

THÈSE
PRÉSENTÉE À
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX
PRÉPARÉE À L'ESTIA
ÉCOLE DOCTORALE DE MATHÉMATIQUES ET
D'INFORMATIQUE
par **Maxime Daniel**
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR
SPÉCIALITÉ : INFORMATIQUE

**Afficheurs cylindriques à changement de forme :
application à la physicalisation des données et
l'interaction périphérique pour la gestion de la
demande de l'énergie**

Date de soutenance : 19 novembre 2018

Devant la commission d'examen composée de :

Pascal DESBARATS	Professeur Univ. Bordeaux	Président
Gaëlle CALVARY	Professeure ENSIMAG	Rapporteure
Elena MUGELLINI	Professeure HES-SO	Rapporteure
Aurélien TABARD	Maître de conférences Univ. Lyon 1	Examineur
Alexandre DUGARRY	CEO GreenMe	Examineur
Stéphane KRECKELBERGH	Chercheur associé ESTIA	Co-encadrant
Nadine COUTURE	Professeure ESTIA	Directrice
Guillaume RIVIÈRE	Enseignant-Chercheur ESTIA	Directeur

Résumé Au milieu des espaces collectifs et publics, les afficheurs cylindriques informent les utilisateurs autour d’eux. Nous questionnons l’utilité et l’utilisabilité de la symétrie dynamique de révolution pour les afficheurs cylindriques à changement de forme. Nous présentons CairnFORM, un prototype d’afficheur cylindrique capable de changer de symétrie de révolution à l’aide d’une pile modulaire d’anneaux extensibles illuminés. Nous montrons que la symétrie de révolution est utilisable pour informer les utilisateurs par physicalisation des données : nous observons avec un CairnFORM à 10 anneaux qu’un histogramme à anneaux physiques est plus efficace pour une tâche d’intervalle et une tâche de comparaison plutôt que pour une tâche d’ordonnancement. Nous montrons que le changement de symétrie de révolution est utilisable pour notifier sans déranger les utilisateurs par interaction périphérique : nous observons avec un CairnFORM à 1 anneau que le changement de diamètre d’un anneau avec une vitesse exponentielle est perçu plus souvent et plus calmement en périphérie de l’attention plutôt qu’avec une vitesse constante ou logarithmique. Nous montrons que les afficheurs cylindriques à symétrie dynamique de révolution offrent une expérience utilisateur sur la durée supérieure aux afficheurs planaires : après deux mois en contexte d’usage sur un lieu de travail, nous observons que CairnFORM est aussi pragmatique mais plus hédonique qu’un écran plat. Nous étudions un cas d’usage pour les afficheurs sur le lieu de travail, c’est-à-dire aider les employés à décaler le chargement de batterie des ordinateurs portables vers les heures de pic de production locale d’énergie renouvelable.

Mots-clés Interfaces utilisateur tangibles, interfaces à changement de forme, afficheurs cylindriques à changement de forme, symétrie dynamique de révolution, physicalisation des données, interaction périphérique, espaces collectifs et publics, gestion de la demande en énergie, lieu de travail.

Title Shape-changing cylindrical displays: Application to data physicalization and peripheral interaction for energy demande-side management

Abstract In the middle of public and collective spaces, cylindrical displays inform users around them. We question the utility and the usability of dynamic revolution symmetry for shape-changing cylindrical displays. We present CairnFORM, a prototype of cylindrical display that can change its revolution symmetry using a modular stack of expandable illuminated rings. We show that revolution symmetry is usable for informing users through data physicalization: We observe with a 10-ring CairnFORM that a physical ring chart is more efficient for a range task and for a compare task rather than for an order task. We show that revolution symmetry change is usable for unobtrusively notifying users through peripheral interaction: We observe with a 1-ring CairnFORM that a ring diameter change with exponential speed is perceived more often and calmer in the periphery of attention rather than with a constant speed or a logarithmic speed. We show that cylindrical displays with dynamic revolution symmetry offer a greater user experience over time than planar displays: After two months in context of use in a workplace, we observe that CairnFORM is as pragmatic as a flat screen but more hedonic than a flat screen. We study a use case

for displays in the workplace: Helping employees to shift laptop battery charge to peak hours of local renewable energy production.

Keywords Tangible user interfaces; Shape-changing interfaces; Shape-changing cylindrical displays; Dynamic revolution symmetry, Data physicalization; Peripheral interaction; Public and collective spaces; Energy demand-side management; Workplace.

