipements par le système interactif : manuel (p. ex., l'utilisateur éteint la lampe manuellement lorsqu'il quitte la pièce), semi-automatique (p. ex., l'utilisateur éteint la lampe à distance avec son smartphone lorsqu'il quitte la pièce) et automatique (p. ex., un système domotique éteint automatiquement la lampe lorsque l'utilisateur quitte la pièce).

3.2.2 La classe des données

Cette deuxième classe informe sur les données mesurées et utilisées par le système interactif. Nous avons défini trois critères :

- Le « type » défini la nature des données énergétiques mesurées et utilisées. Nous distinguons cinq types de données qui sont les données de consommation d'énergie, de production d'énergie, de stockage d'énergie, de distribution d'énergie et d'économie d'énergie.
- L'« échelle temporelle » informe sur la position des données dans le temps. Nous distinguons les données historiques, instantanées et prévisionnelles.
- L'« échelle spatiale » informe sur l'espace ou le territoire dont proviennent les données. Nous distinguons les données relatives à un appareil, une pièce, un bâtiment, un voisinage, une ville et un pays.

3.2.3 La classe des fonctions

Cette troisième classe informe sur le noyau fonctionnel des systèmes interactifs du corpus. Trois critères, ou /types de fonction, sont examinés :

- Les « fonctions de matérialisation » de Pierce et Paulos (2010) : la collecte, la possession, le partage et l'activation de l'énergie.

- Les neuf « fonctions de persuasion » ont été identifiées dans le corpus et sont citées en relation avec le conditionnement opérant[9] de Skinner (1976) : la rétroaction immédiate (c.-à-d. retour d'information immédiat sur les conséquences du comportement), la rétroaction cumulée (c.-à-d. retour d'information sur les conséquences du comportement cumulées depuis une durée déterminée), la comparaison temporelle (c.-à-d. comparer les conséquences du comportement à différents moments), la comparaison spatiale (c.-à-d. comparer les conséquences du comportement à différents endroits), la comparaison sociale (c.-à-d. comparer les conséquences du comportement avec une ou plusieurs normes sociales), l'évaluation (c.-à-d. positionner les conséquences du comportement sur une échelle à intervalle borné allant des conséquences les moins souhaitées aux conséquences les plus souhaitées), la simulation (c.-à-d. simuler le comportement à différents moments et endroits pour observer ses conséquences), la prévision (c.-à-d. projeter le comportement dans le futur pour observer ses conséquences) et la suggestion (c.-à-d. recommander un changement de comportement afin d'obtenir des conséquences plus souhaitables).
- Les « fonctions de ludification » se réfèrent aux mécanismes de jeu implantés dans le système interactif. À partir du corpus et de l'état de l'art sur la ludification réalisé par Hamari et al. (2014b), nous identifions huit mécanismes de jeu différents : le challenge (c.-à-d. fixer un objectif individuel ou de groupe pour une durée déterminée), la compétition (c.-à-d. mettre en concurrence des individus ou des groupes sur un même objectif pendant une durée plus ou moins déterminée), la collaboration (c.-à-d. permettre à deux individus ou plus de travailler ensemble pour atteindre un même objectif), la progression (c.-à-d. suivre les avancements de l'individu ou du groupe vers l'objectif à atteindre), la récompense (c.-à-d. valoriser immédiatement la réalisation de l'individu et du groupe), l'accomplissement (c.-à-d. valoriser publiquement l'ensemble des réalisations de l'individu et du groupe), la personnalisation (c.-à-d. s'adapter aux caractéristiques de l'individu ou du groupe) et l'interaction sociale (c.-à-d. permettre aux individus et aux groupes d'échanger entre eux).

3.2.4 La classe de l'interface

Cette quatrième classe informe sur les moyens mis en œuvre par les systèmes interactifs du corpus pour communiquer avec l'utilisateur et lui permettre de contrôler le système. Quatre critères sont retenus :

- Le « type » définit le type de l'interface utilisateur employée par le système interactif. Nous dégageons trois types d'interface (non exclusifs) : les interfaces graphiques (c.-à-d. basées pixels, p. ex., smartphone, tablette, ordinateur personnel, projecteur, application web), les interfaces physiques (c.-à-d. basées objets physiques, p. ex., objet du quotidien revisité, objet connecté) et les interfaces ambiantes (c.-à-d. basées conscientisation ambiante).
- Le « dispositif » d'entrée/sortie informe sur le dispositif d'accueil du système interactif. Nous distinguons les appareils mobiles (p. ex., smartphone, tablette, PC portable), les applications web, les appareils de projection, les objets connectés et les objets du quotidien revisités.
- L'« accessibilité » informe sur les conditions d'accès à l'interface du système interactif. À partir du corpus, nous distinguons les interfaces mobiles généralement accessibles par un unique individu au travers d'un appareil mobile et les interfaces fixes généralement accessibles par plusieurs individus au travers d'un appareil fixe sur un espace non spécifique, domestique, collectif ou public.

[9] Le conditionnement opérant est un modèle en psychologie comportementale qui affirme que le comportement est sensible et contrôlé par ses conséquences.

- La « visibilité » définit la portée de l'interface du système interactif. Les interfaces employées par les systèmes interactifs du corpus sont visibles à l'échelle d'un individu, d'une pièce, d'un bâtiment ou d'une ville.

3.2.5 La classe de l'utilisateur

Cette cinquième et dernière classe informe sur les différents utilisateurs de l'interface et sur la nature de leurs interactions avec l'interface. L'utilisation du système interactif est classée selon deux critères :

- Un utilisateur « pro-actif » doit manipuler l'interface pour accéder au noyau fonctionnel du système. Nous distinguons quatre utilisateurs différents que sont l'individu, le groupe, la communauté et la société.
- Un utilisateur « passif » ne manipule pas l'interface pour accéder au noyau fonctionnel. C'est plutôt l'interface qui va accéder au noyau fonctionnel du système et communiquer vers l'utilisateur.

3.3 Classification du corpus

En passant les 67 systèmes interactifs du corpus au travers des 16 critères précédemment définis, nous avons obtenu la matrice présentée en figure 5. Une application web a été développée permettant une consultation interactive par filtres de cette matrice. Elle est accessible en ligne[10].

3.4 Analyse du corpus

Dans cette section, nous analysons la matrice au regard du cas de la pratique ciblée : maximiser la part d'énergie renouvelable dans l'alimentation des ordinateurs portables au travail en appliquant des consignes de chargement et utilisation d'un stockage d'énergie (la batterie).

3.4.1 Contexte

Seulement treize systèmes interactifs du corpus (19,4 % ; 13 sur 67) sont conçus pour promouvoir la propreté énergétique. Les caractéristiques du contexte de ces treize systèmes interactifs sont distinguées en vert sur le diagramme de la figure 6. Tandis que onze aident les utilisateurs à décaler, soit manuellement (11 sur 11), soit (semi-)automatiquement (3 sur 11), leur consommation d'énergie vers les heures de pic d'énergie renouvelable (9 sur espaces domestiques et 2 sur espace collectif ou public), seulement deux aident à stocker, manuellement, de l'énergie renouvelable pendant les heures vertes (sur espace domestique). Aucun de ces systèmes ne cible la consommation des ordinateurs portables sur le lieu de travail.

3.4.2 Système : données et fonctions

Ces onze systèmes interactifs, aidant au décalage de la consommation (16,4 % ; 11 sur 67), exploitent tous des données sur la production d'énergie renouvelable. Les caractéristiques des données de ces onze systèmes interactifs sont distinguées en vert sur le diagramme de la figure 7. Ce sont des combinaisons de données historiques, instantanées et prévisionnelles, mais aucun système ne se restreint à afficher uniquement des données prévisionnelles. Cinq de ces systèmes interactifs concernent la production d'énergie renouvelable à l'échelle d'un bâtiment.

[10] http://itame.pythonanywhere.com/Classification/

Figure 5. Matrice discriminant les 67 systèmes interactifs du corpus selon 73 caractéristiques provenant de 16 critères organisés en cinq classes. Les 67 références bibliographiques sont listées en annexe.

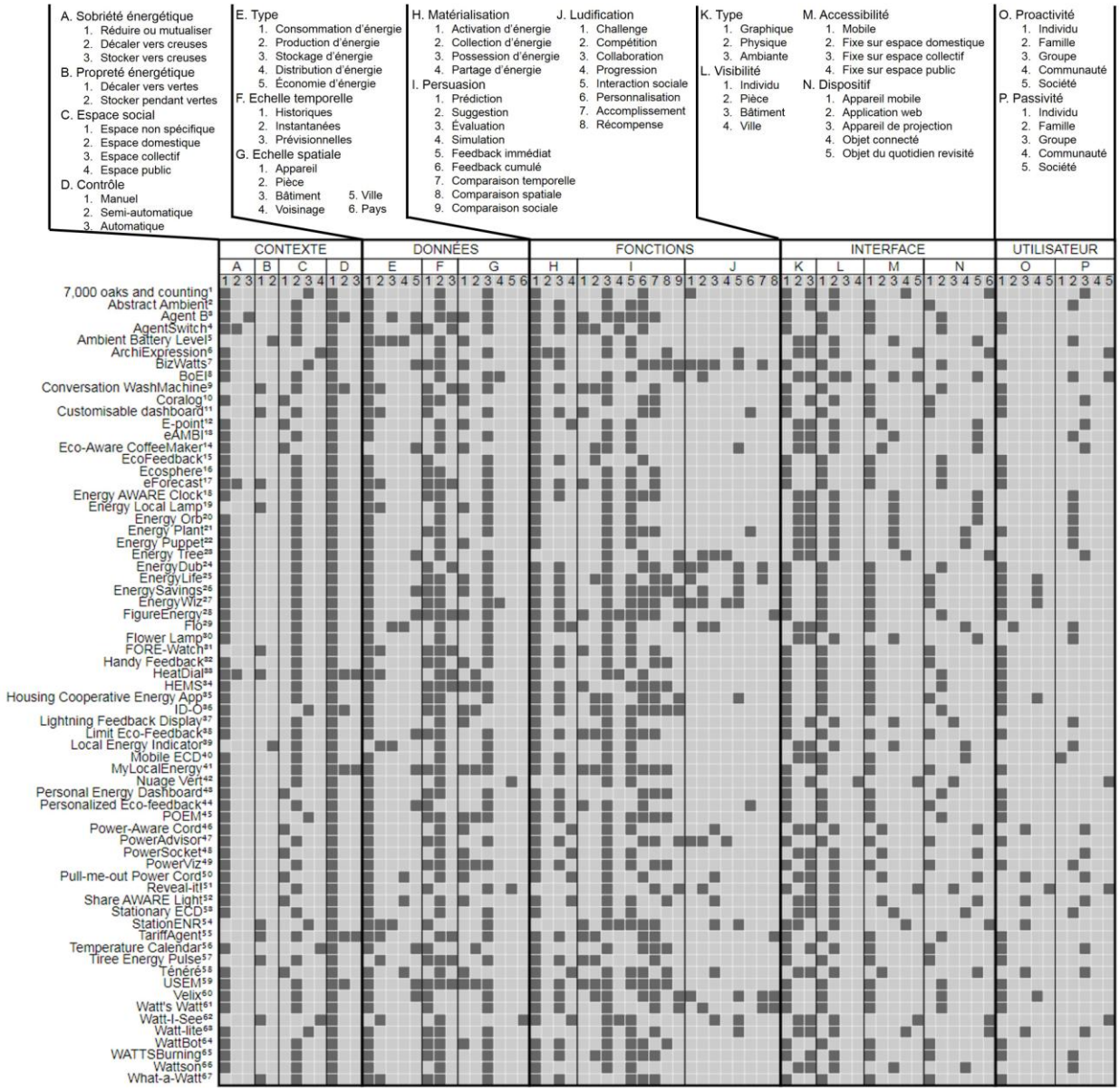
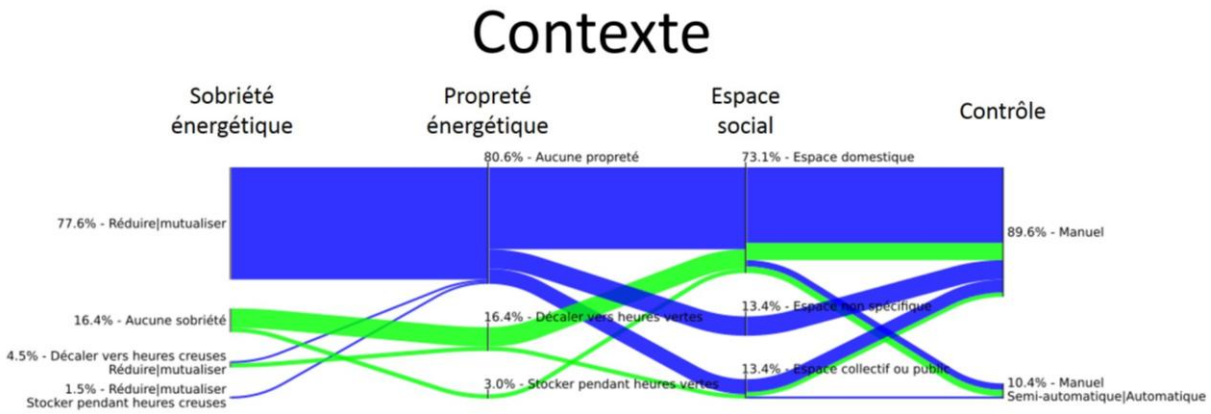


Figure 6. Diagramme Sankey visualisant un flux des critères de « contexte » des 67 systèmes interactifs.



Ces cinq systèmes interactifs (7,5 % ; 5 sur 67) implantent une fonction de persuasion en particulier : la comparaison temporelle des données historiques, immédiates et prévisionnelles sur la production d'énergie du bâtiment concerné. Les caractéristiques des fonctions de ces cinq systèmes interactifs sont distinguées en vert sur le diagramme de la figure 8. Cette fonction aide les utilisateurs à planifier leurs usages en énergie en fonction de la disponibilité à venir des énergies renouvelables dans le bâtiment (Costanza et al., 2014 ; Kjeldskov et al., 2015 ; Schrammel et al., 2011). Nous utilisons cette fonction de persuasion pour aider à appliquer des consignes pour maximiser la part d'énergie renouvelable consommée par leur ordinateur portable au travail.

3.4.3 Interface et utilisateur

Les caractéristiques des interfaces des cinq systèmes interactifs précédemment identifiés, qui implantent la fonction de comparaison temporelle, sur des données à l'échelle d'un bâtiment, sont distinguées en vert sur le diagramme de la figure 9. Ces cinq systèmes interactifs utilisent des interfaces graphiques mobiles (c.-à-d. applications web ou applications mobiles). Ces interfaces nécessitent que les utilisateurs soient pro-actifs vis-à-vis du système. Nous formulons l'hypothèse qu'au travail, les employés effectuent des tâches professionnelles et manquent généralement de temps pour être pro-actif vis-à-vis d'un système qui ne serait pas lié à leur activité professionnelle. Une interface fixe ambiante serait de notre point de vue plus appropriée dans ce contexte, étant donné qu'une telle interface peut amener l'information de manière non-intrusive aux employés et leur permettre de rester passifs vis-à-vis du système. Les caractéristiques d'utilisateur de ces cinq systèmes interactifs sont distinguées en vert sur le diagramme de la figure 10. En plus de la pro-activité des utilisateurs, ces cinq systèmes proposent uniquement des interactions individuelles.

3.4.4 Bilan

Aucun des systèmes interactifs du corpus ne répond pleinement à notre contexte et à la pratique ciblée. Parmi treize systèmes interactifs aspirant à la propreté énergétique, douze visent à décaler la consommation d'énergie vers les pics d'énergie renouvelable, mais un seul cible les espaces publics ou collectifs. Cinq de ces systèmes interactifs concernent la production d'énergie renouvelable (locale) d'un bâtiment, mais leurs interfaces graphiques mobiles semblent incompatibles avec le lieu de travail.

Notre proposition de diagramme cylindrique à changement de forme se distingue de l'existant en affichant uniquement des données prévisionnelles avec une interface fixe et ambiante qui notifie les changements sans déranger ou interrompre les employés. Ce nouvel affichage est également conçu pour être lisible à 360 degrés dans un espace collectif.

4 TRAVAUX RELATIFS

Depuis près d'un siècle, des afficheurs sont déployés sur les espaces privés collectifs (ex. : hall d'entrée d'une entreprise, d'une école, d'une résidence) et les espaces publics (ex. : musées, stades, aéroports, gares, arrêts de bus) ; leur rôle est de communiquer de l'information (ex. : civique, publicitaire, sanitaire, sportive, ferroviaire) au plus grand nombre (Ardito et al., 2015). Aujourd'hui encore, les afficheurs planaires sont majoritaires sur ces espaces (p. ex., figure 11), certains offrent de l'interaction tactile (Ardito et al., 2015), d'autres sont en relief et changent de forme (p. ex., figure 12).

Figure 7. Diagramme Sankey visualisant un flux des critères de « données » des 67 systèmes interactifs.

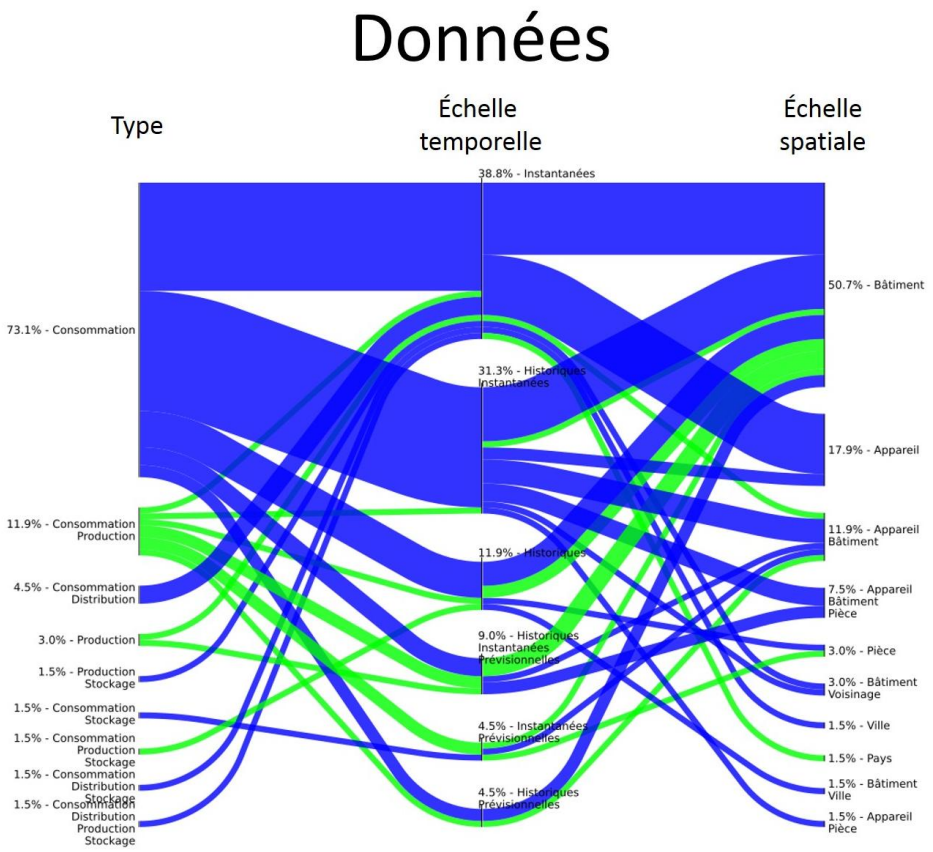


Figure 8. Diagramme Sankey visualisant un flux des critères de « fonction » des 67 systèmes interactifs.

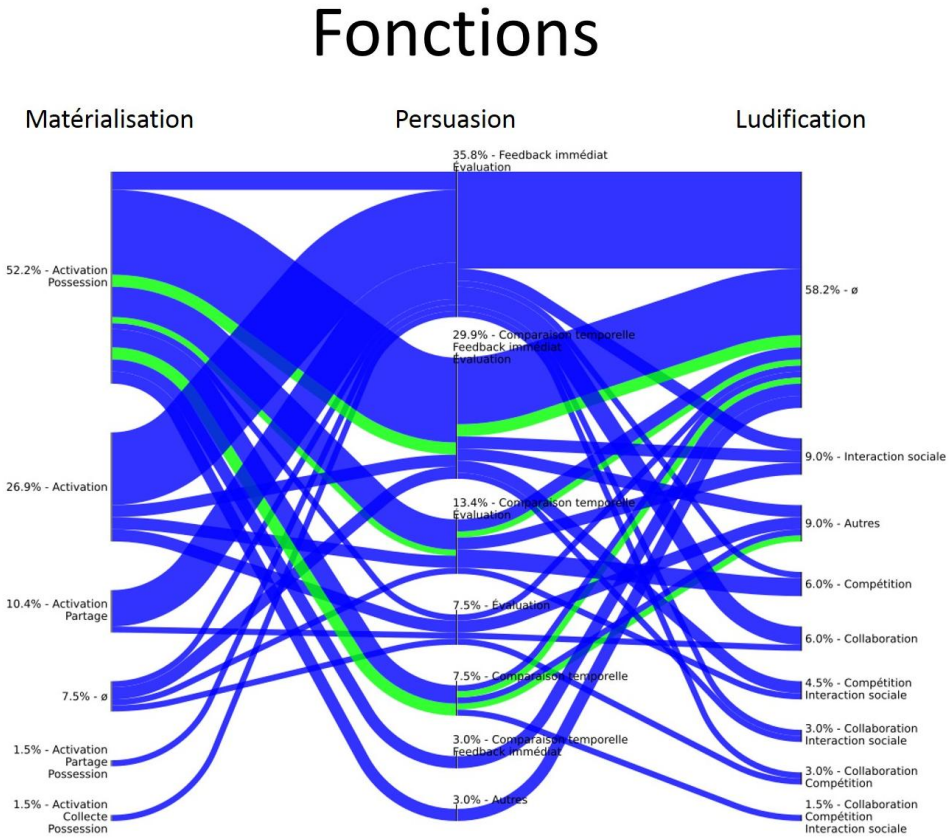


Figure 9. Diagramme Sankey visualisant un flux des critères d'« interface » des 67 systèmes interactifs.