Laboratoire d'accueil Estia-Recherche, ESTIA, 97 allée Théodore Monod, Technopole Izarbel, 64210 Bidart, France.

Table des matières

Table des matières	v
Table des figures	ix
Liste des tableaux	xv
Remerciements	1
Introduction	3
I Afficheurs cylindriques à changement de forme	7
1 Domaines de recherche	9
1.1 Informatique	9
1.2 Interaction Homme-Machine	9
1.3 Continuum de réalité-virtualité	10
1.4 Interfaces utilisateur tangibles	11
1.5 Interfaces à changement de forme	13
1.6 Physicalisation des données	14
1.7 Interaction périphérique	15
2 Problématique & État de l’art	17
2.1 Afficheurs sur les espaces collectifs et publics	18
2.2 Afficheurs cylindriques	18
2.3 RevoFORM	19
2.4 Utilité et utilisabilité de la symétrie dynamique de révolution	19
3 Proposition	23
3.1 CairnFORM	23
3.2 Cas d’usage	27
3.3 Questions de recherche	29

4	Expérimentations	31
4.1	Utilisabilité de la symétrie de révolution pour informer par physicalisation des données	32
4.2	Utilisabilité du changement de symétrie de révolution pour notifier sans déranger par interaction périphérique	42
4.3	Expérience utilisateur sur la durée avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution en contexte d'usage	56
II	Cas d'usage : la gestion de la demande en énergie	75
5	Problématique	77
5.1	Crise écologique et sociale	77
5.2	Développement durable	78
5.3	Secteur de l'énergie	79
5.4	Transition énergétique	81
5.5	Problème de la production décentralisée et intermittente des énergies renouvelables	82
5.6	Solution des réseaux électriques intelligents	82
5.7	Verrou technologique du stockage d'énergie	84
5.8	Promouvoir efficacité, sobriété et propreté énergétique	85
5.9	Systèmes interactifs pour la sobriété et propreté énergétique	86
6	Domaines de recherche	87
6.1	Persuasion Technologique	87
6.2	Conscientisation Ambiante	88
6.3	Ludification	89
6.4	Interaction Homme-Énergie	90
6.5	Eco-Interaction	90
7	Revue de la littérature	93
7.1	Motivation	93
7.2	Méthode d'identification du corpus	94
7.3	Critères d'analyse du corpus	95
7.4	Classification du corpus	98
7.5	Analyse verticale du corpus	100
7.6	Synthèse horizontale du corpus	106
7.7	Discussion sur les types d'interface pour le changement	111
7.8	Afficheurs sur les espaces collectifs et publics pour le changement	114
8	Application	115
8.1	Promouvoir la propreté énergétique au travail	115
8.2	Décaler la charge des batteries des ordinateurs portables au travail	116

TABLE DES MATIÈRES

8.3	Identification de la pratique courante de chargement de batterie des ordinateurs portables au travail	117
8.4	Simulation du décalage du chargement de batterie d'un ordinateur portable	117
8.5	Exploration du décalage du chargement de batterie sur une courbe typique de production d'énergie solaire	123
8.6	Définition de consignes pour décaler le chargement de batterie d'un ordinateur portable	124
8.7	Caractérisation du décalage du chargement de la batterie d'un ordinateur portable	126
8.8	Restreindre le décalage du chargement de batterie à certaines variations	129
8.9	Exploration du décalage du chargement de batterie pour d'autres séries et formes de variation	130
8.10	Estimation du potentiel de propreté énergétique du décalage du chargement de batterie d'un ordinateur portable au travail	133
8.11	Affichage d'un histogramme sur le lieu de travail pour aider à décaler le chargement de batterie des ordinateurs portables	134
Conclusion		139
Index		143
Bibliographie		145