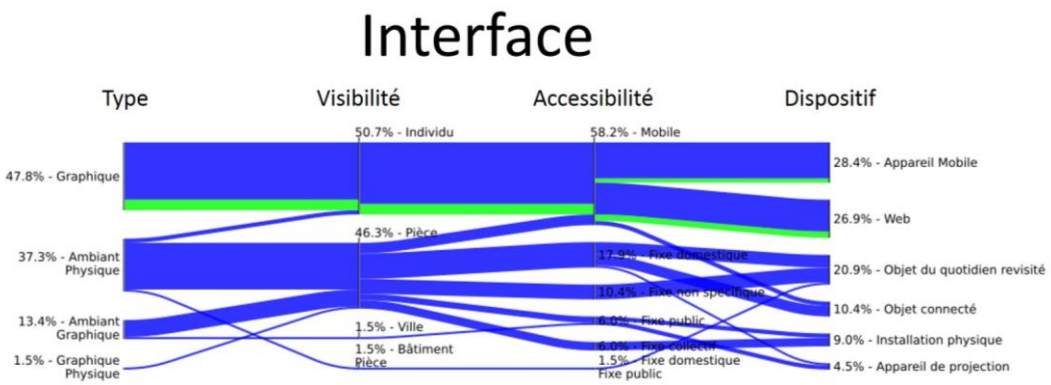


Figure 10. Diagramme Sankey visualisant un flux des critères d'« utilisateur » des 67 systèmes interactifs.

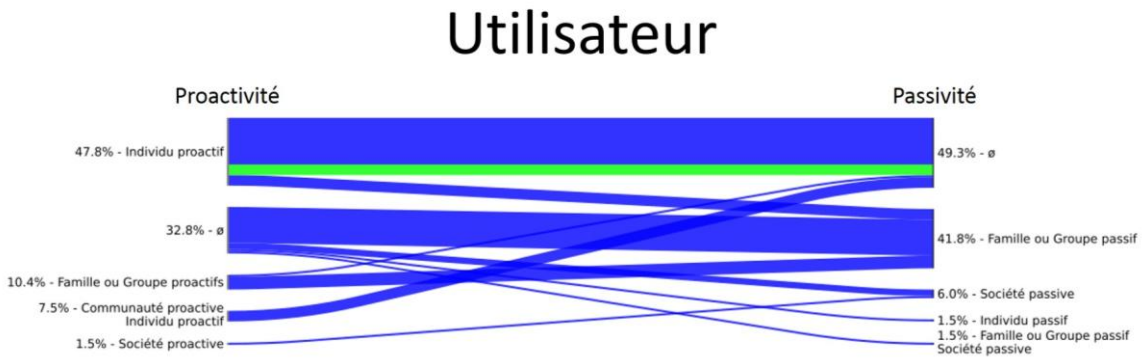


Figure 11. Des afficheurs planaires dans une station de métro (New York, NY, USA).

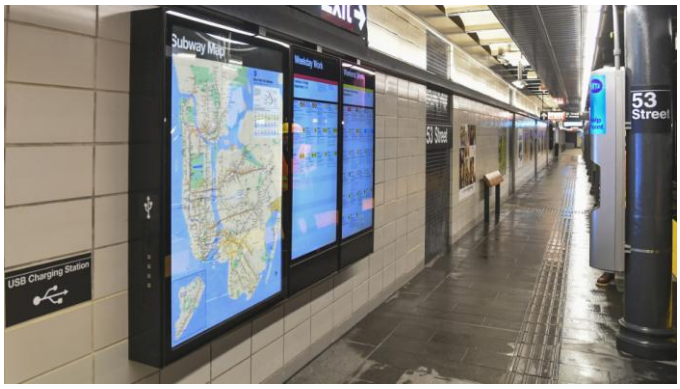


Figure 12. À notre connaissance, le premier panneau publicitaire à changement de forme déployé sur une place publique, le 8 août 2017 (Coca-Cola, Times Square, New York, USA).

Un problème récurrent est rencontré sur ces espaces collectifs et publics lorsque les utilisateurs ont des points d'observation disséminés, typiquement quand ils arrivent de différentes directions. Un afficheur planaire ne peut communiquer que vers seulement une partie des utilisateurs. Afin de pouvoir communiquer avec un maximum d'utilisateurs, des afficheurs non-planaires à révolution (c.-à-d. repliés autour d'un axe) ont été conçus, notamment des afficheurs cylindriques (p. ex., figure 13), certains permettant également de l'interaction tactile (Beyer et al., 2011). Contrairement aux afficheurs planaires, les afficheurs non-planaires avec révolution sont utilisables à 360 degrés autour d'un axe (Bolton et al., 2012). Ces afficheurs ont l'avantage de permettre à plusieurs utilisateurs autour de l'interface d'interagir simultanément avec le système sans pour autant se déranger les uns et les autres, tout en conservant une certaine intimité (Ardito et al., 2015). D'autres ont pris la forme de sphères volantes à LEDs pour les enceintes des stades (Yamada et al., 2017).

Figure 13. Des afficheurs cylindriques dans un aéroport (Photo prise le 28/02/2012 à Pékin, Chine).

Ces afficheurs publics qui communiquent à 360 degrés sont des affichages graphiques. Pour communiquer des données de prévision d'énergie, lisibles à 360 degrés sur les espaces publics et collectifs, nous faisons le choix d'explorer des affichages physiques.

4.1 Physicalisation de données

La « physicalisation de données » (DataPhys) a émergé comme un champ de recherche à l'intersection entre la « visualisation de données » (DataViz) et les « interfaces utilisateur tangibles » (Tangible User Interfaces, TUIs). Jansen et al. (2015) définissent une « physicalisation » comme un « artefact physique dont les propriétés géométriques et matérielles encodent une donnée » et proposent de considérer la « physicalisation de données » comme un champ de recherche qui « examine comment les représentations physiques des données (c.-à-d. physicalisations) peuvent supporter la cognition, la communication, l'apprentissage, la résolution de problèmes et la prise de décisions ». Ils distinguent les physicalisations « statiques » dont les propriétés physiques sont difficilement modifiables, des physicalisations « dynamiques » dont les propriétés physiques peuvent être modifiées (p. ex., à l'aide d'une interface à changement de forme). Des exemples typiques de physicalisations dynamiques sont les diagrammes à lignes[11], à barres (Jansen et al., 2013 ; Taher et al., 2015) et en camembert (Regan et al., 2015).

Pour représenter les données de prévision d'énergie, nous proposons un histogramme à anneau. Cet histogramme avec symétrie cylindrique est la symétrie de révolution d'un histogramme à barre (voir figure 14). Un exemple d'histogramme cylindrique a été utilisé pour « physicaliser » des données démographiques de la population Irlandaise[12] afin de communiquer des données sociales et économiques. Cet exemple, fabriqué avec une pile

[11] Pulse: Tangible Line Graph (2012), Jon McTaggert et Christian Ferrara, http://dataphys.org/list/pulse-tangible-line-graph/
[12] Vessels of Irelands Past #2 (2014), Trevor Hogan, http://tactiledata.net/

ré-arrangeable de disques en bois, est cependant une physicalisation statique (voir figure 15). Nous proposons une physicalisation dynamique d'histogramme, dont les mouvements subtils sont conçus pour notifier au quotidien sans déranger et sans agacer.

Figure 14. Un histogramme cylindrique est la symétrie de révolution d'un histogramme renversé.

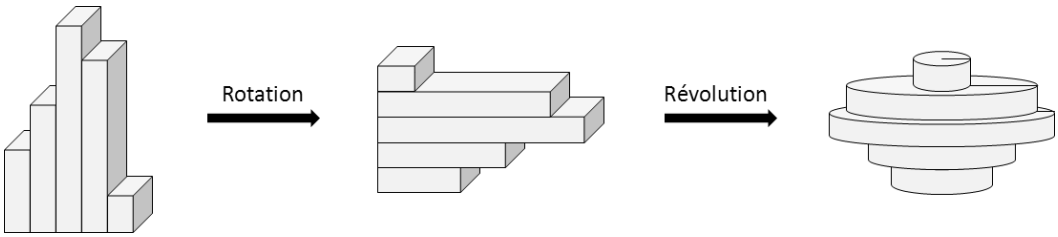


Figure 15. Vessels of Irelands Past, un histogramme physique statique.

4.2 Notification par attention périphérique

La « conscientisation ambiante » est la capacité des êtres humains qui leur permet d'être conscients des informations environnantes (Wisneski et al., 1998). Weiser et Brown (1996) définissent les « technologies calmes » comme des technologies capables de voyager entre la périphérie et le centre de l'attention des utilisateurs. Ils affirment que les technologies calmes améliorent la conscientisation ambiante des utilisateurs en amenant plus de détails en périphérie : elles rendent les utilisateurs conscients de ce qui s'est passée, de ce qui se passe et de ce qui va se passer autour d'eux (Weiser et Brown, 1996). Récemment, le terme « interaction périphérique » (Peripheral Interaction) a émergé, visant à élargir le cadre des technologies calmes en concevant non seulement pour la perception périphérique mais également pour l'action périphérique. Les interfaces périphériques visent des interactions simples en périphérie de l'attention de l'utilisateur, se reposant sur les capacités humaines telles que la proprioception (Boff et al., 1986), l'attention divisée (Wickens et McCarley, 2007) et les processus habituels (Bakker et al., 2010) qui peuvent être réalisés avec un minimum d'attention.

StaTube (Hausen et al., 2012) est un exemple d'interface de forme cylindrique exploitant l'attention périphérique pour notifier. StaTube est une pile de sept anneaux illuminés de 6 cm de diamètre mesurant 17 cm de hauteur au total. Placé sur un bureau, StaTube notifie subtilement l'utilisateur à propos de son statut de messagerie instantanée et du statut de sept contacts favoris au maximum (la couleur de chaque anneau encode le statut du contact associé) (voir figure 16). L'utilisateur peut changer son statut en tournant l'anneau du haut.

Figure 16. StaTube, une interface cylindrique, notifie par changement de lumière (Hausen et al., 2012).

Gutwin et al. (2017) ont montré que le changement de lumière (changement de couleur, changement de luminosité) est moins bien perçu dans l'ensemble du champ de vision humain, notamment dans le champ de vision périphérique, que le changement de forme (p. ex., changement de position, changement de taille). Nous proposons donc un histogramme cylindrique qui notifie par changement de forme.

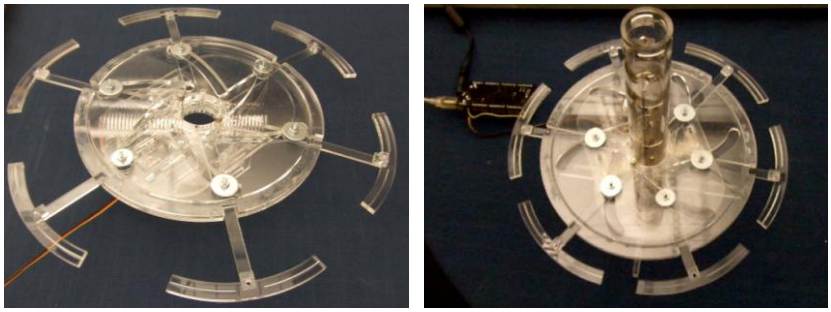
4.3 Interfaces à changement de formes

Dans la lignée des interfaces utilisateur tangibles (TUIs), les « interfaces à changement de forme » (Shape-Changing Interface, SCI) sont « conçues, avec l'hypothèse que dans un futur proche, les objets physiques deviendront aussi malléables que leurs homologues virtuels » (Sutherland, 1965 ; Ishii et al., 2012 ; Strohmeier et al., 2016). Les interfaces à changement de forme récentes emploient des actionneurs (p. ex., mécaniques (Blackshaw et al., 2011), thermiques (Heibeck et al., 2015), magnétiques (Lee et al., 2011), acoustiques (Seah et al., 2014), pneumatiques (Yao et al., 2013), biologiques (Yao et al., 2015)) pour changer les propriétés physiques (p. ex., forme (Horev, 2006), volume (Kim et al., 2008), viscosité (Jansen et al., 2010), position (Le Goc et al., 2016), texture (Leithinger et Ishii, 2010), orientation (Togler et al., 2009)) des courbes, des surfaces, et des volumes qu'elles utilisent comme entrée et sortie du système (en sortie seulement (Stusak et al., 2014), en sortie et en entrée simultanément (Nakagaki et al., 2016)).

Les recherches sur les interfaces à changement de forme « se concentrent principalement sur leur potentiel et les défis techniques plutôt que sur l'expérience des utilisateurs avec ce type d'interfaces » (Rasmussen et al., 2012). Il devient important pour la communauté « d'illustrer comment les interfaces à changement de forme peuvent s'intégrer et bénéficier à des contextes d'usages, tout comme comprendre comment les interfaces à changement de forme peuvent s'intégrer à la vie quotidienne de manières inattendues et nouvelles » (Grönvall et al., 2014 ; Rasmussen et al., 2012). C'est pourquoi, nous proposons, d'une part, d'utiliser une interface à changement de forme pour représenter des prévisions de disponibilité des énergies renouvelables sur les espaces publics et collectifs et, d'autre part, de l'évaluer expérimentalement.

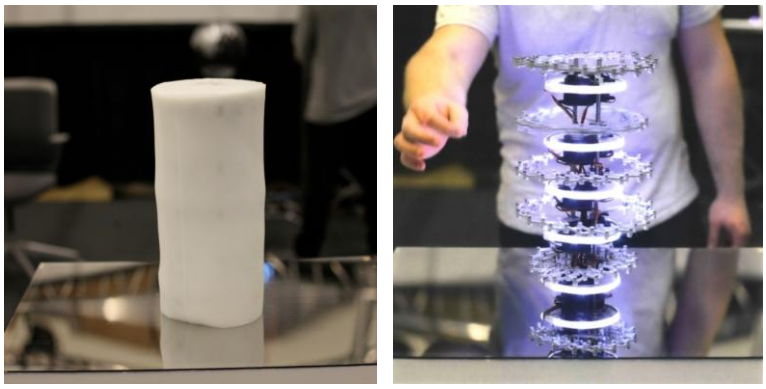
L'idée d'une interface cylindrique à changement de forme lisible à 360 degrés pour l'aide à la maîtrise de l'énergie fut déjà émise par Wu (2010) avec la Weather Lamp. La Weather Lamp est conçue comme une pile modulaire d'anneaux extensibles illuminés (appelés Tangible Visualization Modules, TVM), mais le prototype est resté au stade de la conception des anneaux. L'objectif de la Weather Lamp est d'afficher des données météorologiques, mais Wu ne précise pas lesquelles, ni comment elles seraient représentées. De plus, le contour des anneaux proposés forme un cercle discontinu, ce qui atténue la lisibilité à 360 degrés (voir figure 17). Enfin, aucune étude utilisateur ne valide l'utilisation proposée.

Figure 17. Les anneaux extensibles illuminés (TVM) de Weather Lamp (Wu, 2010).



Amphorm est un autre exemple d'interface cylindrique à changement de symétrie de révolution qui ressemble à un vase (Lakatos, 2012). Une caméra capture le mouvement des mains et déclenche un changement en fonction du geste réalisé par l'utilisateur. Pour changer la forme du vase, recouvert d'une membrane en silicone, un squelette de cinq anneaux extensibles en aluminium constitue une tour de 33 cm de haut (voir figure 18). Le diamètre des anneaux peut s'agrandir de 14 cm à 19 cm. Conçus avec des jointures d'Hoberman (1991), les anneaux s'agrandissent vers une forme similaire à un anneau continu. Cependant, pendant l'agrandissement, les anneaux adoptent une forme d'étoile à 11 branches. Le squelette d'Amphorm n'a pas été conçu pour présenter des données ordinales et la forme intermédiaire en étoile limite la lisibilité des données à 360 degrés.

Figure 18. Amphorm et son squelette de cinq anneaux extensibles (Lakatos, 2012).



Dans la section suivante, nous présentons la conception d'un histogramme cylindrique à changement de forme fonctionnel. Cet histogramme utilise un nouveau mécanisme d'anneau extensible illuminé qui conserve une forme circulaire tout au long de son expansion. Nous proposons ensuite de visualiser, avec cet histogramme, des prévisions de disponibilité d'énergies renouvelables sur les espaces publics et collectifs.

5 UN NOUVEL AFFICHEUR À CHANGEMENT DE FORME

Depuis le néolithique, des monticules de pierres sont érigés par les hommes comme mémoriels et comme repères pour marquer des points d'intérêt tel que le sommet d'une montagne (Ashmore, 1980 ; CAIRN., 1911 ; Tilley, 2004). Ces constructions de pierres sont communément appelées des « cairns » (du gaélique écossais « càrn », apparenté au breton « karn ») et présentent plus ou moins une symétrie de révolution selon les cas (p. ex., figure 19).

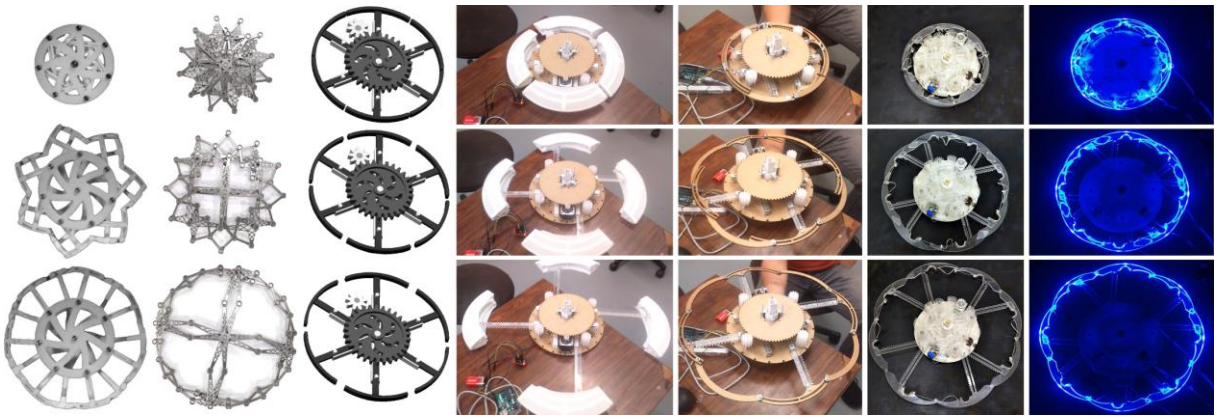
Figure 19. Un « cairn » d'une forme plus ou moins symétrique.

Inspiré par cet usage millénaire des pierres, nous proposons CairnFORM, une interface avec changement de symétrie de révolution capable d'adopter la forme de différents « cairns » grâce à une pile modulaire d'anneaux extensibles illuminés.

5.1 Implémentation

Pour concevoir un anneau empilable, extensible et illuminé nous avons suivi un processus de conception en plusieurs étapes de Daniel et al. (2018), illustrées figure 20. L'objectif de conception était d'aboutir à un anneau extensible qui puisse doubler son diamètre tout en maintenant un contour similaire à un cercle continu et régulier tout au long du mouvement d'extension. Une contrainte forte était de conserver un espace intérieur fixe suffisant pour y loger l'électronique de contrôle (p. ex., moteur, capteur, fils). Trois mécanismes d'anneaux extensibles nous ont inspirés. Tout d'abord, le mécanisme basé sur le principe d'Hoberman (1991) (a)(b), comme utilisé par Amphorm (Lakatos, 2012). L'inconvénient de ce mécanisme est qu'à mi-transformation le contour de l'anneau devient une étoile. Puis, un autre mécanisme basé sur des arcs adjacents (c), comme utilisé pour les TVM (Wu, 2010). L'inconvénient est alors les espaces qui apparaissent entre les arcs au fil de l'extension. Nous avons itéré en trois principales étapes, en commençant par un anneau à quatre bras et quatre arcs (d), puis un anneau à quatre bras et huit arcs dont quatre sont coulissants (e). Le glissement des arcs coulissants était en revanche inconstant, ne garantissant pas le maintient d'un contour circulaire, voire risquant de bloquer et casser des éléments. Nous avons donc conçu un mécanisme à huit bras et huit arcs superposés (f). Ce mécanisme en PMMA transparent est alors illuminé par réflectance interne de LEDs placées sur la tranche interne des arcs (g).

Figure 20. Six mécanismes d'anneaux extensibles : (a) HobermanRing-7points, (b) HobermanRing-12points, (c) DiscontinuousRing-6arms-6arcs, (d) DiscontinuousRing-4arms-4arcs, (e) IrregularRing-4arms-8arcs, (f) RingLike-8arms-8arcs et (g) RingLike-8arms-8arcs illuminé.