Table des figures

1	Un afficheur à changement de forme déployé sur une place publique (Coca-Cola, 8 août 2017, Times Square, New York, USA).	3
1.1	Les fréquences et les proportions des publications dans les domaines d'application de la recherche en Informatique de 1990 à 2010 à partir des bases de données ACM et IEEE [88].	10
1.2	Une illustration du continuum de réalité-virtualité [129].	11
1.3	Un exemple de chaque genre de TUIs.	12
1.4	Une «matière» programmable par nano-technologie extraite du film <i>Man of Steel</i> (2013).	13
1.5	Trois SCIs altérant la forme d'une courbe (a), d'une surface (b) et d'un volume (c).	14
1.6	Trois SCIs utilisées pour un diagramme dynamique à lignes physiques (a), à barres physiques (b) et en camembert physique (c)	14
1.7	Deux SCIs utilisées comme interfaces périphériques pour notifier sans déranger les utilisateurs de l'arrivée d'un message sur une messagerie instantanée.	15
2.1	Des afficheurs planaires dans un métro (8 Août 2017, New York, USA). . .	18
2.2	Des afficheurs cylindriques dans un aéroport (28 Février 2012, Pékin, Chine). . .	18
2.3	RevoFORM, un concept d'afficheur cylindrique à changement de forme. . .	19
2.4	Deux solutions techniques pour la conception d'une pile modulaire d'anneaux extensibles illuminés afin de permettre aux SCIs de changer de symétrie de révolution.	20
2.5	Trois physicalisations avec symétrie de révolution qui encodent des données de manière identique à 360°.	21
2.6	Deux afficheurs avec symétrie de révolution utilisant le changement de lumière pour notifier sans déranger les utilisateurs à 360°.	21
3.1	Un <i>cairn</i> , du gaélique écossais <i>cárn</i> , apparenté au breton <i>karn</i> signifiant monticule de pierres.	23
3.2	Le processus de conception d'un anneau extensible illuminé.	24
3.3	Les parties mécaniques et électroniques du prototype final d'anneau extensible illuminé.	25

3.4	Les éléments matériels et logiciels pour contrôler un CairnFORM à 10 anneaux.	27
3.5	Un CairnFORM à 10 anneaux.	27
3.6	Le CairnFORM à 10 anneaux déployé dans un bureau ouvert d'un lieu de travail affichant l'histogramme vertical proposé au chapitre 8 (page 115) afin d'aider les utilisateurs à décaler le chargement de la batterie de leur ordinateur portable vers les heures de pic de production locale d'énergie renouvelable.	28
3.7	Le modèle <i>Motivation-Opportunity-Abilities (MOA)</i> [123] décrivant trois critères de vraisemblance d'un comportement.	29
4.1	La vue de dessus de l'environnement de la première expérimentation. . . .	33
4.2	La pyramide de population des trois groupes de participants de la première expérimentation.	34
4.3	Le CairnFORM à 10 anneaux affichant un histogramme à anneaux physiques visualisant trois variations avec une durée et une amplitude différente pendant un évènement public (24h de l'innovation® [116], Biarritz, France).	35
4.4	Le score donné par les participants pour les deux qualités du questionnaire UEQ-S [158].	37
4.5	Le taux de réussite des participants pour les trois tâches bas-niveaux de recherche d'information.	38
4.6	L'apparence finale de CairnFORM affichant un histogramme vertical à anneaux physiques visualisant une variation EnR pendant la journée de travail.	41
4.7	La vue de dessus de l'environnement de la deuxième expérimentation. . . .	44
4.8	La pyramide des participants de la deuxième expérimentation.	45
4.9	L'expansion (a) et la rétraction (b) d'un anneau en six secondes avec une vitesse constante, exponentielle et logarithmique.	46
4.10	Les deux tâches utilisées pendant la deuxième expérimentation.	47
4.11	Les résultats sur la détection et l'esthétique du mouvement de l'anneau dans le champ de vision périphérique.	51
4.12	Les résultats sur la conscientisation, la distraction et l'esthétique du mouvement de l'anneau dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention.	53
4.13	Le changement de diamètre de l'anneau par rapport au temps de perception des participants.	54
4.14	La vue de dessus des deux environnements de la troisième expérimentation. .	58
4.15	La pyramide des participants de la troisième expérimentation.	59
4.16	Les deux types d'afficheur utilisés pour la troisième expérimentation. . . .	59
4.17	Les résultats sur le score donné par les participants aux deux qualités de UEQ-S [158] pour CairnFORM et CairnSCREEN au début et à la fin de la troisième expérimentation.	64