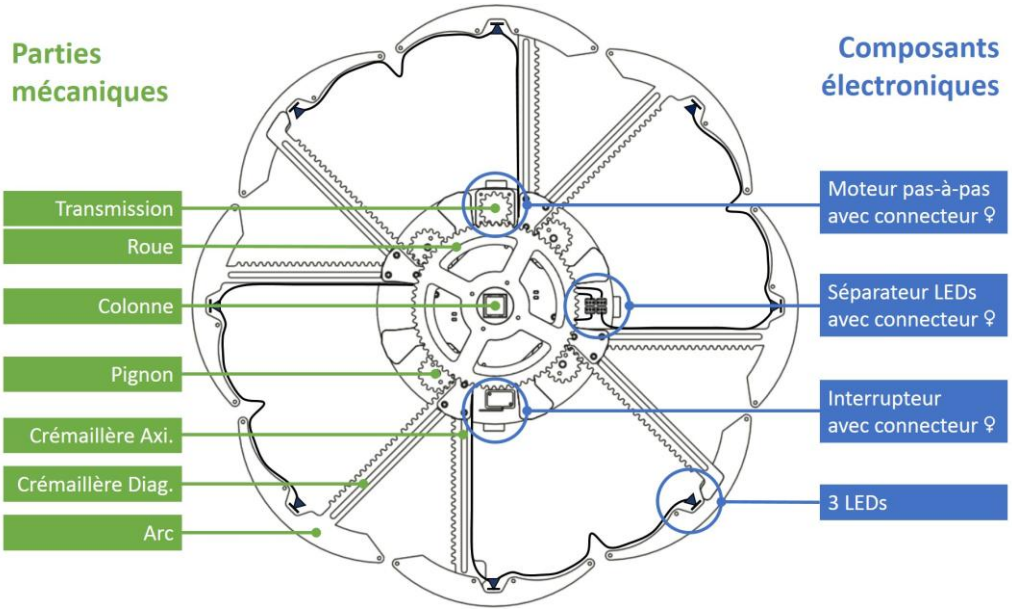


(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g)

Ce prototype d'anneau pèse 2,3 kg et nécessite deux jours/homme de fabrication : 4 heures de découpe laser, 5 heures d'impression 3D, 4 heures de câblage électronique et 4 heures d'assemblage. L'anneau est construit autour d'une colonne centrale, qui permet de

rendre l'anneau empilable et de faire passer la gaine de fils. Un moteur pas-à-pas TRINAMIC QSH4218-41-10-035, muni d'un engrenage de transmission, entraîne une roue dentée, qui elle-même entraîne quatre pignons. Chaque pignon entraîne une crémaillère axiale et une crémaillère diagonale. Au bout de chaque crémaillère, un arc représente un huitième d'anneau. Lorsque l'anneau est complètement rétracté, les arcs forment un anneau de 35 cm de diamètre. Lorsque l'anneau est complètement étendu, les arcs forment un contour similaire à un anneau de 62 cm de diamètre. Un capteur de fin de course détecte la rétraction complète de l'anneau. L'anneau est illuminé par 24 LEDs NeoPixel RGB (trois LEDs collées derrière chaque arc) divisées en quatre bandes à l'aide d'un séparateur. Chaque bande est soudée à une nappe de fils électriques, elle-même collée aux crémaillères. La colonne centrale est fabriquée en PLA par impression 3D. Les autres parties sont en PMMA transparent, découpées par découpe laser et assemblées avec de l'acétone. Les parties restantes sont principalement des pièces de support en bois contre-plaqué, découpées par découpe laser. Les pièces sont assemblées avec des vis, des écrous, des rondelles et de la colle à chaud. Le schéma technique de l'anneau est présenté figure 21 et le modèle CAO est disponible en téléchargement[13].

Figure 21. Modèle CAO de notre mécanisme à huit bras et huit arcs.



Par la suite, nous avons usiné et empilé 10 anneaux extensibles illuminés pour constituer un prototype de CairnFORM à 10 anneaux (illustré figure 22). Ce prototype est contrôlé par un nano-ordinateur Raspberry Pi 3. Ce Raspberry Pi 3 communique avec 5 bonnets Adafruit pour moteur pas-à-pas via un bus I²C, chaque bonnet contrôlant deux moteurs pas-à-pas (c.-à-d. deux anneaux). Pour détecter lorsque l'anneau est fermé, le Raspberry Pi 3 communique via GPIO avec un bonnet Adafruit perma-proto HAT sur lequel sont soudées 10 résistances de tirage (une par interrupteur mécanique, c.-à-d. par anneau). Pour contrôler les LEDs, le Raspberry Pi 3 communique par port série avec une carte Arduino Mega 2560 à 10 sorties PWM (une par séparateur LEDs, c.-à-d. par anneau). Le pilote de CairnFORM, écrit en Python 2.7, s'exécute sur le Raspberry Pi 3. Il implémente quatre classes Python et utilise des processus légers et des files d'évènements permettant de contrôler les anneaux en série ou en parallèle. Le pilote utilise également un serveur MQTT qui permet de transformer CairnFORM en objet connecté, ce qui permet de lui envoyer des requêtes sur IP depuis le réseau wifi. Le code source du pilote est disponible en

[13] Modèle CAO :
https://cad.onshape.com/documents/7d4ecae370a1e03250f148cc/w/40919688efd268263900abc1/e/6c37dd97791037a37d7dd39b

téléchargement[14] sous licence GPL. Le matériel et les composants logiciels utilisés pour contrôler un CairnFORM à 10 anneaux sont schématisés figure 23.

Figure 22. Un CairnFORM à 10 anneaux.

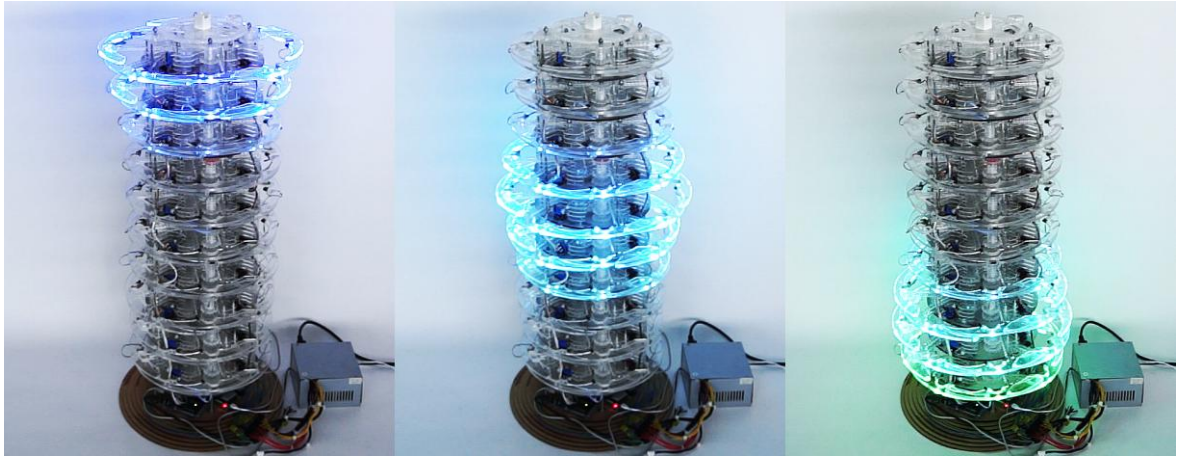
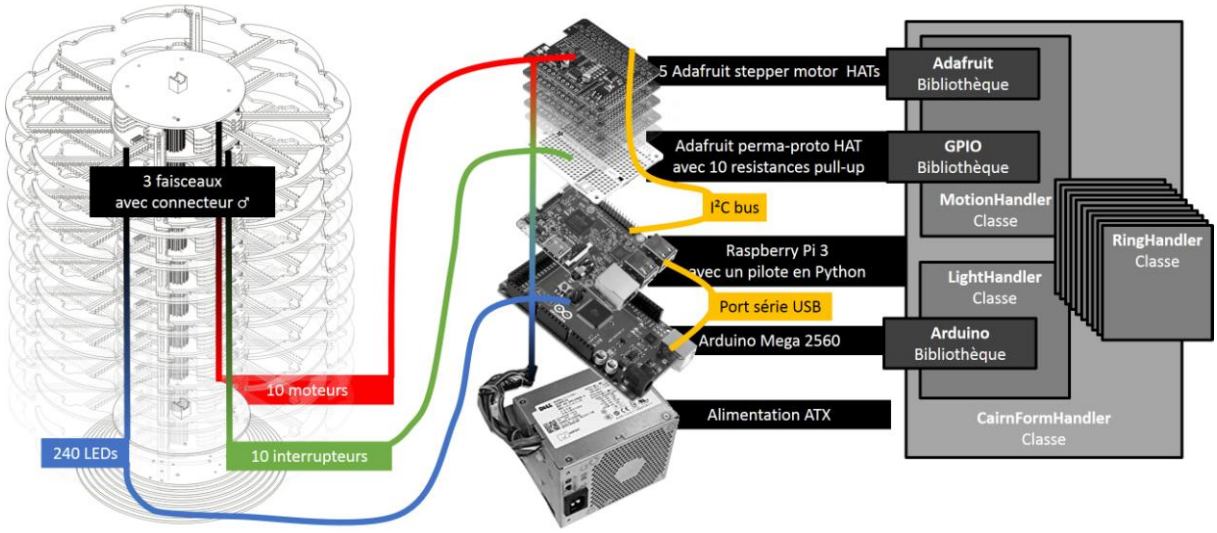


Figure 23. Éléments matériels et logiciels pour contrôler un CairnFORM à 10 anneaux.



5.2 Capacité, limitations et coût de fabrication

La couleur et la luminosité de chaque anneau est spécifiée par une valeur sur 24 bits (trois composantes rouge, vert et bleu de 1 octet). Chaque anneau peut se mouvoir en 250 pas de 1,08 millimètres. Notre prototype rencontre cependant plusieurs limitations telles que le facteur d'agrandissement : les anneaux peuvent seulement atteindre un diamètre 1,8 fois supérieur au diamètre initial (de 35 cm à 62 cm) ; le bruit du mouvement : l'actionnement d'un anneau génère 60 dB à une distance de 1 mètre (avec un moteur en mode double bobines sous une tension de 5 V et une vitesse de rotation de 60 tr.min^{-1}) ; la consommation d'énergie : dans le pire des cas, un CairnFORM à 10 anneaux tire 122 W (jusqu'à 72 W pour 240 LEDs ; jusqu'à 50 W pour 10 moteurs) ; et le coût de fabrication : une pile de 10 anneaux coûte 2000€ de matériaux pour usiner les anneaux ainsi que 50€ pour fabriquer le socle et 300€ d'électronique de contrôle.

[14] Pilote de CairnFORM : https://github.com/maximedaniel/CairnFORM

6 AFFICHER LES PREVISIONS DE DISPONIBILITE DES ENERGIES RENOUVELABLES

Parmi les cinq systèmes interactifs précédemment identifiés permettant aux utilisateurs de comparer les prévisions de disponibilité des énergies renouvelables, nous nous désintéressons de Tariff Agent (Alan et al. 2016) qui présente les données sous forme d'une matrice de nombres. Les quatre autres systèmes, FORE-Watch (Schrammel et al., 2011), Conversation WashMachine (Bourgeois et al., 2014), eForecast (Kjeldskov et al. 2015), Tiree Energy Pulse (Simm et al., 2015), permettent aux utilisateurs de comparer les prévisions de disponibilité des énergies renouvelables selon quatre granularités temporelles : toutes les minutes de la prochaine heure (Schrammel et al., 2011), toutes les heures restantes de la journée (Schrammel et al., 2011 ; Costanza et al., 2014), toutes les heures des 12 prochaines heures (Kjeldskov et al., 2015), ou toutes les heures des 24 prochaines heures (Costanza et al., 2014). Pour visualiser ces prévisions d'énergie renouvelable, ces systèmes utilisent des visualisations de données, exclusivement graphiques, telles que des diagrammes à frises chronologiques linéaires (figures 24a et 24b) ou circulaires (figures 24a et 24c) et des diagrammes à courbes (figures 24b, 24c et 24d).

Figure 24. Quatre systèmes interactifs qui visualisent des prévisions d'énergie renouvelable.

(a) FORE-Watch (b) Conversation WashMachine

(c) eForecast (d) Tiree Energy Pulse

Nous avons choisi de représenter les prévisions par des données ordinales, pour deux raisons principales. Les diagrammes à courbes et les diagrammes à barres (p. ex., un histogramme) sont tous deux des visualisations de données efficaces pour discriminer des discontinuités dans des séries temporelles de données (Telea, 2014), telles que les heures

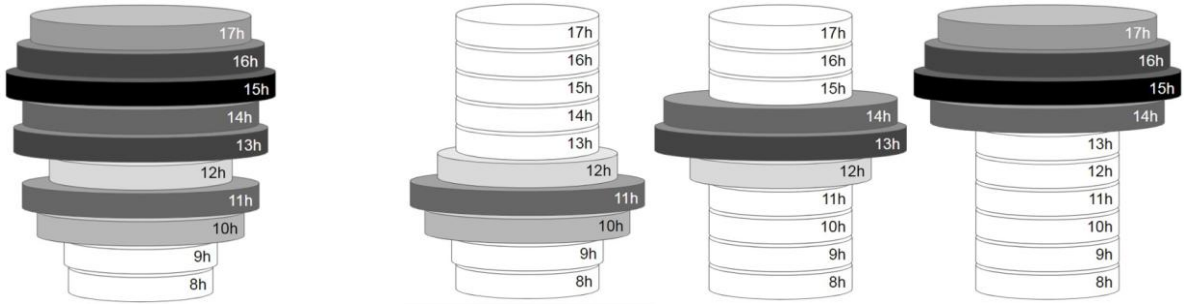
de pics d'énergie renouvelable. En revanche, pour appliquer des consignes, mémoriser des plages horaires simples, heure par heure, sera plus facile que minute par minute (p. ex., débrancher de 15h à 16h, plutôt que débrancher de 15h18 à 16h23). De plus, la fiabilité des prévisions de production étant encore perfectible, des données moyennées sur des heures pleines seront plus fiables et donneront plus de confiance dans le système. Ainsi, pour ces deux raisons, nous avons fait le choix d'utiliser CairnFORM pour afficher un histogramme visualisant heure par heure les prévisions d'énergie renouvelable de la journée de travail (8h-17h59).

Pour s'assurer que les utilisateurs seront en mesure d'appliquer le jeu de consignes précédemment défini (cf. section 2.3) sur un tel histogramme, nous avons réalisé une étude préliminaire avec des impressions sur papier.

6.1 Visualiser unes à unes les variations des heures à venir de la journée de travail

Pour appliquer les consignes, les utilisateurs doivent pouvoir localiser les variations et retrouver les pics de production. Au travers de trois études préliminaires avec 21 participants au total (8 femmes, 13 hommes), nous avons compris qu'il serait difficile que tous les pics d'énergie renouvelable soient retrouvés sur un histogramme à symétrie de révolution visualisant toutes les variations d'énergie renouvelable de la journée de travail (figure 25a) : la plupart des participants ont seulement identifié l'heure du plus grand pic (l'anneau le plus large et le plus sombre du maximum global) à défaut des heures des autres pics, plus faibles (les maxima locaux). En revanche, les participants devraient retrouver tous les pics d'énergie renouvelable en visualisant les variations les unes après les autres (figure 25b) : tous les participants ont identifié l'heure de pic de chaque variation, correspondant à chaque fois à l'anneau le plus large et le plus sombre. En conséquence, pour tirer profit de chaque variation, nous avons choisi de filtrer les données de disponibilité d'énergie renouvelable pour afficher les variations une à une (voir figure 25b), au fil de l'avancée de la journée de travail.

Figure 25. Deux façons de visualiser les variations avec un histogramme.



(a) Toutes à la fois. (b) Unes à unes.

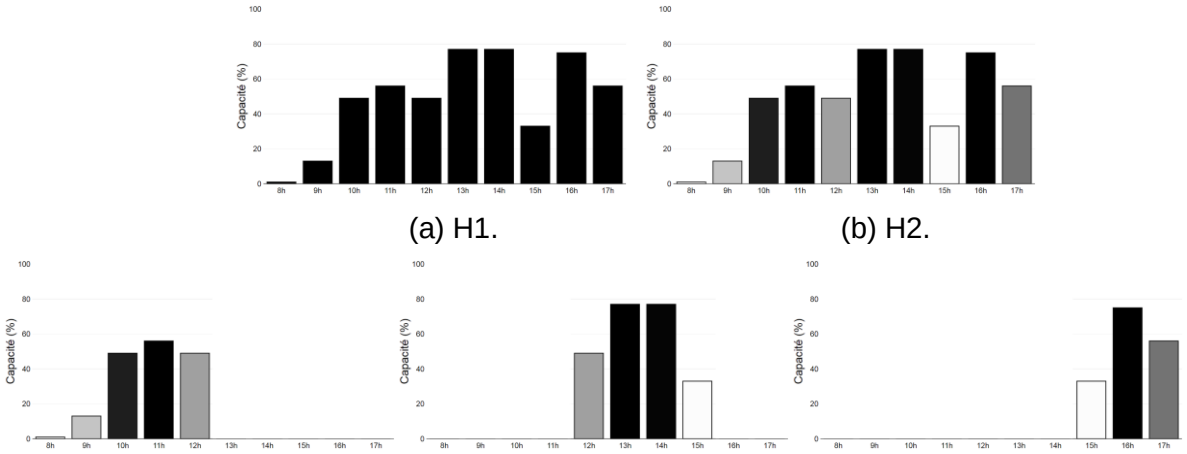
Nous avons conduit cette étude préliminaire sur des histogrammes à barres verticales et avons réitéré avec trois versions d'histogrammes :

- H1 : Un histogramme à barres verticales visualisant les prévisions d'énergie renouvelable pour la journée de travail.
- H2 : Le même histogramme H1 avec un gradient de blanc à noir pour chaque heure en fonction de la distance au pic de la variation, afin de mettre en évidence le pic de chaque variation.
- H3 : Le même histogramme H2, avec un affichage variation par variation, afin d'isoler le pic de chaque variation.

Pour chacune de ces études pilotes, les participants disposaient d'une série d'histogrammes, imprimés sur feuille A4, visualisant les données de quatre journées. Les visualisations des données de la première journée, avec les trois versions d'histogramme, sont présentées sur la figure 26. Les participants devaient effectuer une tâche inspirée d'une

des trois tâches élémentaires de recherche d'information (Jansen et al., 2013) : cocher les heures des pics d'énergie renouvelable de la journée de travail (T_comparaison).

Figure 26. Visualisation d'une des quatre journées avec les trois versions d'histogramme.



(a) H1. (b) H2.

(c) H3.

Lors de la première itération avec H1 (3 femmes, 4 hommes), la majorité des participants (5 sur 7) ont identifié un pic d'énergie renouvelable comme la ou les heures les plus hautes de la journée (P5 : « J'ai considéré les trois ou quatre heures les plus hautes de la journée comme un pic. »). Or, il peut y avoir plusieurs variations d'énergie renouvelable dans une journée de travail et donc plusieurs pics d'énergie renouvelable, comme relevé par un participant (P2 : « De temps en temps, il y a des pics locaux. »). Lors de la deuxième itération avec H2 (3 femmes, 4 hommes), à nouveau, certains participants (3 sur 7) ont identifié un pic d'énergie renouvelable comme la ou les heures les plus hautes de la journée (P2 : « J'ai choisi à l'aide de la hauteur de la barre. »). Néanmoins, la couleur a aidé certains participants à identifier des pics d'énergie renouvelable qu'ils n'auraient pas identifié sinon (P1 : « Sur l'histogramme C, on voit bien qu'il y a un pic un peu intermédiaire et s'il n'était pas en noir, franchement, je ne l'aurais pas mis. »). Lors troisième itération avec H3 (2 femmes, 5 hommes), tous les participants ont identifié tous les pics d'énergie renouvelable.

Les participants ont échoué à retrouver tous les pics d'énergie renouvelable en visualisant toutes les variations de la journée de travail à la fois (avec H1 et H2), alors qu'ils ont réussi à visualiser tous les pics quand les variations sont présentées une à une (avec H3). Nous considérons que ce résultat obtenu sur des histogrammes horizontaux à barres est généralisable aux histogrammes verticaux à anneaux. Ce résultat nous conduit ainsi à visualiser unes à unes les variations d'énergies renouvelables à venir pendant la journée de travail avec CairnFORM.

Nous avons réalisé deux expérimentations utilisateur avec le prototype, en relation avec la mise en œuvre des consignes et le déploiement dans des bureaux au quotidien. La première expérimentation, conduite pendant un événement public, a évalué la « capacité » de mettre les consignes en pratique, en vérifiant que le prototype permet de retrouver l'heure de début, l'heure de pic et l'heure de fin de la variation d'énergie renouvelable. La deuxième expérimentation a évalué l'« opportunité » de mettre les consignes en pratique, en vérifiant que le prototype permet de prévenir de l'arrivée d'une variation d'énergie renouvelable dans un lieu de travail comme un bureau ou un plateau de bureaux ouverts (open-space). Le lieu de travail est un espace social destiné aux activités professionnelles. Il est important de notifier sans interrompre ou perturber. En condition de laboratoire, nous avons évalué le taux de réussite des notifications ainsi que la quiétude des utilisateurs.

7 EXPERIMENTATION 1 : RETROUVER DES PICS DE PRODUCTION

Les 1 et 2 décembre 2017, nous avons déployé un CairnFORM à 10 anneaux pendant un événement public, la 11e édition des « 24h de l'innovation® »[15] à Biarritz, France, accueillant 2000 participants et visiteurs Pendant l'événement, nous avons visualisé tour-à-tour trois variations avec des amplitudes et des durées différentes. Pour chaque anneau, nous avons imprimé en 3D quatre étiquettes de l'heure associée à l'anneau et collé chaque étiquette tous les 90 degrés. Le diamètre et la luminosité de chaque anneau est proportionnelle à la capacité moyenne de production d'énergie renouvelable du bâtiment (en pourcentage) pendant l'heure associée : pour une capacité de production d'énergie renouvelable entre 0 W et max W, 0 W est représenté par un anneau éteint et complètement fermé et max W est représenté par un anneau complètement illuminé en bleu et totalement déployé.

Pour chaque variation, nous avons évalué l'utilisabilité des histogrammes avec symétrie de révolution pour les trois tâches de Jansen et al. (2013) adaptées à notre cas d'application (présentées ci-dessous). De plus, nous avons reçu des retours sur l'expérience utilisateur véhiculée par un histogramme avec symétrie de révolution affiché avec CairnFORM.

7.1 Participants

Au total 90 participants ont été recrutés parmi les visiteurs. Les 90 participants ont effectué les trois tâches et étaient répartis en trois groupes de même taille. Un jeu de données différent était assigné à chaque groupe. Les caractéristiques de l'échantillon sont présentées sur la pyramide des âges de la figure 27 :

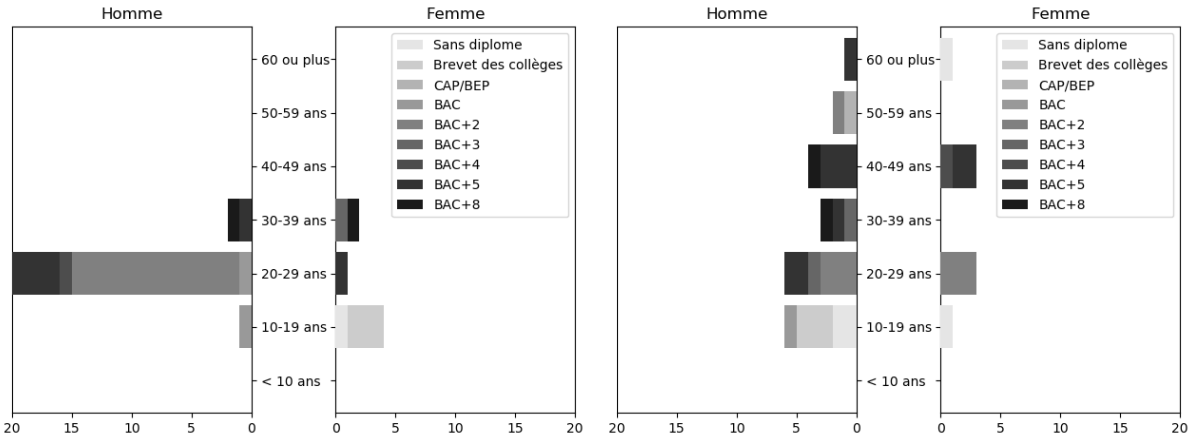
- G1 : 8 femmes, 22 hommes, Md 20-29 ans, Md Bac+3 ;
- G2 : 7 femmes, 23 hommes, Md 20-29 ans, Md Bac+2 ;
- G3 : 8 femmes, 22 hommes, Md 20-29 ans, Md Bac+2.

7.2 Installation

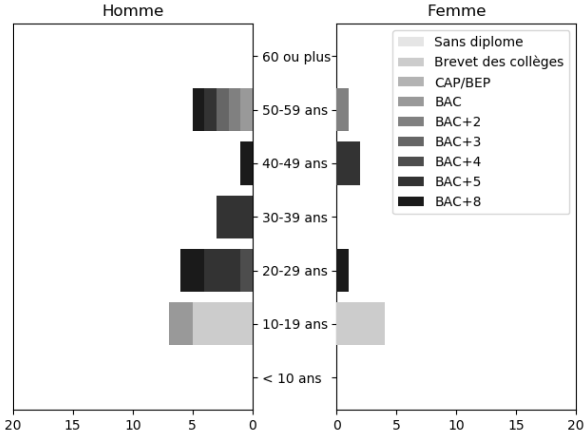
Le plan d'installation est illustré par la figure 28. CairnFORM était posé sur une table à 1 mètre du bord. En face de CairnFORM et posés sur la même table, trois posters A3 illustraient l'utilité de CairnFORM (c.-à-d. représenter les données de manière identique à 360 degrés sur les espaces collectifs et publics, p. ex., des données prévisionnelles sur la production d'énergie renouvelable). À gauche de CairnFORM, se trouvaient des panneaux verticaux sur lesquels des feuilles A3 illustraient plusieurs contextes d'usage de CairnFORM (c.-à-d. sur un rond-point, dans une gare et dans un hall d'entrée). À droite de CairnFORM, se trouvait une autre table sur laquelle étaient posés des questionnaires, des sucreries et l'ordinateur contrôlant CairnFORM par connexion SSH en wifi. Les visiteurs étaient interpellés par un instructeur pour leur présenter CairnFORM et leur proposer de participer à l'expérimentation.

[15] http://24h.estia.fr

Figure 27. Pyramide de population des trois groupes.

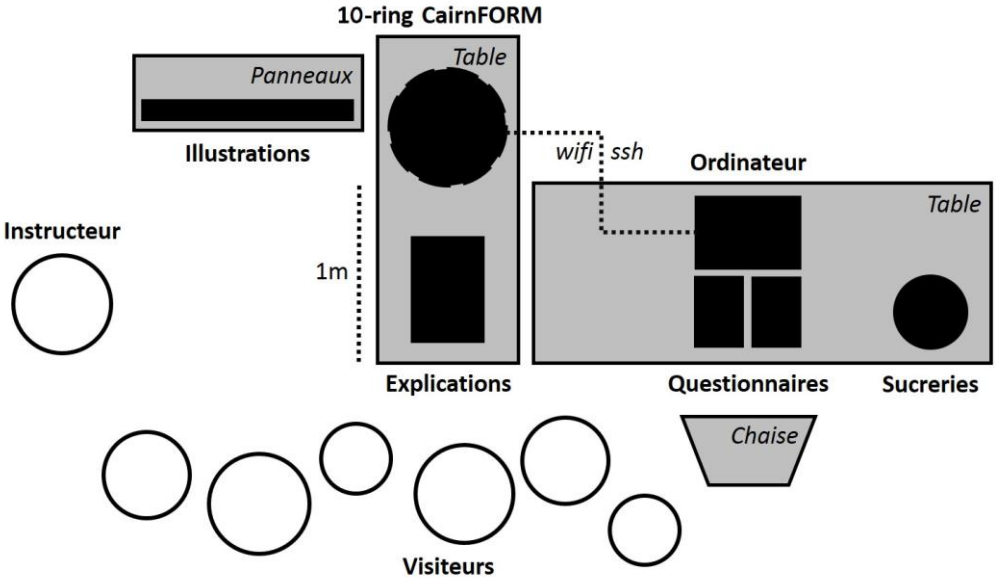


(a) G1. (b) G2.



(c) G3.

Figure 28. Vue du dessus de l'environnement expérimental.

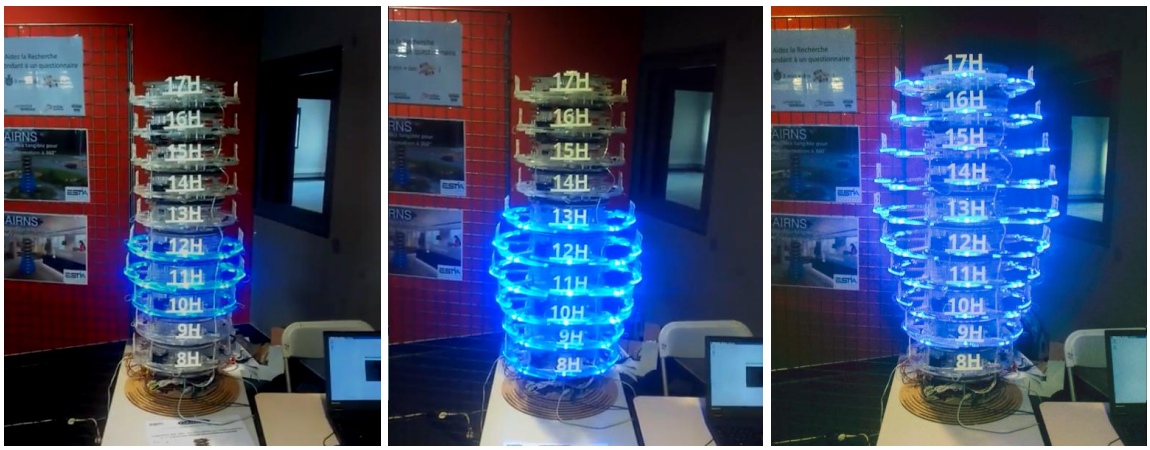


7.3 Modalités

Pendant l'évènement, nous avons visualisé plusieurs variations de données avec une amplitude et une durée différente. Nous avons choisi des données synthétiques de manière à ce que la différence minimale entre le diamètre des anneaux soit de 1 cm : c'était l'opportunité d'évaluer si une granularité de 1 cm de diamètre (c.-à-d. échelle de valeurs sur 30 points) n'empêche pas les utilisateurs d'accomplir des tâches élémentaires de recherche d'information à 1 m de distance de l'interface. Dans l'ordre suivant, nous avons visualisé trois variations, en photos sur la figure 29, chacune associée à un groupe de participant, dont les amplitudes et les durées étaient les suivantes :

- V_3h (G1) : variation de 10h00 à 12h59 avec un pic à 11h00 ;
- V_6h (G2) : variation de 8h00 à 13h59 avec un pic à 11h00 ;
- V_9h (G3) : variation de 9h00 à 17h59 avec un pic à 13h00.

Figure 29. CairnFORM, utilisé comme un histogramme, visualisant trois variations avec différentes durées et amplitudes, pendant un évènement public (les « 24h de l'innovation ® », Biarritz, France).



(a) V_3h. (b) V_6h. (c) V_9h.

7.4 Tâches

Au quotidien sur le lieu de travail, les employés feront face à un CairnFORM affichant un histogramme visualisant une à une des variations d'énergie renouvelable avec des amplitudes et des durées différentes. Sur cet histogramme, l'utilisateur doit être en mesure de retrouver l'heure de début et de fin de la variation d'énergie renouvelable (c.-à-d. une « tâche d'intervalle ») et l'heure de pic de la variation d'énergie renouvelable (c.-à-d. une « tâche de comparaison ») afin de décaler la charge de son ordinateur portable. Nous étudions donc ces deux types de tâches, ainsi que, de sorte à étudier les histogrammes physiques d'une manière plus générale, une tâche d'ordonnancement.

Pour chaque variation, 30 participants ont effectué les trois tâches élémentaires de recherche d'information de Jansen et al. (2013), que nous avons adaptées à nos données :

- T_intervalle : donner l'heure de début et de fin de la variation d'énergie renouvelable (p. ex., de 9h00 à 17h59 pour la figure 28c) ;
- T_comparaison : indiquer l'heure de pic de la variation d'énergie renouvelable (p. ex., à 11h00 pour la figure 28b) ;
- T_ordre : trier les heures de la variation d'énergie renouvelable pour ordre croissant de la production d'énergie renouvelable (p. ex., 10h00, 12h00 et 11h00 pour la figure 28a).

7.5 Procédure

Les visiteurs s'arrêtant devant CairnFORM ou interpellés par l'instructeur ont reçu des explications orales sur l'utilité et les contextes d'usage de CairnFORM en s'appuyant sur les supports présents. Puis, ils ont été invités à participer à l'expérimentation. Les visiteurs qui

ont accepté de participer à l'expérimentation ont effectué les tâches sur un questionnaire imprimé sur feuille A4 contenant également des questions sur leur expérience avec l'artefact et des questions démographiques (sexe, âge, dernier diplôme obtenu). De plus, les participants pouvaient écrire leurs commentaires sur le questionnaire. Nous avons également pris note des observations et des commentaires formulés à l'oral par les participants. Tout les 30 participants, l'histogramme était mis à jour pour visualiser une variation d'énergie renouvelable avec une amplitude et une durée différente.

7.6 Mesures et questionnaires

Pour estimer l'expérience utilisateur (UX), nous avons utilisé le questionnaire standardisé UEQ-S (Schrepp et al., 2017). Pour estimer l'utilisabilité, nous avons mesuré le taux de réussite des participants pour T_intervalle, T_comparaison et T_ordre et recueilli les observations et les commentaires des participants.

7.7 Outils

Pour le traitement des données (c.-à-d. les scores du questionnaire UEQ-S et le taux de réussite des tâches), les statistiques descriptives, les tests statistiques et la visualisation des résultats, nous avons utilisé Python 2.7 avec cinq bibliothèques : NumPy, Pandas, SciPy, StatsModels et Matplotlib. Les statistiques descriptives utilisées sont deux critères de position (la moyenne et la médiane) et quatre critères de dispersion (l'écart-type, les quartiles, le minimum et le maximum). Les deux tests statistiques utilisés pour les données qualitatives nominales (c.-à-d. la réussite des trois tâches) sont le test du χ^2 lorsque trois groupes sont à comparer et le test exact de Fisher lorsque deux groupes sont à comparer. Les deux tests statistiques utilisés pour les données qualitatives ordinales (c.-à-d. les réponses au questionnaire UEQ-S) sont le test de Kruskal-Wallis lorsque trois variables sont à comparer et le test de tendance de Cochran-Armitage lorsque deux variables.

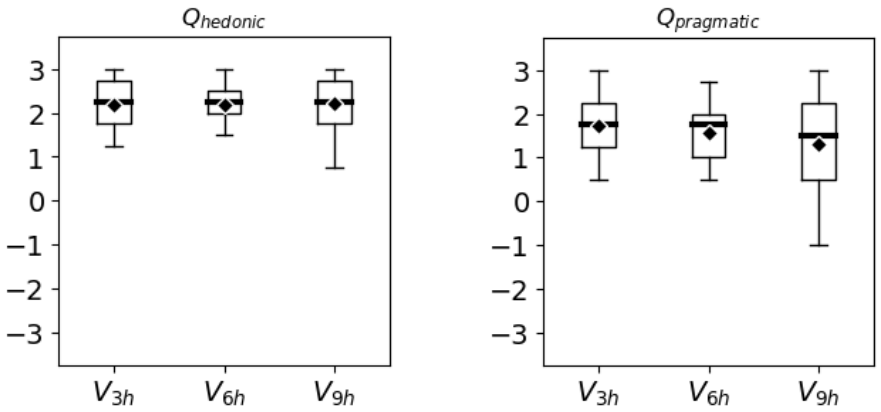
7.8 Résultats

Les sous-sections suivantes décrivent les résultats des réponses données au questionnaire UEQ-S, les taux de réussite aux trois tâches élémentaires de recherche d'information, ainsi que les commentaires majeurs ou récurrents des utilisateurs.

7.8.1 Qualité hédoniste et pragmatique de l'artefact

Sur l'échelle de -3 pts à 3 pts du questionnaire UEQ-S, les participants ont donné un score moyen de 2,25 pts pour Q_hédoniste toutes variations confondues et un score moyen de 1,67 pts pour Q_pragmatique toutes variations confondues. L'amplitude et la durée de la variation n'a pas eu d'effet significatif sur les scores donnés par les participants pour Q_hédoniste et pour Q_pragmatique (illustrés par les diagrammes en boîte de la figure 30).

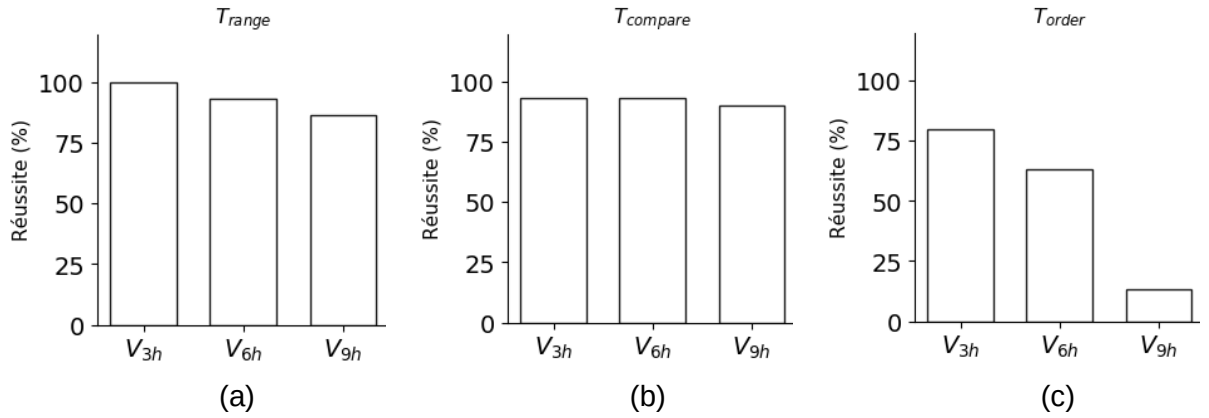
Figure 30. Scores donnés pour les deux qualités mesurées par le questionnaire UEQ-S.



7.8.2 Réussite des tâches

Les participants ont accompli T_intervalle et T_comparaison avec plus de 90 % de réussite en moyenne (respectivement 93,3 % et 92,2 %). L'amplitude et de la durée de la variation n'a pas eu d'effet significatif sur la performance des participants pour T_intervalle et T_comparaison (avec respectivement p=0,12 et p=0,85). Cependant, la performance des participants pour T_ordre est significativement différente entre les variations : le taux de réussite pour V_9h est significativement plus faible que pour V_6h (p=0,001) et que pour V_3h (p=0,001). Au final, le taux de réussite moyen pour T_ordre est seulement de 52,2 %. Les taux de réussites des trois tâches, sur les trois variations, sont illustrés figure 31.

Figure 31. Taux de réussite pour les trois tâches élémentaires de recherche d'information.



7.8.3 Retours des utilisateurs

Les commentaires positifs écrits et oraux des participants montrent que l'histogramme de CairnFORM est hédoniste (p. ex., P7 : « Plaisant. », P23 : « Esthétique et avant-gardiste. », P58 : « Exquis. ») et pragmatique (p. ex., P10 : « [CairnFORM] étant lisible à 360 degrés, il est utile notamment pour les personnes à mobilité réduite. »).

Nous avons principalement identifié quatre commentaires négatifs récurrents :

- C1 : Neuf participants (10 %) ont rapporté qu'il était difficile de percevoir la différence de luminosité entre les anneaux (P16 : « C'est difficile de voir la différence de luminosité [entre les anneaux]. ») : Lorsque l'anneau est fermé/ouvert, les arcs sont complètement/partiellement superposés. Plus les arcs en PMMA transparent sont superposés, plus la lumière voyage d'un arc à un autre par les arrêtes des arcs. Un participant nous a suggéré d'utiliser le changement de couleur plutôt que le changement de luminosité (p. ex., P16 : « Vous devriez changer la couleur plutôt que la luminosité [des anneaux]. »).
- C2 : Cinq participants (5,6 %) ont déclaré qu'il était difficile de distinguer la différence de diamètre entre les anneaux (p. ex., P54 : « Parfois la différence de diamètre entre les anneaux n'est pas évidente, p. ex., entre 11:00 et 12:00 [de la variation 2] ») : Il semble qu'une granularité de 1 cm de diamètre soit trop petite pour être perçue. Un participant nous a suggéré d'augmenter cette granularité (P45 : « Vous devriez amplifier la différence de diamètre [entre les anneaux]. »).
- C3 : À première vue, un participant pensait que CairnFORM était une horloge (P61 : « Est-ce que c'est une horloge ? ») et un autre participant pensait qu'il s'agissait d'une sorte de compte à rebours (type sablier) pour l'évènement public (P59 : « Je pensais que c'était un décompte jusqu'à la fin de l'évènement. »).
- C4 : Un participant nous a conseillé de changer la couleur des anneaux de bleu à vert qui appelle plus aux énergies renouvelables (P33 : « Changez la couleur [des anneaux] en vert. Le vert est plus associé aux énergies renouvelables que le bleu. »).

7.9 Discussion et optimisation du prototype

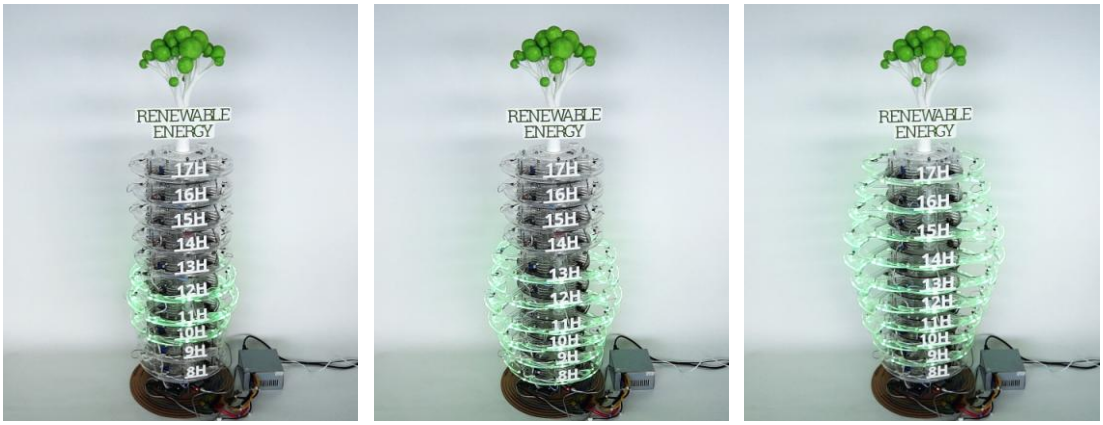
Pour appliquer des consignes permettant d'améliorer la propreté énergétique, CairnFORM doit être utilisable pour retrouver les variations et les pics de production. De plus, pour aller au-delà de comportement individuels et adopter de telles pratiques au niveau social, CairnFORM doit être un dispositif attractif et plaisant, favorisant les échanges et les discussions. Nous discutons maintenant les attributs de visualisation de CairnFORM, son attractivité et son utilisabilité pour la recherche d'information.

7.9.1 Attributs de visualisation de CairnFORM

Concernant le commentaire C1 sur la luminosité, nous avons choisi de conserver le changement de couleur pour encoder ultérieurement les données sur la charge des ordinateurs portables des employés. Pour répondre au commentaire C2 sur la distinction, nous avons décidé dans un premier temps de diminuer la granularité du diamètre des anneaux en passant de 1 cm à 2 cm (c.-à-d. d'une échelle de valeurs de 30 points à 15 points). De nouvelles études prenant en compte l'acuité visuelle à des distances différentes devraient être conduites pour déterminer des granularités possibles selon les distances d'observation.

Pour prendre en considération les commentaires C3 et C4 sur la symbolique de CairnFORM, nous avons changé la couleur des anneaux du bleu au vert et nous avons imprimé un modèle 3D d'un arbre et le texte « Renewable Energy » que nous avons ajouté au-dessus du dernier anneau pour faire office de légende aux données encodées les anneaux (voir figure 32).

Figure 32. Les nouveaux attributs pour mieux symboliser les énergies renouvelables.



7.9.2 Atouts pour l'attractivité sur lieux publics

D'après les auteurs du questionnaire UEQ-S (Schrepp et al., 2017), les scores moyens obtenus signifient que CairnFORM véhicule une « excellente » qualité hédoniste et une « bonne » qualité pragmatique dans son contexte d'usage, c'est-à-dire afficher un histogramme vertical avec symétrie de révolution pour visualiser une variation d'énergie renouvelable de la journée de travail. Ces valeurs sont des atouts pour favoriser l'attractivité de CairnFORM sur lieux publics ouverts et maintenir l'intérêt des utilisateurs au quotidien (p. ex., dans un bureau).

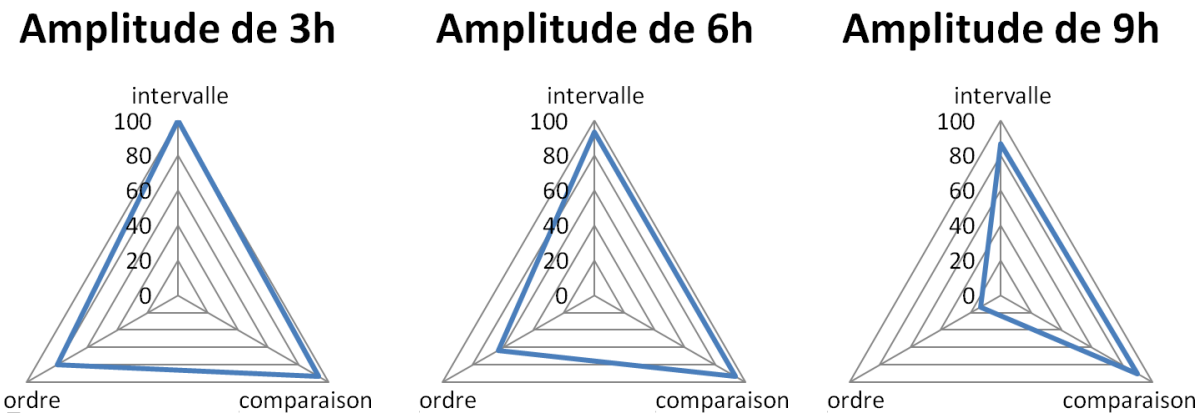
7.9.3 Utilisabilité pour la recherche d'information

Les taux de réussite de cette expérimentation montrent que les histogrammes verticaux avec symétrie de révolution sont utilisables pour les tâches d'intervalle et les tâches de comparaison sur des variations d'amplitudes et de durées différentes. Ce résultat confirme l'utilisabilité de CairnFORM pour mettre en œuvre les consignes de décalage de la consommation d'énergie.

De plus, nos résultats étendent ceux de Jansen et al. (2013), tout en les confirmant. Ces auteurs ont montré, en observant la vitesse de réalisation des tâches, que la réalisation de la tâche d'intervalle avec un histogramme physique est plus performante que celle de la tâche de comparaison, qui est elle même plus performante que celle de la tâche d'ordonnancement. Nous obtenons la même relation d'ordre en observant, cette fois-ci, le taux de réussite des tâches (et non la vitesse). De plus, alors que Jansen et al. (2013) ont comparé deux interfaces pour trois tâches sur un seul jeu de données, nous avons comparé avec une interface les trois tâches pour trois jeux de données de complexité croissante. Là encore, nous identifions clairement une meilleure performance pour la tâche d'intervalle par rapport aux deux autres.

Nous avons également observé un nouveau phénomène, plus la variation à observer est grande, plus les taux de réussite de la tâche d'ordonnancement sont mauvais (voir figure 33). Ces mauvais taux semblent liés à la tâche. Nous émettons l'hypothèse que la cause est la limite de capacité de traitement de l'information (Miller, 1956). Comparer chaque valeur, sur les deux pentes, avant et après le pic demande beaucoup de comparaisons visuelles tout en se souvenant des valeurs déjà comparées, ce qui devient vite très difficile. Des expérimentations focalisées sur ce point restent à conduire pour confirmer cette observation.

Figure 33. Diagrammes de Kiviat des taux de réussite de chaque tâche pour le jeu de données.



8 EXPERIMENTATION 2 : NOTIFIER DES CHANGEMENTS

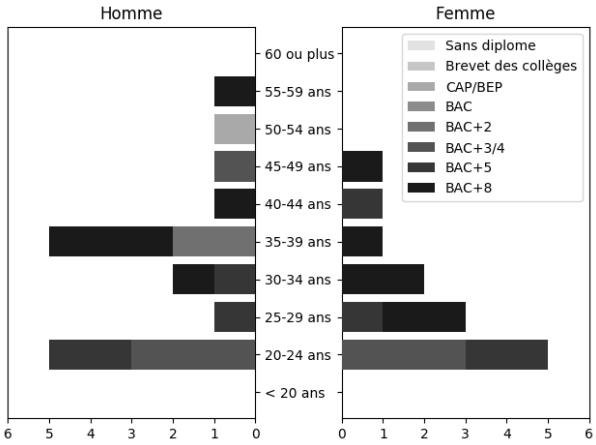
Les variations de disponibilité des énergies renouvelables étant affichées les unes après les autres, les utilisateurs devront être notifiés de la fin d'une variation et de l'arrivée de la variation suivante, par exemple dans un bureau ou sur un plateau de bureaux. Le passage d'une variation à l'autre doit être perceptible, mais sans interrompre ou agacer au quotidien. Nous avons conduit une expérimentation afin d'évaluer le changement du diamètre des anneaux comme stimulus de notification. D'après Tynan et Sekuler (1982), la vitesse affecte la perception du mouvement dans le champ de vision périphérique : une vitesse lente (p. ex., 4 degrés/seconde) engendre un temps de perception du mouvement plus élevé qu'une vitesse rapide (p. ex., 16 degrés/seconde). En relation avec la vitesse, nous pensons que l'accélération joue un rôle dans la subtilité du mouvement en périphérie de l'attention. Nous avons réalisé une étude en condition de laboratoire dans laquelle nous avons étudié l'interaction périphérique des utilisateurs avec l'expansion et la rétraction d'un CairnFORM à 1 anneau pour une vitesse avec une accélération nulle, une accélération exponentielle et une accélération logarithmique. En plus de la mesure des taux de réussite, nous avons évalué la quiétude des participants.

8.1 Participants

Les 30 participants (13 femmes, 17 hommes, Md 30-34 ans, Md Bac+5) ont été recrutés au sein de notre laboratoire, de notre service administratif et de notre campus. L'expérimentation a été conduite pendant une semaine, aux moments où les participants

étaient disponibles. Les caractéristiques de l'échantillon sont présentées sur la pyramide des âges de la figure 34.

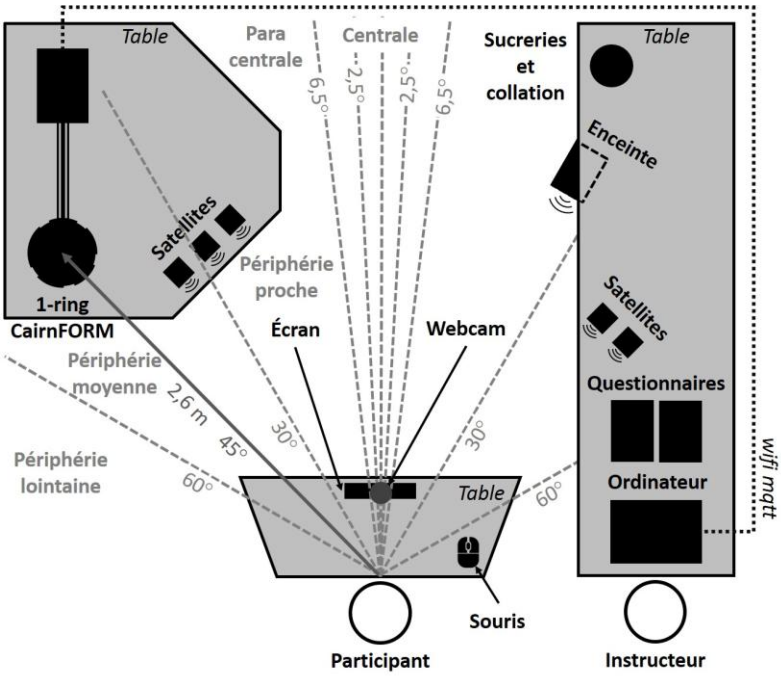
Figure 34. Pyramide de population des participants.



8.2 Installation

Le plan d'installation est illustré par la figure 35. Chaque participant était assis sur une chaise à 50 cm d'un écran d'ordinateur posé sur une table. Une caméra était fixée sur le dessus de l'écran. Le participant devait ajuster la hauteur de la chaise pour que son regard soit au niveau de la caméra. L'anneau était positionné à 2,6 m du participant, au milieu du champ de vision périphérique moyen gauche du participant (c.-à-d. un angle de 45 degrés vers la gauche lorsque l'on regarde le centre de l'écran). La vision périphérique moyenne est la région qui couvre de 30 degrés à 60 degrés de chaque côté du champ de vision humain (Gutwin et al., 2017) et qui définit la limite entre la vision périphérique proche et la vision périphérique lointaine. À 2,6 m du participant, le diamètre de l'anneau couvre 7 degrés du champ de vision lorsque l'anneau est complètement rétracté (la région de 41,5 degrés à 48,5 degrés) et 14 degrés lorsqu'il est complètement étendu (la région de 38 degrés à 52 degrés), ainsi l'anneau ne quitte jamais la vision périphérique moyenne.

Figure 35. Vue du dessus de l'environnement expérimental.



Pour déclencher le mouvement de l'anneau à distance, un serveur MQTT Mosquitto (Light, 2017) est installé sur le Raspberry Pi 3 de l'anneau qui est également configuré pour être un point d'accès wifi (Hotspot). L'ordinateur utilisé pour l'expérimentation est connecté en wifi au Raspberry Pi 3. En utilisant un client MQTT, l'ordinateur envoie un message au Raspberry Pi 3 qui déclenche le mouvement de l'anneau correspondant au message reçu.

Pour l'expérimentation, les participants devaient détecter le mouvement de l'anneau seulement avec la vue. Afin de réduire le bruit émit par le mouvement de l'anneau, nous avons utilisé une mousse que nous avons posé en dessous de l'anneau pour absorber les vibrations, ce qui a réduit le bruit de 60 dB à 50 dB (mesure répétée à 1 m de l'anneau avec trois applications sur smartphone et tablette). Pour masquer le bruit restant, les participants portaient un casque anti-bruit d'un affaiblissement de 30 dB SNR et un jeu d'enceintes 5.1, disposés autour du participant, diffusait du bruit blanc. Le bruit blanc était activé uniquement lors des tâches, il restait éteint lorsque des instructions étaient données ou que l'utilisateur complétait un questionnaire.

8.3 Modalités

Pour cette expérimentation, nous avons exploré deux types de mouvement :

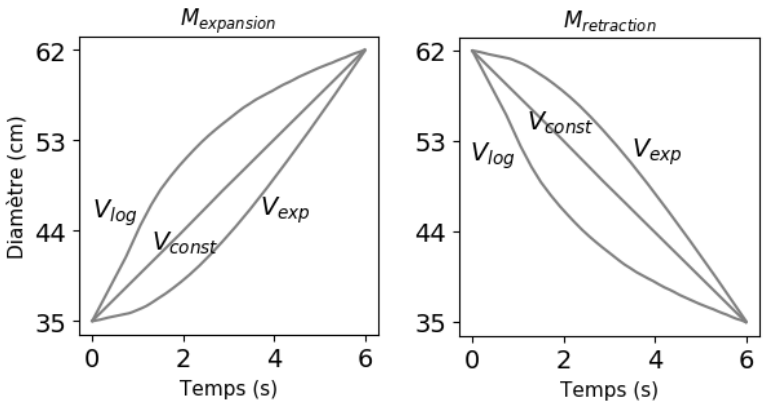
- M_expansion : le diamètre de l'anneau augmente de 35 cm à 62 cm en 6 s ;
- M_rétraction : le diamètre de l'anneau diminue de 62 cm à 35 cm en 6 s ;

Pour chaque type de mouvement, nous avons utilisé trois vitesses différentes :

- V_const : la vitesse du mouvement est constante dans le temps ;
- V_exp : la vitesse du mouvement est exponentielle dans le temps ;
- V_log : la vitesse du mouvement est logarithmique dans le temps.

La figure 36 illustre les trois vitesses pour les deux types de mouvement au cours du temps.

Figure 36. Expansion et rétraction du diamètre d'un anneau en 6 secondes selon les trois vitesses, constante, exponentielle et logarithmique.



8.4 Tâches

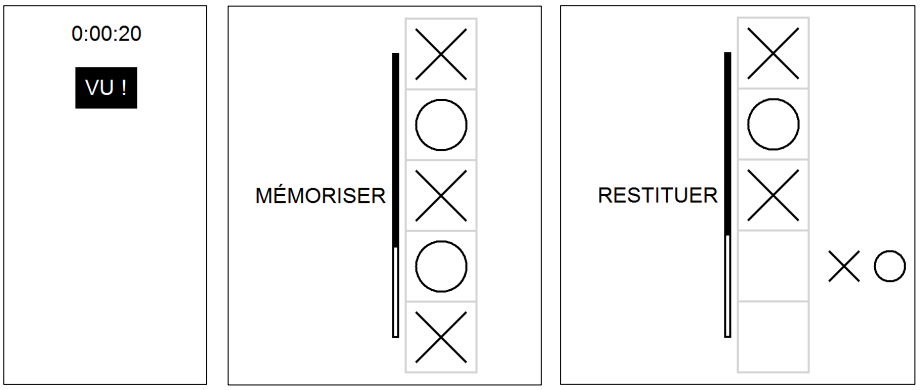
Pour cette expérimentation, nous avons conçu deux tâches :

- T_détection : une tâche de détection périphérique avec le centre de l'attention. Nous avons conçu une première tâche pour évaluer la détection du mouvement de l'anneau avec la vision périphérique de l'utilisateur. Un bouton est affiché au milieu de l'écran. La tâche démarre lorsque l'utilisateur clique sur le bouton à l'aide du pointeur de la souris. Un compte à rebours et un bouton apparaissent en haut de l'écran pendant 25 secondes, comme montré par la capture d'écran de la figure 37a. L'utilisateur doit fixer son regard sur le compte à rebours et cliquer sur le bouton lorsqu'il détecte un mouvement de l'anneau avec la vision périphérique. Un mouvement est déclenché

aléatoirement entre la 5e et la 15e seconde après le début de la tâche. La tâche se termine après 25 secondes ou plus tôt si le bouton est cliqué.

- T_perception : une tâche de perception périphérique avec la périphérie de l'attention. Nous avons conçu une seconde tâche pour évaluer la perception du mouvement de l'anneau en périphérie de l'attention de l'utilisateur pendant qu'il effectue une tâche principale au centre de l'attention. La tâche principale permet de distraire l'utilisateur et d'éloigner son attention de l'anneau (Hausen et al., 2014). La tâche principale fait appel à la mémoire à court terme de l'utilisateur (c.-à-d. type de mémoire qui permet de retenir et de réutiliser une quantité limitée d'informations pendant un temps relativement court, environ 30 s). Une séquence de N symboles (croix et ronds) est affichée verticalement à l'écran pendant 2N secondes, comme montré par la capture d'écran de la figure 37b. Une fois que la séquence a disparu, l'utilisateur doit reproduire la séquence, symbole par symbole. Toutes les 2 secondes, l'utilisateur doit restituer le prochain symbole de la séquence en cliquant sur la croix ou le rond affichés à droite de l'écran, comme montré par la capture d'écran de la figure 37c. La tâche se termine après 2N secondes.

Figure 37. La tâche de vision périphérique (a) et la tâche de mémorisation à court terme (b) (c).



(a) (b) (c)

8.5 Procédure

Dans un premier temps, le contexte de l'étude fût expliqué au participant qui, par la suite, dût signer un questionnaire de consentement informé. Pendant 45 min, le participant a successivement traversé deux phases :

- T_détection est présenté au participant. Le participant s'entraîne en effectuant la tâche une première fois. Ensuite, pour chaque vitesse, le participant effectue la tâche six fois (trois M_expansion et trois M_rétraction) et complète un questionnaire.
- T_perception est présentée au participant. Le participant s'entraîne en effectuant la tâche une première fois. Ensuite, le participant effectue la tâche plusieurs fois jusqu'à ce qu'il échoue à restituer un symbole (l'anneau reste immobile). À chaque fois, la taille N de la séquence suivante augmente de un symbole. Enfin, pour chaque vitesse, le participant effectue la tâche sept fois (trois M_expansion, trois M_rétraction et une fois sans mouvement) avec des séquences de N=5 symboles et complète un questionnaire.

Effectuer tous les exercices d'affilée est fatiguant. La durée totale de passage pour chaque participant avoisinait 45 min. Avant de passer à la deuxième phase, le participant a été invité à boire un jus d'orange et manger des bonbons. Il était demandé aux participants de se concentrer sur l'écran et à ne pas regarder directement l'anneau. Nous avons utilisé un carré latin pour contrebalancer l'ordre des vitesses. Pour chaque participant, le même ordre a été répété dans les deux phases. À la fin de chaque phase, nous avons verbalement posé des questions au participant pour déterminer si oui ou non il avait ressenti une différence entre les vitesses.

8.6 Mesures et questionnaires

Pour la tâche T_détection, nous avons mesuré :

- Le temps de réaction : le temps écoulé entre le moment où le mouvement de l'anneau est déclenché et le moment ou l'utilisateur clique sur le bouton à l'écran avec la souris.
- Les mouvements manqués : le nombre de fois où l'utilisateur a échoué à cliquer sur le bouton à l'écran avec la souris alors qu'il y avait un mouvement de l'anneau.
- Les mouvements hallucinés : le nombre de fois où l'utilisateur a cliqué sur le bouton à l'écran avec la souris alors qu'il n'y avait pas un mouvement de l'anneau.
- Les mouvements regardés : le nombre de fois où l'utilisateur a regardé l'anneau alors qu'il y avait un mouvement de l'anneau.

Pour la tâche T_perception, nous avons mesuré :

- La taille maximale : la taille de la plus grande séquence que l'utilisateur a réussi à restituer.
- Les symboles manqués : le nombre de fois où l'utilisateur n'a pas sélectionné un symbole.
- Les symboles erronés : le nombre de fois où l'utilisateur a sélectionné le mauvais symbole.
- Les mouvements regardés : le nombre de fois où l'utilisateur a regardé l'anneau alors qu'il était en mouvement.

À la fin de T_perception, les participants devaient répondre à deux questions affichées à l'écran avec la souris :

- Avez-vous perçu un mouvement de l'anneau ? Oui/Non.
- Si oui, quel type de mouvement avez-vous perçu ? Une expansion/Une rétraction/Je ne sais pas.

Pour chaque phase et pour chaque mouvement, nous avons demandé au participant de remplir un questionnaire imprimé sur feuille A4. Le questionnaire incluait des questions telles que « Comment était le mouvement de l'anneau avec cette vitesse ? De calme (1) à agressif (5) ». Nous avons également pris note des commentaires verbaux des participants.

8.7 Outils

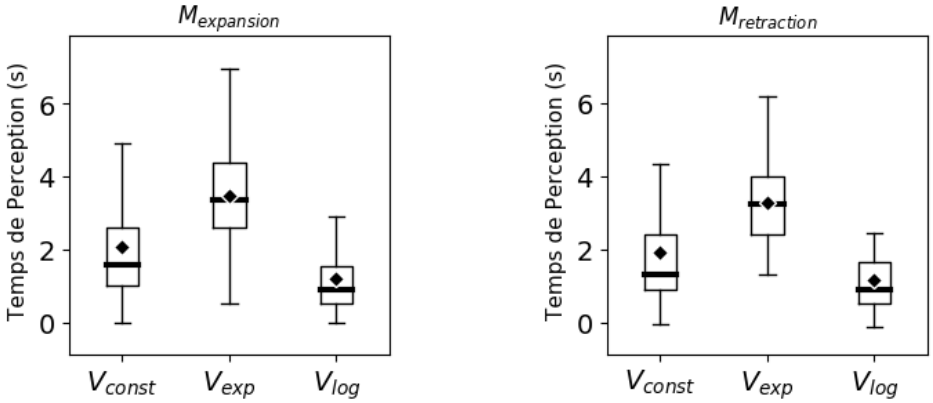
Face Reader 4 a été utilisé sur les enregistrements vidéo afin de détecter les regards des participants vers l'anneau alors que ce dernier était en mouvement. Manuellement, nous avons visionné les mouvements étiquetés par Face Reader pour valider ou non la présence d'un regard du participant vers l'anneau. Par la suite, nous avons retiré les temps de réaction des mouvements étiquetés comme « halluciné » ou « regardé » afin d'établir les mesures qu'à partir des mouvements d'anneau réellement détectés en vision périphérique. Puis, nous avons soustrait 200 ms à tous les temps de réaction (c.-à-d. le moment où le participant clique sur la souris) pour se rapprocher du temps de perception (c.-à-d. le moment où le participant perçoit le mouvement de l'anneau). 200 ms est le temps minimum dont le cerveau a besoin pour percevoir, traiter et réagir physiquement à un stimulus visuel : 150 ms de traitement visuel (Thorpe et al., 1996) et 50 ms de réaction musculaire pour des personnes en bonne santé (Radebold et al., 2000). Pour le traitement des données, les statistiques descriptives, les tests statistiques et la visualisation des résultats, nous avons utilisé Python 2.7 avec cinq bibliothèques : NumPy, Pandas, SciPy, StatsModels et Matplotlib. Les statistiques descriptives utilisées sont deux critères de position (la moyenne et la médiane) et quatre critères de dispersion (l'écart-type, les quartiles, le minimum et le maximum). Les deux tests statistiques utilisés pour les données quantitatives (p. ex., le temps de perception) sont une analyse de la variance (ANOVA) lorsque trois sont à comparer et le test de Student lorsque deux variables sont à comparer. Les deux tests statistiques utilisés pour les données qualitatives nominales (p. ex., la quantité de mouvements manqués) sont le test du χ^2 lorsque trois variables et le test exact de Fisher lorsque deux variables sont à comparer. Les deux tests statistiques utilisés pour les données qualitatives ordinales (p. ex., les réponses

aux questionnaires sur une échelle de Likert) sont le test de Kruskal-Wallis lorsque trois variables sont à comparer et le test de tendance de Cochran-Armitage lorsque deux variables sont à comparer.

8.8 Résultats

Les sous-sections suivantes décrivent les résultats pour les deux tâches de détection en vision périphérique (c.-à-d. avec le centre de l'attention) et de perception en vision périphérique (c.-à-d. avec la périphérie de l'attention). Dans la suite, les scores donnés par les utilisateurs, sur une échelle de Likert de dimension 5, ont été reportés entre -2 et 2. Le premier constat de cette évaluation est que les résultats obtenus sur les types de mouvement de l'anneau sont similaires, que ce soit dans un mouvement d'expansion (M_expansion) ou un mouvement de rétraction (M_rétraction) étaient similaires. À titre d'exemple, voir les temps de détection sur la figure 38. Le test d'ANOVA bivariée indique en effet que le type de mouvement n'a pas eut d'effet sur les temps de détection (p=0,28). Pour cette raison, les sous-sections suivantes décrivent les résultats de l'expérimentation seulement en fonction de la vitesse du mouvement de l'anneau (V_const, V_exp et V_log).

Figure 38. Temps écoulé à la détection avec le centre de l'attention, selon le type de mouvement.



(a) Expansion de l'anneau. (b) Rétraction de l'anneau.

8.8.1 Détection périphérique avec le centre de l'attention : T_détection

Les données sont disponibles sur 180 mouvements de V_const, 180 de V_log et 180 de V_exp. Les participants ont halluciné 10 fois des mouvements de V_const (5,6 %), 18 fois de V_log (10 %) et 10 fois de V_exp (5,6 %). Ils ont regardé l'anneau 12 fois pour V_const (6,7 %), 8 fois pour V_log (4,4 %) et 14 fois sur 180 de V_exp (7,8 %). Les données associées sont éliminées de la suite de l'analyse, afin d'établir les mesures qu'à partir des mouvements d'anneau réellement détectés en vision périphérique.

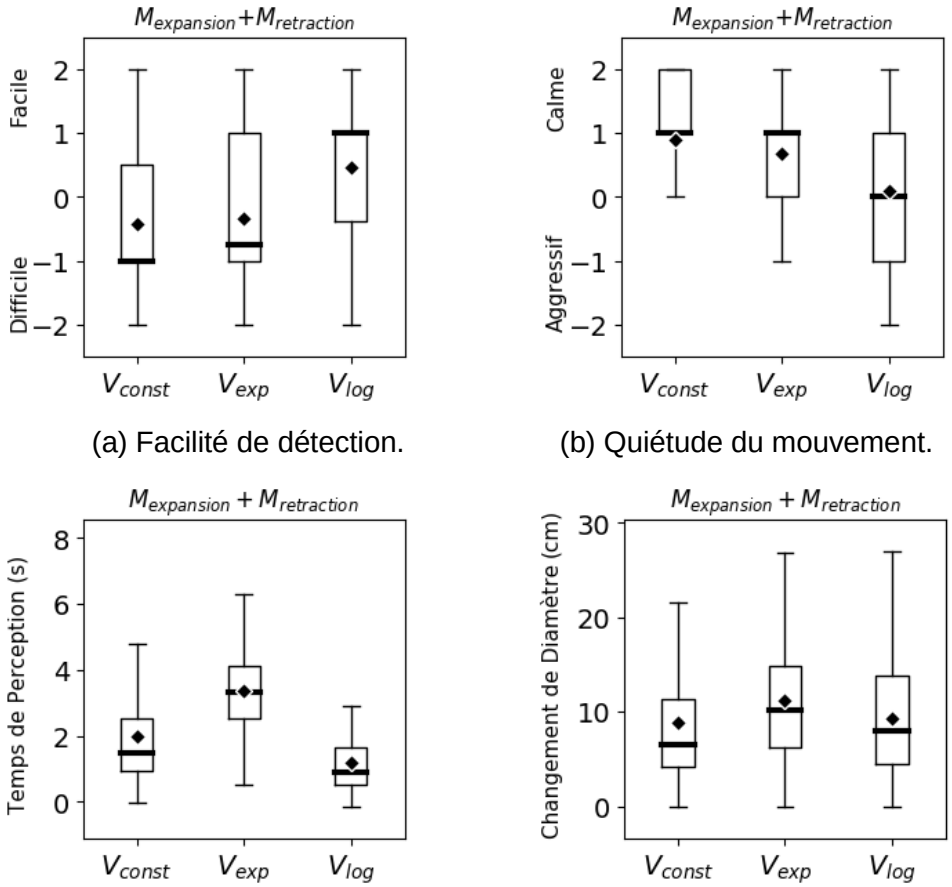
L'effet de la vitesse sur les taux de détection n'est pas statistiquement significatif (p=0,73). Les taux de réussite de la tâche T_détection sont élevés. Les participants ont détecté 93 % de V_const (147 sur 158), 94,8 % de V_log (146 sur 154) et 95,2 % V_exp (158 sur 166). Les réponses aux questionnaires indiquent cependant un effet de la vitesse sur la facilité de détection (p=0,01). Les participants ont considéré que V_log (Md 1 pt) était le plus facile à détecter, puis V_exp (Md -0,75 pts) et enfin V_const (Md -1 pt). V_log est considéré significativement plus facile à détecter que V_const (p=0,001) et V_exp (p=0,02). Les diagrammes en boîte des scores relevés par les questionnaires sont présentés sur la figure 39a.

La vitesse a eut un effet sur les temps de détection (p=0,001). Les participants ont plus rapidement détecté V_log (1,18±0,95 s), que V_const (1,99±1,49 s) et que V_exp (3,38±1,29 s). Toutes ces différences sont significatives (p=0,001). La vitesse a eut aussi un effet sur le changement de diamètre après lequel le mouvement était détecté (p=0,004). V_const

(8,92±6,40 cm) a été détecté après un changement de diamètre plus petit que V_log (10,57±5,54 cm) et que V_exp (10,58±6,47 cm). V_log et V_exp ont été significativement détecté après un même changement de diamètre (p=0,01). La figure 39c présente les diagrammes en boîte des temps de détection et la figure 39d présente ceux des changements de diamètre.

Enfin, la vitesse a eut un effet sur la quiétude des participants (p=0,03). Les participants ont évalué V_const et V_exp aussi calmes l'un que l'autre (tous deux à Md 1 pt) et V_log comme étant le moins calme (Md 0 pts). Les diagrammes en boîte des scores sur la quiétude sont présentés sur la figure 39b.

Figure 39. Scores et mesures pour la détection avec le centre de l'attention.



(a) Facilité de détection. (b) Quiétude du mouvement.

(c) Temps écoulé à la détection. (d) Distance parcourue à la détection.

8.8.2 Perception périphérique avec la périphérie de l'attention : T_perception

Pour cette seconde tâche T_perception, les données sont également disponibles sur 180 mouvements de V_const, 180 de V_log et 180 de V_exp. Les participants ont halluciné 2 fois des mouvements de V_log (1,1 %) alors que l'anneau restait immobile, aucun de V_const et de V_exp, et ont regardé l'anneau 13 fois pour V_const (7,2 %), 7 fois pour V_log (3,8 %) et 13 fois pour V_exp (7,2 %). Les données associées sont éliminées de la suite afin d'établir l'analyse qu'à partir des mouvements d'anneau réellement détectés en vision périphérique.

La vitesse a eut un effet sur le taux de mouvements perçus (p=0,004). La perception des mouvements de V_exp (129 sur 167 ; 77,2 %) est significativement supérieure à celle de V_const (101 sur 167 ; 60,5 %) (p=0,002) et de V_log (115 sur 173 ; 66,5 %) (p=0,03). La vitesse a eut également un effet sur la facilité de la tâche (p=0,04). Alors que la tâche de restitution occupait le centre de leur attention, les participants ont considéré qu'il était plus

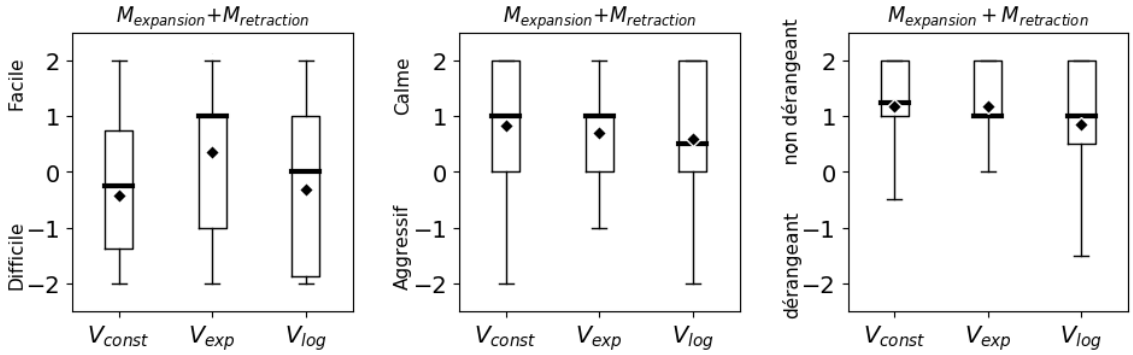
facile de percevoir V_exp (Md 1 pt) que V_const (Md -0,25 pts) et que V_log (Md 0 pts) en périphérie de l'attention. Les diagrammes en boîte des scores de facilité de perception sont présentés sur la figure 40a.

Cette fois, l'effet de la vitesse sur la quiétude n'est pas statistiquement significatif (p=0,54). Les participants ont cependant à nouveau évalué V_const et V_exp aussi calmes l'un que l'autre (tous deux à Md 1 pt) et plus calmes que V_log (Md 0,5 pts). Les diagrammes en boîte des scores sur la quiétude sont présentés sur la figure 40b.

L'effet de la vitesse sur la distraction des participants n'est pas statistiquement significatif (p=0,73). Les participants ont considéré que V_const était le moins dérangeant (Md 1,25 pts) et que V_exp et que V_log étaient aussi dérangeant l'un que l'autre (tous deux à Md 1 pt). Les diagrammes en boîte des scores sur la distraction sont présentés sur la figure 40c.

Enfin, les participants ont correctement restitué plus de 99,99 % des symboles (20 sur 2700). Les erreurs ont été commises 6 fois avec V_const, 6 fois avec V_log et 8 fois avec V_exp. 90 % des symboles erronés ont été sélectionnés par les 60 % de participants (20 sur 30) qui n'ont pas restitué correctement une séquence supérieure à 9 symboles.

Figure 40. Scores pour la perception avec la périphérie de l'attention.



(a) Facilité de perception. (b) Quiétude. (c) Distraction.

8.9 Discussion

Lors d'une première tâche, nous avons mesuré les temps de détection avec le centre de l'attention. Lors d'une seconde tâche, nous avons mesuré les taux de perception avec la périphérie de l'attention. Nous discutons maintenant le stimulus détecté par les utilisateurs, ainsi que le meilleur profil de vitesse pour notifier.

8.9.1 La vitesse comme stimulus

Les mouvements selon les trois vitesses V_const, V_log et V_exp ont été détectés à des moments différents, mais ont été détectés à des changements de diamètre sensiblement proches : en moyenne 8,92 cm à vitesse constante (33 % du mouvement), 10,57 cm pour à vitesse logarithmique (39 % du mouvement) et 10,58 cm à vitesse exponentielle (39 % du mouvement). Les changements de diamètre, en expansion et en rétraction, effectués au moment du temps de perception sont illustrés sur la figure 41. Cette observation suggère que, peu importe l'accélération, le stimulus détecté par l'utilisateur dans son champ de vision périphérique est le changement de taille. Ceci corrobore les conclusions de Graham (1965) et Kinchla (1976), selon lesquels un mouvement est détecté lorsque la cible s'est déplacée d'une distance critique dans le champ de vision humain. Dans notre cas, un changement de diamètre de 8,92 cm à 10,58 cm avec un anneau à 2,6 m représente de 2,31 degrés à 2,74 degrés du champ de vision humain (c.-à-d. de 1,16 degrés à 1,37 degrés de chaque côté de l'anneau). En conséquence, un mouvement avec une vitesse plus rapide atteindra plus vite la distance critique et sera plus rapidement perçu. En revanche, dans notre cas, la rapidité

de détection importe moins que le taux de réussite des notifications, pour accroître la propreté énergétique, et le ressenti de l'utilisateur, pour accepter le dispositif au quotidien. Nous analysons maintenant la meilleure vitesse pour notifier.

Figure 41. Changement de diamètre de l'anneau selon le temps de perception des participants.

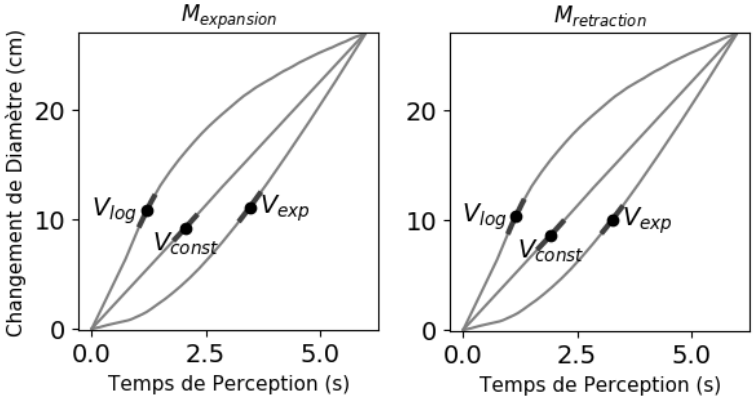
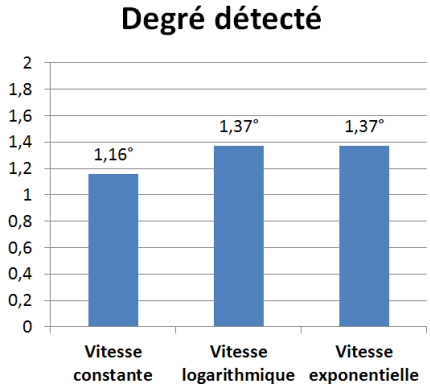


Figure 42. Changement perçu en degrés du champ de vision humain, de chaque côté de l'anneau.



8.9.2 Notifier les changements de variation

Nous venons de voir précédemment que, dans notre cas, la vitesse constante est perçue en premier. Cependant, en ce qui concerne le taux de notification et la facilité, les résultats sont, dans notre cas, en faveur d'une vitesse non constante.

D'un côté, les participants ont estimé être faiblement distraits par les mouvements de l'anneau (en moyenne 1,2 pts pour les trois vitesses) durant la tâche de restitution des séquences de symboles. De plus, la vitesse était sans effet sur la distraction. Même si nos anneaux peuvent réaliser les mêmes mouvements en parallèle en 3 secondes, nous avons choisi empiriquement une durée de 6 secondes pour tous les mouvements. D'autres durées, plus courtes ou plus longues, restent à étudier.

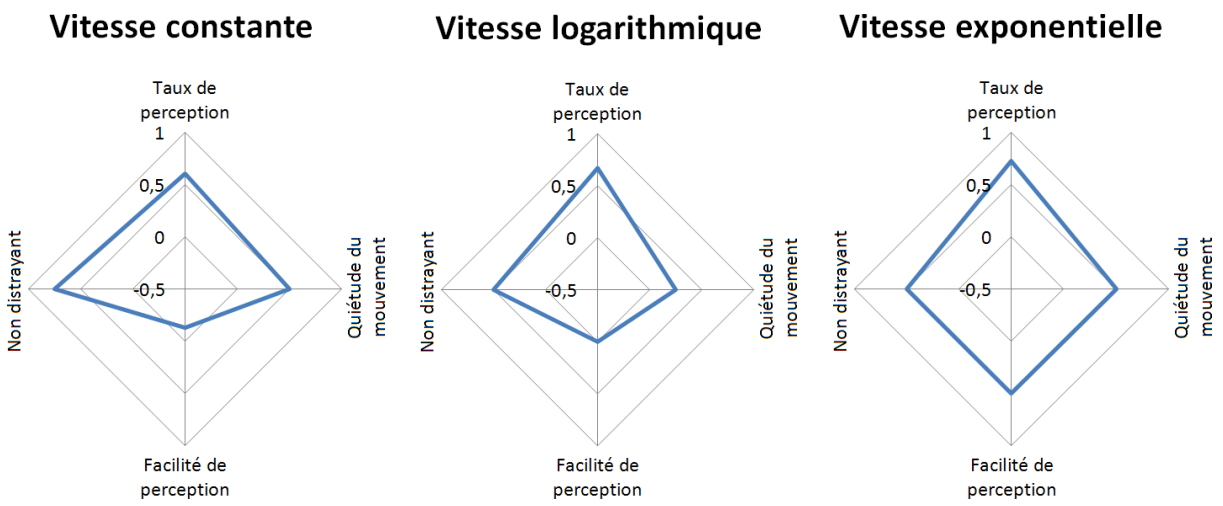
D'un autre côté, la vitesse a eut un effet sur la facilité de la tâche. Même si les différences ne sont pas toutes significatives, la vitesse constante a été évaluée la moins facile à détecter et à percevoir. En revanche, le choix entre les deux vitesses non-constantes semble dépendre de la tâche principale. Alors que la vitesse logarithmique a été jugée plus facile à détecter avec le centre de l'attention, c'est la vitesse exponentielle qui a été jugée plus facile à percevoir avec l'attention périphérique. Or, le test d'attention périphérique a été réalisé sur une seule tâche principale, de restitution de séquences de taille fixe de cinq symboles. Étendre à des tailles de séquences variables et à d'autres tâches principales, de niveaux de facilité et de concentration variables, comme celles proposées par Bailey et Konstan (2006), permettrai d'entériner le résultat : pour notre cas, la vitesse exponentielle est la plus appropriée.

Peu de mouvements furent manqués avec le centre de l'attention : le taux de détection moyen de détection est de 94,33 % pour les trois vitesses, la vitesse n'ayant pas d'incidence significative sur la réussite de la tâche. En revanche, la vitesse a eut une incidence sur le taux de perception avec la périphérie de l'attention. La vitesse exponentielle a surpassé la vitesse logarithmique de 5,7 points et la vitesse constante de 11,7 points. La différence entre les deux vitesses non constantes n'est cependant pas significative, mais au-delà de la performance, reste à examiner la quiétude des participants.

Un dispositif animé peut devenir agaçant au quotidien, surtout s'il perturbe, voire interrompt, des employés dans leur travail. Nous pensons que CairnFORM sera mieux accepté s'il est ressenti comme calme. Les statistiques indiquent un effet de la vitesse pour la première tâche de détection avec le centre de l'attention, mais pas pour la deuxième tâche de perception avec la périphérie de l'attention. Néanmoins, lors de ces deux tâches, la vitesse constante et la vitesse exponentielle ont été jugées comme les plus calmes, à égalité. Privilégier une vitesse constante plutôt qu'exponentielle ne semble donc pas justifiée dans notre cas.

Finalement, en raison de son meilleur taux de perception, et d'une quiétude équivalente à celle de la vitesse constante, les résultats sont, avec une tâche principale de restitution de symboles, en faveur de la vitesse exponentielle pour notifier sur un lieu de travail. Nous pensons qu'un meilleur taux de perception augmentera les opportunités de mettre en œuvre les pratiques de décalage de la consommation d'énergie. De plus, nous pensons que la quiétude des utilisateurs face au mouvement exponentiel favorisera l'acceptabilité au quotidien. Ces résultats sont synthétisés sur la figure 43.

Figure 43. Diagramme de Kiviat des différentes dimensions mesurées (normalisées) pour chaque vitesse.



9 CONCLUSION

Nous avons conçu un nouveau mécanisme d'anneau extensible illuminé et construit un prototype fonctionnel de diagramme cylindrique à changement de forme. Grâce à ces prototypes, nous avons conduit deux expérimentations qui ont produit trois résultats principaux. Tout d'abord, les taux de réussite de trois tâches élémentaires de recherche d'information ont été de 93,3 % pour la tâche d'intervalle, 92,2 % sur la tâche de comparaison et 52,2 % sur la tâche d'ordonnancement. Ensuite, sur des mouvements d'une durée de 6 secondes, le changement de taille critique détecté par les utilisateurs était de 8,92 cm pour une vitesse constante (33 % du mouvement) et respectivement de 10,57 cm et 10,58 cm pour la vitesse logarithmique et la vitesse exponentielle (39 % du mouvement), ce qui représente à 2,6 m de distance de 2,31 degrés à 2,74 degrés du champ de vision humain. Enfin, la vitesse exponentielle a obtenu le taux de perception le plus élevé (72,2 %), tout en étant considérée comme la plus calme avec la vitesse constante (toutes deux à 1 pt).

Ces résultats montrent que CairnFORM, une interface avec changement de symétrie de révolution capable d'adopter la forme de différents « cairns » grâce à une pile modulaire d'anneaux extensibles illuminés, est utilisable pour retrouver les variations et les pics de production d'énergie renouvelable. Ces résultats indiquent aussi que le changement de taille est vraisemblablement le stimulus perçu, plutôt que la vitesse du mouvement. De plus, nous pensons que la vitesse exponentielle, par son meilleur taux de perception et son bon niveau de quiétude, d'une part, augmentera les opportunités de mettre en œuvre les pratiques de décalage de la consommation d'énergie et, d'autre part, favorisera l'acceptabilité au quotidien de CairnFORM sur le lieu de travail. CairnFORM pourra ainsi contribuer à mettre en œuvre de nouvelles pratiques énergétiques en affichant des données de prévision de disponibilité des énergies renouvelables sur les micro-réseaux. Adopter de telles pratiques au niveau social permettra d'améliorer la propreté énergétique.

LES PERSPECTIVES D'APPLICATION DE CETTE RECHERCHE :

- ✓ **Étendre les résultats de perception périphérique à d'autres tâches**
- ✓ **Établir des recommandations pour notifier avec des interfaces à changement de forme**
- ✓ **Conduire des études longitudinales pour observer la mise en application des consignes**
- ✓ **Améliorer la propreté énergétique sur les espaces publics et collectifs**

Les travaux de recherche en cours expérimentent la mise en œuvre de cette nouvelle pratique énergétique en déployant CairnFORM pendant 2 mois dans des bureaux de type plateau de bureaux (open-space).

10 REFERENCES

- Alan, A. T., Costanza, E., Ramchurn, S. D., Fischer, J., Rodden, T., and Jennings, N. R. (2016). Tariff Agent: Interacting with a Future Smart Energy System at Home. ACM Trans. Comput.-Hum. Interact., 23(4):25:1–25:28.
- Ardito, C., Buono, P., Costabile, M. F., and Desolda, G. (2015). Interaction with Large Displays: A Survey. ACM Comput. Surv., 47(3):46:1–46:38.
- Ashmore, P. J. (1980). Low cairns, long cists and symbol stones. In Proceedings of the Society of Antiquaries of Scotland, volume 110, pages 346–55.
- Backlund, S., Gyllenswärd, M., Gustafsson, A., Ilstedt Hjelm, S., Mazé, R., and Redström, J. (2007). Static! The aesthetics of energy in everyday things. In Proceedings of the Design Research Society International Conference: Wonderground 2006, DRS '06, pages 109:1–109:14.
- Bailey, B. P. and Konstan, J. A. (2006). On the need for attention-aware systems: Measuring effects of interruption on task performance, error rate, and affective state. Computers in Human Behavior, 22(4):685–708.
- Bakker, S., van den Hoven, E., and Eggen, B. (2010). Design for the Periphery. In Proceedings of the Eurohaptics 2010 Symposium on Haptic and Audio-Visual timuli: Enhancing Experiences and Interaction, pages 71–80.
- Beyer, G., Alt, F., Müller, J., Schmidt, A., Isakovic, K., Klose, S., Schiewe, M., and Haulsen, I. (2011). Audience Behavior around Large Interactive Cylindrical Screens. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '11, pages 1021–1030, New York, NY, USA. ACM.
- Blackshaw, M., DeVincenzi, A., Lakatos, D., Leithinger, D., and Ishii, H. (2011). Recompose: Direct and Gestural Interaction with an Actuated Surface. In CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '11, pages 1237–1242, New York, NY, USA. ACM.
- Blevis, E. (2007). Sustainable Interaction Design: Invention & Disposal, Renewal & Reuse. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '07, pages 503–512, New York, NY, USA. ACM.
- Boff, K. R., Kaufman, L., and Thomas, J. P. (1986). Handbook of perception and human performance, volume 2. Wiley New York.

- Bolton, J., Wang, P., Kim, K., and Vertegaal, R. (2012). BodiPod: Interacting with 3D Human Anatomy via a 360◦ Cylindrical Display. In CHI '12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '12, pages 1039–1042, New York, NY, USA. ACM.
- Bourgeois, J., van der Linden, J., Kortuem, G., Price, B. A., and Rimmer, C. (2014). Conversations with My Washing Machine: An In-the-wild Study of Demand Shifting with Self-generated Energy. In Proceedings of the ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '14, pages 459–470, New York, NY, USA. ACM.
- Broms, L. (2011). Sustainable Interactions: Studies in the Design of Energy Awareness Artefacts. Licenciate thesis. Department of Computer and Information Science, Linköping University, Sweden.
- Broms, L., Katzeff, C., Bång, M., Nyblom, Å., Hjelm, S. I., and Ehrnberger, K. (2010). Coffee Maker Patterns and the Design of Energy Feedback Artefacts. In Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems, DIS '10, pages 93–102, New York, NY, USA. ACM.
- Brynjarsdóttir, H., Håkansson, M., Pierce, J., Baumer, E., DiSalvo, C., and Sengers, P. (2012). Sustainably Unpersuaded: How Persuasion Narrows Our Vision of Sustainability. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12, pages 947–956, New York, NY, USA. ACM.
- CAIRN. (1911). In Encyclopædia Britannica, volume 4, page 950. CUP, Cambridge, UK, 11th edition.
- Cano, G., Laurillau, Y., and Calvary, G. (2015). Persuasive Technology and Energy: critical analysis of the state of the art. Journal d'Interaction Personne-Système, 4(1):48–68.
- Casado-Mansilla, D., Lopez-de-Armentia, J., Garaizar, P., and López-de-Ipiña, D. (2014). To Switch off the Coffee-maker or Not: That is the Question to Be Energy-efficient at Work. In CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '14, pages 2425–2430, New York, NY, USA. ACM.
- Castelli, N., Stevens, G., Jakobi, T., and Schönau, N. (2016). Beyond Eco-feedback: Using Room as a Context to Design New Eco-support Features at Home. In Marx Gomez, J., Sonnenschein, M., Vogel, U., Winter, A., Rapp, B., and Giesen, N., editors, Advances and New Trends in Environmental and Energy Informatics: Selected and Extended Contributions from the 28th International Conference on Informatics for Environmental Protection, pages 177–195. Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
- Colley, J. A., Bedwell, B., Crabtree, A., and Rodden, T. (2013). Exploring Reactions to Widespread Energy Monitoring. In Proceedings of the 14th IFIP TC13 Conference on Human-Computer Interaction, INTERACT 2013, pages 91–108, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Costanza, E., Bedwell, B., Jewell, M. O., Colley, J., and Rodden, T. (2016). 'A Bit Like British Weather, I Suppose': Design and Evaluation of the Temperature Calendar. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16, pages 4061–4072, New York, NY, USA. ACM.
- Costanza, E., Fischer, J. E., Colley, J. A., Rodden, T., Ramchurn, S. D., and Jennings, N. R. (2014). Doing the Laundry with Agents: A Field Trial of a Future Smart Energy System in the Home. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '14, pages 813–822, New York, NY, USA. ACM.
- Costanza, E., Ramchurn, S. D., and Jennings, N. R. (2012). Understanding Domestic Energy Consumption through Interactive Visualisation: A Field Study. In Proceedings of the ACM Conference on Ubiquitous Computing, UbiComp '12, pages 216–225, New York, NY, USA. ACM.
- Coutaz, J. (2013). Essai sans prétention sur l'Interaction Homme-Machine et son évolution. Bulletin de la Société Informatique de France, (1):15–33.
- Daniel, M., Rivière, G., and Couture, N. (2018). Designing an Expandable Illuminated Ring to Build an Actuated Ring Chart. In Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, TEI '18, pages 140–147, New York, NY, USA. ACM.

- Daniel, M., Rivière, G., Couture, N., and Kreckelbergh, S. (2016). Une analyse des Systèmes Interactifs et Persuasifs pour la maîtrise de l'énergie. In Actes de la 28e conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, pages 197–210, Fribourg, Switzerland. ACM Press.
- Darby, S. (2006). The effectiveness of feedback on energy consumption: A Review for DEFRA of the Literature on Metering, Billing and Direct Displays. Technical report, Environmental Change Institute, University of Oxford, Oxford, UK.
- Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., and Nacke, L. (2011). From Game Design Elements to Gamefulness: Defining Gamification. In Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments, MindTrek '11, pages 9–15, New York, NY, USA. ACM.
- DiSalvo, C., Sengers, P., and Brynjarsdóttir, H. (2010). Mapping the Landscape of Sustainable HCI. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '10, pages 1975–1984, New York, NY, USA. ACM.
- Dunn, B., Kamath, H., and Tarascon, J.-M. (2011). Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices. Science, 334(6058):928–935.
- Elbanhawy, E. Y., Smith, A. F. G., and Moore, J. (2016). Towards an Ambient Awareness Interface for Home Battery Storage System. In Proceedings of the ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct, UbiComp '16, pages 1608–1613, New York, NY, USA. ACM.
- Engquist, E. (2009). BOEL-lampan: Utveckling av en lampa för visualisering av elförbrukning i hemmet. Master's thesis, Mälardalen University, Sweden.
- Erickson, T., Li, M., Kim, Y., Deshpande, A., Sahu, S., Chao, T., Sukaviriya, P., and Naphade, M. (2013). The Dubuque Electricity Portal: Evaluation of a City-scale Residential Electricity Consumption Feedback System. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '13, pages 1203–1212, New York, NY, USA. ACM.
- Evans, H., Hansen, H., and Hagedorn, J. (2009). Artful Media: Nuage Vert. IEEE MultiMedia, 16(3):13–15.
- Faruqui, A., Sergici, S., and Sharif, A. (2010). The impact of informational feedback on energy consumption–A survey of the experimental evidence. Energy, 35(4):1598–1608.
- Filonik, D., Medland, R., Foth, M., and Rittenbruch, M. (2013). A Customisable Dashboard Display for Environmental Performance Visualisations. In Proceedings of the 8th International Conference on Persuasive Technology, PERSUASIVE '13, pages 51–62, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Fischer, J. E., Ramchurn, S. D., Osborne, M., Parson, O., Huynh, T. D., Alam, M., Pantidi, N., Moran, S., Bachour, K., Reece, S., Costanza, E., Rodden, T., and Jennings, N. R. (2013). Recommending Energy Tariffs and Load Shifting Based on Smart Household Usage Profiling. In Proceedings of the International Conference on Intelligent User Interfaces, IUI '13, pages 383–394, New York, NY, USA. ACM.
- Fogg, B. J. (1998). Persuasive Computers: Perspectives and Research Directions. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '98, pages 225–232, New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- Fogg, B. J. (2002). Persuasive Technology: Using Computers to Change What We Think and Do. Ubiquity, 2002(December). Article No. 5.
- Foster, D., Lawson, S., Blythe, M., and Cairns, P. (2010). Wattsup?: Motivating Reductions in Domestic Energy Consumption Using Social Networks. In Proceedings of the 6th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Extending Boundaries, NordiCHI '10, pages 178–187, New York, NY, USA. ACM.
- Froehlich, J., Findlater, L., and Landay, J. (2010). The Design of Eco-feedback Technology. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '10, pages 1999–2008, New York, NY, USA. ACM.
- Gamberini, L., Spagnolli, A., Corradi, N., Jacucci, G., Tusa, G., Mikkola, T., Zamboni, L., and Hoggan, E. (2012). Tailoring Feedback to Users' Actions in a Persuasive Game for Household

Electricity Conservation. In Proceedings of the 8th International Conference on Persuasive Technology, PERSUASIVE '12, pages 100–111, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.

- Genolini, C., Ecochard, R., Benghezal, M., Driss, T., Andrieu, S., Subtil, F. (2016). kmlShape: An Efficient Method to Cluster Longitudinal Data (Time-Series) According to Their Shapes. PLoS ONE 11(6):e0150738.
- Graham, C. H. (1965). Vision and visual perception. Wiley.
- Graml, T., Loock, C.-M., Baeriswyl, M., and Staake, T. (2011). Improving residential energy consumption at large using persuasive systems. In European Conference on Information Systems, ECIS '11, pages 1–15. AIS Electronic Library. Paper 184.
- Grönvall, E., Kinch, S., Petersen, M. G., and Rasmussen, M. K. (2014). Causing Commotion with a Shape-changing Bench: Experiencing Shape-changing Interfaces in Use. In Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '14, pages 2559–2568, New York, NY, USA. ACM.
- Gulbinas, R., Jain, R. K., and Taylor, J. E. (2014). BizWatts: A modular socio-technical energy management system for empowering commercial building occupants to conserve energy. Applied Energy, 136:1076–1084.
- Guna, J. and Pogačnik, M. (2013). Ambient visualization of energy consumption information. International SERIES on Information Systems and Management in Creative eMedia, (2):37–42.
- Gustafsson, A. and Gyllenswärd, M. (2005). The Power-aware Cord: Energy Awareness through Ambient Information Display. In CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '05, pages 1423–1426, New York, NY, USA. ACM.
- Gutwin, C., Cockburn, A., and Coveney, A. (2017). Peripheral Popout: The Influence of Visual Angle and Stimulus Intensity on Popout Effects. In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '17, pages 208–219, New York, NY, USA. ACM.
- Ham, J. and Midden, C. (2010). Ambient Persuasive Technology Needs Little Cognitive Effort: The Differential Effects of Cognitive Load on Lighting Feedback Versus Factual Feedback. In Proceedings of the 5th International Conference on Persuasive Technology, PERSUASIVE '10, pages 132–142, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag.
- Hamari, J., Koivisto, J., and Pakkanen, T. (2014a). Do Persuasive Technologies Persuade? - A Review of Empirical Studies. In Proceedings of the 9th International Conference on Persuasive Technology, PERSUASIVE '14, pages 118–136, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag.
- Hamari, J., Koivisto, J., and Sarsa, H. (2014b). Does Gamification Work? – A Literature Review of Empirical Studies on Gamification. In Proceedings of the 47th Hawaii International Conference on System Sciences, pages 3025–3034, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- Hasselqvist, H., Bogdan, C., and Kis, F. (2016). Linking Data to Action: Designing for Amateur Energy Management. In Proceedings of the ACM Conference on Designing Interactive Systems, DIS '16, pages 473–483, New York, NY, USA. ACM.
- Hausen, D., Boring, S., Lueling, C., Rodestock, S., and Butz, A. (2012). StaTube: Facilitating State Management in Instant Messaging Systems. In Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, TEI '12, pages 283–290, New York, NY, USA. ACM.
- Hausen, D., Tabard, A., von Thermann, A., Holzner, K., and Butz, A. (2014). Evaluating Peripheral Interaction. In Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, TEI '14, pages 21–28, New York, NY, USA. ACM.
- Hazas, M., Brush, A. J. B., and Scott, J. (2012). Sustainability Does Not Begin with the Individual. Interactions, 19(5):14–17.
- Heibeck, F., Tome, B., Della Silva, C., and Ishii, H. (2015). uniMorph: Fabricating Thin Film Composites for Shape-Changing Interfaces. In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, UIST '15, pages 233–242, New York, NY, USA. ACM.
- Heller, F. and Borchers, J. (2011). PowerSocket: Towards On-outlet Power Consumption Visualization. In CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '11, pages 1981–1986, New York, NY, USA. ACM.

- Hoberman, C. (1991). Radial expansion/retraction truss structures. US Patent 5,024,031.
- Holmes, T. G. (2007). Eco-visualization: Combining Art and Technology to Reduce Energy Consumption. In Proceedings of the 6th ACM SIGCHI Conference on Creativity & Cognition, C&C '07, pages 153–162, New York, NY, USA. ACM.
- Horev, O. (2006). 'TALKING TO THE HAND' An exploration into shape shifting objects and morphing interfaces. Master's thesis, Interaction Design Institute Ivrea, Ivrea, Italy.
- Ishii, H., Lakatos, D., Bonanni, L., and Labrune, J.-B. (2012). Radical Atoms: Beyond Tangible Bits, Toward Transformable Materials. Interactions, 19(1):38–51.
- Jain, R. K., Taylor, J. E., and Peschiera, G. (2012). Assessing eco-feedback interface usage and design to drive energy efficiency in buildings. Energy and Buildings, 48(1):8–17.
- Jansen, Y., Dragicevic, P., and Fekete, J.-D. (2013). Evaluating the Efficiency of Physical Visualizations. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '13, pages 2593–2602, New York, NY, USA. ACM.
- Jansen, Y., Dragicevic, P., Isenberg, P., Alexander, J., Karnik, A., Kildal, J., Subramanian, S., and Hornbæk, K. (2015). Opportunities and Challenges for Data Physicalization. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15, pages 3227–3236, New York, NY, USA. ACM.
- Jansen, Y., Karrer, T., and Borchers, J. (2010). MudPad: Localized Tactile Feedback on Touch Surfaces. In Adjunct Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '10, pages 385–386, New York, NY, USA. ACM.
- Jensen, R. H., Kjeldskov, J., and Skov, M. B. (2016). HeatDial: Beyond User Scheduling in Eco-Interaction. In Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction, NordiCHI '16, pages 74:1–74:10, New York, NY, USA. ACM.
- Johnson, D., Deterding, S., Kuhn, K.-A., Staneva, A., Stoyanov, S., and Hides, L. (2016). Gamification for health and wellbeing: A systematic review of the literature. Internet Interventions, 6:89 – 106.
- Jönsson, L., Broms, L., and Katzeff, C. (2010). Watt-Lite: Energy Statistics Made Tangible. In Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems, DIS '10, pages 240–243, New York, NY, USA. ACM.
- Kim, J.-W., Kim, Y.-K., and Nam, T.-J. (2009). The Ténéré: Design for Supporting Energy Conservation Behaviors. In CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '09, pages 2643–2646, New York, NY, USA. ACM.
- Kim, S., Kim, H., Lee, B., Nam, T.-J., and Lee, W. (2008). Inflatable Mouse: Volume-adjustable Mouse with Air-pressure-sensitive Input and Haptic Feedback. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '08, pages 211–224, New York, NY, USA. ACM.
- Kim, T., Hong, H., and Magerko, B. (2010). Design Requirements for Ambient Display That Supports Sustainable Lifestyle. In Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems, DIS '10, pages 103–112, New York, NY, USA. ACM.
- Kinchla, R. A. (1976). A psychophysical model of visual-movement perception. In Eye movements and psychological processes, pages 263–275. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, USA.
- Kjeldskov, J., Skov, M. B., Paay, J., Lund, D., Madsen, T., and Nielsen, M. (2015). Facilitating Flexible Electricity Use in the Home with Eco-Feedback and Eco-Forecasting. In Proceedings of the Annual Meeting of the Australian Special Interest Group for Computer Human Interaction, OzCHI '15, pages 388–396, New York, NY, USA. ACM.
- Kjeldskov, J., Skov, M. B., Paay, J., and Pathmanathan, R. (2012). Using Mobile Phones to Support Sustainability: A Field Study of Residential Electricity Consumption. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12, pages 2347–2356, New York, NY, USA. ACM.

- Knowles, B. (2013). Re-imagining Persuasion: Designing for Self-transcendence. In CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '13, pages 2713–2718, New York, NY, USA. ACM.
- Knowles, B., Bates, O., and Håkansson, M. (2018). This Changes Sustainable HCI. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18, pages 471:1–471:12, New York, NY, USA. ACM.
- Knowles, B., Blair, L., Coulton, P., and Lochrie, M. (2014a). Rethinking Plan A for Sustainable HCI. In Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '14, pages 3593–3596, New York, NY, USA. ACM.
- Knowles, B., Blair, L., Walker, S., Coulton, P., Thomas, L., and Mullagh, L. (2014b). Patterns of Persuasion for Sustainability. In Proceedings of the Conference on Designing Interactive Systems, DIS '14, pages 1035–1044, New York, NY, USA. ACM.
- Lakatos, D. (2012). AMPHORM: Form Giving through Gestural Interaction to Shape Changing Objects. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
- Le Goc, M., Kim, L. H., Parsaei, A., Fekete, J.-D., Dragicevic, P., and Follmer, S. (2016). Zooids: Building Blocks for Swarm User Interfaces. In Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '16, pages 97–109, New York, NY, USA. ACM.
- Lee, J., Post, R., and Ishii, H. (2011). ZeroN: Mid-air Tangible Interaction Enabled by Computer Controlled Magnetic Levitation. In Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '11, pages 327–336, New York, NY, USA. ACM.
- Leithinger, D. and Ishii, H. (2010). Relief: A Scalable Actuated Shape Display. In Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, TEI '10, pages 221–222, New York, NY, USA. ACM.
- Light, R. A. (2017). Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol. Journal of Open Source Software, 2(13):265:1–265:2.
- Liu, T., Ding, X., Liu, P., Lu, T., and Gu, N. (2016). ArchiExpression: A Physical Eco-Feedback Display in an Outdoor Campus Space of China. In Proceedings of the Fourth International Symposium on Chinese CHI, ChineseCHI'16, pages 5:1–5:10, New York, NY, USA. ACM.
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., and Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. Applied Energy, 137:511–536.
- Ma, G., Lin, J., Li, N., and Zhou, J. (2017). Cross-cultural assessment of the effectiveness of eco-feedback in building energy conservation. Energy and Buildings, 134:329–338.
- Mankoff, J. C., Blevis, E., Borning, A., Friedman, B., Fussell, S. R., Hasbrouck, J., Woodruff, A., and Sengers, P. (2007). Environmental Sustainability and Interaction. In CHI '07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '07, pages 2121–2124, New York, NY, USA. ACM.
- Masoodian, M., André, E., Kugler, M., Reinhart, F., Rogers, B., and Schlieper, K. (2014). USEM: A ubiquitous smart energy management system for residential homes. International Journal on Advances in Intelligent Systems, 7(3&4):519–532.
- Milenkovic, M., Hanebutte, U., Huang, Y., Prendergast, D., and Pham, H. (2013). Improving User Comfort and Office Energy Efficiency with POEM (Personal Office Energy Monitor). In CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '13, pages 1455–1460, New York, NY, USA. ACM.
- Miller, G. A. (1956). The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on our Capacity for Processing Information. The Psychological Review, 63(2):81–97.
- Monigatti, P., Apperley, M., and Rogers, B. (2010). Power and Energy Visualization for the Micro-management of Household Electricity Consumption. In Proceedings of the International Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI '10, pages 325–328, New York, NY, USA. ACM.
- Nakagaki, K., Vink, L., Counts, J., Windham, D., Leithinger, D., Follmer, S., and Ishii, H. (2016). Materiable: Rendering Dynamic Material Properties in Response to Direct Physical Touch with

Shape Changing Interfaces. In Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16, pages 2764–2772, New York, NY, USA. ACM.

- Negri, A.-L. and Senach, B. (2015). Ludo-persuasive systems for sustainable consumption. Journal d'Interaction Personne-Système, 4(1):141–162.
- Paay, J., Kjeldskov, J., Skov, M. B., Lund, D., Madsen, T., and Nielsen, M. (2014). Design of an Appliance Level Eco-feedback Display for Domestic Electricity Consumption. In Proceedings of the 26th Australian Computer-Human Interaction Conference on Designing Futures: The Future of Design, OzCHI '14, pages 332–341, New York, NY, USA. ACM.
- Pereira, L., Quintal, F., Barreto, M., and Nunes, N. J. (2013). Understanding the Limitations of Eco-feedback: A One-Year Long-Term Study. In Holzinger, A. and Pasi, G., editors, Human-Computer Interaction and Knowledge Discovery in Complex, Unstructured, Big Data, volume 7947 of Lecture Notes in Computer Science, pages 237–255. Springer Berlin Heidelberg.
- Petersen, D., Steele, J., and Wilkerson, J. (2009). WattBot: A Residential Electricity Monitoring and Feedback System. In CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '09, pages 2847–2852, New York, NY, USA. ACM.
- Petkov, P., Goswami, S., Köbler, F., and Krcmar, H. (2012). Personalised Eco-feedback As a Design Technique for Motivating Energy Saving Behaviour at Home. In Proceedings of the 7th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Making Sense through Design, NordiCHI '12, pages 587–596, New York, NY, USA. ACM.
- Petkov, P., Köbler, F., Foth, M., and Krcmar, H. (2011). Motivating Domestic Energy Conservation through Comparative, Community-based Feedback in Mobile and Social Media. In Proceedings of the 5th International Conference on Communities and Technologies, C&T '11, pages 21–30, New York, NY, USA. ACM.
- Piccolo, L. S. G., Baranauskas, C., and Azevedo, R. (2016). A socially inspired energy feedback technology: challenges in a developing scenario. AI & Society, pages 1–17.
- Pierce, J. and Paulos, E. (2010). Materializing Energy. In Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems, DIS '10, pages 113–122, New York, NY, USA. ACM.
- Pierce, J. and Paulos, E. (2012a). Beyond Energy Monitors: Interaction, Energy, and Emerging Energy Systems. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12, pages 665–674, New York, NY, USA. ACM.
- Pierce, J. and Paulos, E. (2012b). The Local Energy Indicator: Designing for Wind and Solar Energy Systems in the Home. In Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference, DIS '12, pages 631–634, New York, NY, USA. ACM.
- Pierce, J., Strengers, Y., Sengers, P., and Bødker, S. (2013). Introduction to the Special Issue on Practice-oriented Approaches to Sustainable HCI. ACM Trans. Comput.-Hum. Interact., 20(4):20:1–20:8.
- Pousman, Z. and Stasko, J. (2006). A Taxonomy of Ambient Information Systems: Four Patterns of Design. In Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI '06, pages 67–74, New York, NY, USA. ACM.
- Quintal, F., Jorge, C., Nisi, V., and Nunes, N. (2016). Watt-I-See: A Tangible Visualization of Energy. In Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI '16, pages 120–127, New York, NY, USA. ACM.
- Quintal, F., Pereira, L., Nunes, N., Nisi, V., and Barreto, M. (2013). WATTSBurning: Design and Evaluation of an Innovative Eco-Feedback System. In Proceedings of the 14th IFIP TC13 Conference on Human-Computer Interaction, INTERACT 2013, pages 453–470, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Quintal, F., Pereira, L., Nunes, N. J., and Nisi, V. (2015). What-a-Watt: Exploring Electricity Production Literacy through a Long Term Eco-Feedback Study. In Proceedings of the Sustainable Internet and ICT for Sustainability Conference, SustainIT '15, pages 1–6. IEEE.

- Radebold, A., Cholewicki, J., Panjabi, M. M., and Patel, T. C. (2000). Muscle response pattern to sudden trunk loading in healthy individuals and in patients with chronic low back pain. Spine, 25(8):947–954.
- Rasmussen, M. K., Pedersen, E. W., Petersen, M. G., and Hornbæk, K. (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, CHI '12, pages 735–744, New York, NY, USA. ACM.
- Regan, T., Sweeney, D., Helmes, J., Vlachokyriakos, V., Lindley, S., and Taylor, A. (2015). Designing Engaging Data in Communities. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '15, pages 271–274, New York, NY, USA. ACM.
- Rivière, G. (2018). L'Interaction Homme-Machine contre le changement climatique : retour sur une controverse. Journal d'Interaction Personne-Système.
- Rivière, G. and Kreckelbergh, S. (2012). La StationENR pour sensibiliser aux énergies renouvelables par la modélisation de micro-réseaux. In Adjunct Proceedings of the Conférence sur l'Ergonomie et l'Interaction Homme-Machine, Ergo'IHM '12, pages 63–66.
- Rodgers, J. and Bartram, L. (2011). Exploring Ambient and Artistic Visualization for Residential Energy Use Feedback. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 17(12):2489–2497.
- Schrammel, J., Gerdenitsch, C., Weiss, A., Kluckner, P. M., and Tscheligi, M. (2011). FORE-Watch – The Clock That Tells You When to Use: Persuading Users to Align Their Energy Consumption with Green Power Availability. In Proceedings of the 2nd International Conference on Ambient Intelligence, AmI '11, pages 157–166, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Schrepp, M., Hinderks, A., and Thomaschewski, J. (2017). Design and Evaluation of a Short Version of the User Experience Questionnaire (UEQ-S). International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence, 4(6):103–108.
- Schwartz, T., Denef, S., Stevens, G., Ramirez, L., and Wulf, V. (2013). Cultivating Energy Literacy: Results from a Longitudinal Living Lab Study of a Home Energy Management System. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '13, pages 1193–1202, New York, NY, USA. ACM.
- Seah, S. A., Drinkwater, B. W., Carter, T., Malkin, R., and Subramanian, S. (2014). Correspondence: Dexterous ultrasonic levitation of millimeter-sized objects in air. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 61(7):1233–1236.
- Sherif, A. and Do, E. Y.-L. (2008). Energy Puppet: An Ambient Awareness Interface for Home Energy Consumption. In Digital Proceedings of the 7th International Workshop on Social Intelligence Design, SID '08. 7 pages.
- Shrubsole, P., Lavrysen, T., Janse, M., and Weda, H. (2011). Flo: Raising Family Awareness about Electricity Use. In CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '11, pages 669–672, New York, NY, USA. ACM.
- Simm, W., Ferrario, M. A., Friday, A., Newman, P., Forshaw, S., Hazas, M., and Dix, A. (2015). Tiree Energy Pulse: Exploring Renewable Energy Forecasts on the Edge of the Grid. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15, pages 1965–1974, New York, NY, USA. ACM.
- Skinner, B. F. (1976). About behaviorism. Vintage Books, New York, NY, USA.
- Snow, S., Vyas, D., and Brereton, M. (2015). When an eco-feedback system joins the family. Personal and Ubiquitous Computing, 19(5):929–940.
- Sohn, M., Nam, T., and Lee, W. (2009). Designing with Unconscious Human Behaviors for Eco-friendly Interaction. In CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '09, pages 2651–2654, New York, NY, USA. ACM.
- Strohmeier, P., Gomes, A., Troiano, G. M., Mottelson, A., Merritt, T., and Alexander, J. (2016). Sharing Perspectives on the Design of Shape-Changing Interfaces. In Proceedings of the 2016

CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '16, pages 3492–3499, New York, NY, USA. ACM.

- Stusak S., Tabard A., Sauka F., Khot R., and Butz A. (2014). Activity sculptures: Exploring the impact of physical visualizations on running activity. IEEE transactions on visualization and computer graphics. 20(12):2201–2210.
- Sutherland, I. E. (1965). The ultimate display. Multimedia: From Wagner to virtual reality, pages 506–508.
- Taher, F., Hardy, J., Karnik, A., Weichel, C., Jansen, Y., Hornbæk, K., and Alexander, J. (2015). Exploring Interactions with Physically Dynamic Bar Charts. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15, pages 3237–3246, New York, NY, USA. ACM.
- Telea, A. C. (2014). Data Visualization: Principles and Practice, Second Edition. A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA, 2nd edition.
- Thorpe, S., Fize, D., and Marlot, C. (1996). Speed of processing in the human visual system. Nature, 381(6582):520–522.
- Tilley, C. (2004). The materiality of stone: explorations in landscape phenomenology. Berg publishers, Oxford, UK.
- Togler, J., Hemmert, F., and Wettach, R. (2009). Living Interfaces: The Thrifty Faucet. In Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction, TEI '09, pages 43–44, New York, NY, USA. ACM.
- Tran, Q. (2014). Promoting energy efficient behavior through energy-related feedback. In Proceedings of the International Conference on Collaboration Technologies and Systems, CTS '14, pages 611–615. IEEE.
- Tremblay, O. and Dessaint, L.-A. (2009). Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. World Electric Vehicle Journal, 3(1):1–10.
- Tynan, P. D. and Sekuler, R. (1982). Motion processing in peripheral vision: Reaction time and perceived velocity. Vision research, 22(1):61–68.
- Valkanova, N., Jordà, S., Tomitsch, M., and Vande Moere, A. (2013). Reveal-it!: The Impact of a Social Visualization Projection on Public Awareness and Discourse. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '13, pages 3461–3470, New York, NY, USA. ACM.
- Vine, D., Buys, L., and Morris, P. (2013). The Effectiveness of Energy Feedback for Conservation and Peak Demand: A Literature Review. Open Journal of Energy Efficiency, 2(1):7–15.
- Weiser, M. and Brown, J. S. (1996). Designing calm technology. PowerGrid Journal, 1(1):75–85.
- Weiss, M., Mattern, F., Graml, T., Staake, T., and Fleisch, E. (2009). Handy Feedback: Connecting Smart Meters with Mobile Phones. In Proceedings of the 8th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, MUM '09, pages 15:1–15:4, New York, NY, USA. ACM.
- Wickens, C. D. and McCarley, J. S. (2007). Applied attention theory. CRC press.
- Wisneski, C., Ishii, H., Dahley, A., Gorbet, M. G., Brave, S., Ullmer, B., and Yarin, P. (1998). Ambient Displays: Turning Architectural Space into an Interface between People and Digital Information. In Proceedings of the 1st International Workshop on Cooperative Buildings, Integrating Information, Organization, and Architecture, CoBuild '98, pages 22–32, London, UK. Springer-Verlag.
- Wu, A. (2010). Tangible Visualization. In Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, TEI '10, pages 317–318, New York, NY, USA. ACM.
- Yamada, W., Yamada, K., Manabe, H., and Ikeda, D. (2017). iSphere: Self-Luminous Spherical Drone Display. In Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '17, pages 635–643, New York, NY, USA. ACM.

- Yao, L., Niiyama, R., Ou, J., Follmer, S., Della Silva, C., and Ishii, H. (2013). PneUI: Pneumatically Actuated Soft Composite Materials for Shape Changing Interfaces. In Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '13, pages 13–22, New York, NY, USA. ACM.
- Yao, L., Ou, J., Cheng, C.-Y., Steiner, H., Wang, W., Wang, G., and Ishii, H. (2015). bioLogic: Natto Cells As Nanoactuators for Shape Changing Interfaces. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15, pages 1–10, New York, NY, USA. ACM.
- Yun, R., Aziz, A., Scupelli, P., Lasternas, B., Zhang, C., and Loftness, V. (2015). Beyond Eco-Feedback: Adding Online Manual and Automated Controls to Promote Workplace Sustainability. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15, pages 1989–1992, New York, NY, USA. ACM.
- Yun, T.-J. (2009). Investigating the Impact of a Minimalist In-home Energy Consumption Display. In CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '09, pages 4417–4422, New York, NY, USA. ACM.

11 BIOGRAPHIE

Maxime DANIEL

est Doctorant en Informatique, spécialité Interaction Homme-Machine, à l'ESTIA et au LaBRI. Master en Informatique (Bordeaux, 2015). Sa recherche porte sur l'interaction tangible. Il étudie les propriétés des interfaces utilisateur tangibles appliquées à la maîtrise de l'énergie, notamment la représentation tangible dynamique des interfaces à changement de formes.

Guillaume RIVIÈRE

est Enseignant-Chercheur à l'ESTIA. Docteur en Informatique, spécialité Interaction Homme-Machine (Bordeaux, 2009), Autorisé à Diriger des Thèses (Bordeaux, 2015). Qualifié aux fonctions de Maître de Conférences (Section CNU 27, 2010, 2014, 2018). Son domaine de recherche principal est l'interaction tangible. Ses recherches, conduites à Estia-Recherche et au LaBRI, portent sur l'étude des propriétés des interfaces utilisateur tangibles et sur la classification des interfaces utilisateur tangibles. Il applique ses recherches à des domaines comme la géophysique, l'archéologie et, plus récemment, l'intégration des énergies renouvelables. Il a co-créé et co-animé, avec Nadine Couture, le GT Interaction Tangible de l'AFIHM de 2011 à 2018. Il est membre de la SIF et de l'AFIHM.

Nadine COUTURE

est Professeur en Informatique à l'école d'ingénieur ESTIA. Elle a obtenu un doctorat en combinatoire énumérative en 1994 et l'Habilitation à Diriger des Recherches en Interaction Homme-Machine en 2010. Elle enseigne les fondamentaux de l'informatique aux élèves ingénieurs, algorithmiques, technologies du web, langages de programmation, systèmes mobiles. Ses recherches sont menées à Estia-Recherche, UPR de l'ESTIA, dont elle est Directrice, et au LaBRI, UMR CNRS 5800 de l'Université de Bordeaux. Depuis 2001, elle s'intéresse à l'Interaction Tangible, de l'incarnation physique des données vers l'interaction avec tout le corps. Elle a initié en 2014 les European Tangible Interaction Studios (ETIS) et est membre du steering commitee depuis. En 2010, elle a co-fondé la PEPSS, Plateforme d'Evaluation, de Prototypage et de teSts d'uSages. Elle est membre de l'AFIHM. Nadine Couture développe les liens recherche-entreprise et à ce titre elle est co-responsable de l'axe Interaction-Homme Système et Réalité Augmenté du Groupement d'Intérêt Scientifique Albatros (ALliance Bordeaux universities And Thales Research in AviOnicS), co-animatrice du Domaine d'Activité Stratégique (DAS) Interactions Homme Système du pôle de Compétitivité Aerospace-Valley et vice-Présidente du CATIE, le Centre Aquitain des Technologies de l'Information et Électroniques.

12 ANNEXES

Liste des références bibliographiques des 67 systèmes interactifs du corpus.

	Nom	Référence
1	7,000 Oaks and Counting	(Holmes, 2007)
2	Abstract Ambient	(Rodgers and Bartram, 2011)
3	Agent B	(Costanza et al., 2014)
4	AgentSwitch	(Fischer et al., 2013)
5	Ambient Battery Level	(Elbanhawy et al., 2016)
6	ArchiExpression	(Liu et al., 2016)
7	BizWatts	(Gulbinas et al., 2014)
8	BoEL	(Engquist, 2009)
9	Conversation WashMachine	(Bourgeois et al., 2014)
10	Coralog	(Kim et al., 2010)
11	Customisable Dashboard	(Filonik et al., 2013)
12	E-point	(Monigatti et al., 2010)
13	eAMBI	(Guna and Pogačnik, 2013)
14	Eco-aware CoffeeMaker	(Casado-Mansilla et al., 2014)
15	EcoFeedback	(Ma et al., 2017)
16	Ecosphere	(Snow et al., 2015)
17	eForecast	(Kjeldskov et al., 2015)
18	Energy Aware Clock	(Broms et al., 2010)
19	Energy Local Lamp	(Pierce and Paulos, 2010)
20	Energy Orb	(Faruqui et al., 2010)
21	Energy Plant	(Broms, 2011)
22	EnergyPuppet	(Sherif and Do, 2008)
23	Energy Tree	(Piccolo et al., 2016)
24	EnergyDub	(Erickson et al., 2013)
25	EnergyLife	(Gamberini et al., 2012)
26	EnergySavings	(Tran, 2014)
27	Energy Wiz	(Petkov et al., 2011)
28	FigureEnergy	(Costanza et al., 2012)
29	Flo	(Shrubsole et al., 2011)
30	Flower Lamp	(Backlund et al., 2007)
31	FORE-Watch	(Schrammel et al., 2011)
32	Handy Feedback	(Weiss et al., 2009)
33	HeatDial	(Jensen et al., 2016)
34	HEMS	(Schwartz et al., 2013)
35	Housing Cooperative Energy App	(Hasselqvist et al., 2016)
36	ID-O	(Yun et al., 2015)
37	Lightning feedback display	(Ham and Midden, 2010)
38	Limit Eco-Feedback	(Pereira et al., 2013)
39	Local Energy Indicator	(Pierce and Paulos, 2012)

40	Mobile ECD	(Yun, 2009)
41	MyLocalEnergy	(Castelli et al., 2016)
42	Nuage Vert	(Evans et al., 2009)
43	Personal Energy Dashboard	(Colley et al., 2013)
44	Personnalized Eco-Feedback	(Petkov et al., 2012)
45	POEM	(Milenkovic et al., 2013)
46	Power-Aware Cord	(Gustafsson and Gyllenswärd, 2005)
47	PowerAdvisor	(Kjeldskov et al., 2012)
48	PowerSocket	(Heller and Borchers, 2011)
49	PowerViz	(Paay et al., 2014)
50	Pull-me-out Power Cord	(Sohn et al., 2009)
51	Reveal-it!	(Valkanova et al., 2013)
52	Share Aware Light	(Broms, 2011)
53	Stationary ECD	(Yun, 2009)
54	StationENR	(Rivière and Kreckelbergh, 2012)
55	TariffAgent	(Alan et al., 2016)
56	TemperatureCalendar	(Costanza et al., 2016)
57	Tiree Energy Pulse	(Simm et al., 2015)
58	Ténéré	(Kim et al., 2009)
59	USEM	(Masoodian et al., 2014)
60	Velix	(Graml et al., 2011)
61	Watt's Watt	(Jain et al., 2012)
62	Watt-I-See	(Quintal et al., 2016)
63	Watt-Lite	(Jönsson et al., 2010)
64	WattBot	(Petersen et al., 2009)
65	WATTSBurning	(Quintal et al., 2013)
66	Wattson	(Foster et al., 2010)
67	What-a-Watt	(Quintal et al., 2015)