4.18	Les résultats sur le score donné par les participants aux valeurs du NEP [45] pour CairnFORM et CairnSCREEN au début et à la fin de la troisième expérimentation.	66
4.19	Le taux EnNR décalé par charge et la profondeur par charge pour chaque journée de travail avec au moins une variation EnR, avant et après le déploiement de CairnFORM et CairnSCREEN.	67
4.20	Les résultats sur l'accomplissement de la pratique pour CairnFORM et CairnSCREEN avant et après le déploiement.	69
5.1	Le réchauffement climatique à fait perdre plus de la moitié de la banquise arctique de 1980 à 2010 [100].	78
5.2	Le schéma des trois piliers du développement durable présenté et diffusé par Alain Villainv (géologue, conseiller scientifique au conseil régional Nord-pas de calais) lors d'une réunion sur le développement durable à la communauté urbaine de Lille (France) en 1993.	78
5.3	L'approvisionnement mondial en énergie en 1973 [90].	79
5.4	Les millions de tonnes équivalent CO ₂ relâchées dans l'atmosphère par la consommation de combustibles fossiles et la production de ciment entre 1751 et 2014 [173].	79
5.5	Trois moyens de production d'énergie renouvelable.	80
5.6	Deux moyens de production d'énergie nucléaire.	81
5.7	L'approvisionnement mondial en énergie en 1973 et 2015 [90].	81
5.8	Le réseau électrique européen observé depuis l'espace par la NASA, le 2 avril 2009.	82
5.9	L'illustration d'un réseau électrique intelligent par la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE) [30].	83
5.10	L'illustration d'un micro-réseau électrique intelligent par le groupe industrielle énergétique ENGIE [50].	84
5.11	L'utilisation du stockage d'énergie pour mitiger l'intermittence de la production d'énergie renouvelable.	84
5.12	Une illustration du triptyque proposé par Négawatt [135].	85
5.13	Les deux catégories de l'IHM durable [124].	86
6.1	EnergyWiz [141], un SIP pour la sobriété énergétique utilisant une interface graphique mobile pour informer l'habitant de la consommation d'énergie passée et présente du bâtiment.	88
6.2	Watt-I-See [148], un SIP pour la propreté énergétique utilisant un afficheur ambiant fixe sur un lieu public pour informer les citoyens du mix énergétique actuel.	89
6.3	EnergyDub [8], un SIP pour la sobriété énergétique utilisant une interface graphique fixe pour informer l'habitant de la consommation d'énergie passée et présente du bâtiment. EnergyDub implémente des mécanismes de jeu (points, classement, etc.).	89

6.4	Share AWARE Light [20], un SIP pour la sobriété énergétique utilisant un afficheur ambiant fixe qui permet de partager de l'énergie entre habitants. Lorsque la luminosité d'une lampe de Share AWARE Light est trop augmentée, celle des autres lampes baisse.	90
6.5	Thermostat Nest [85], un SIP pour la sobriété énergétique qui informe les habitants sur la consommation d'énergie passée et présente du chauffage du bâtiment. Thermostat Nest mémorise les habitudes des habitants, baisse automatiquement le chauffage en l'absence des habitants et permet un réglage à distance du thermostat à l'aide d'une application mobile.	91
7.1	Le processus d'identification du corpus.	94
7.2	Les quatre composantes d'un système interactif.	95
7.3	La matrice discriminant les 67 SIPs du corpus selon 73 caractéristiques provenant de 16 critères organisés en cinq classes : le <i>contexte</i> , le <i>système</i> (données et fonctions), l' <i>interface</i> et l' <i>utilisateur</i> . Illustration réalisée avec la bibliothèque javascript d3.js [18].	99
7.4	L'outil développé permettant de filtrer les 67 SIPs en fonction des 73 caractéristiques provenant des 16 critères organisés en cinq classes.	100
7.5	Le diagramme de Sankey visualisant le flux des différents contextes qui se dégagent du corpus. Illustration réalisée avec la bibliothèque python floWeaver [18].	101
7.6	Le diagramme de Sankey visualisant le flux des différents profils d'utilisateurs qui se dégagent du corpus. Illustration réalisée avec la bibliothèque python floWeaver [18].	103
7.7	Le diagramme de Sankey visualisant le flux des différents profils de données qui se dégagent du corpus. Illustration réalisée avec la bibliothèque python floWeaver [18].	104
7.8	Le diagramme de Sankey visualisant le flux des différents profils d'interfaces qui se dégagent du corpus. Illustration réalisée avec la bibliothèque python floWeaver [18].	105
7.9	Le diagramme de Sankey visualisant le flux des différents profils d'utilisateurs qui se dégagent du corpus. Illustration réalisée avec la bibliothèque python floWeaver [18].	106
7.10	Le diagramme de Sankey visualisant le flux des six profils typiques d'interface utilisateur qui se dégagent du corpus. Illustration réalisée avec la bibliothèque python floWeaver [18].	107
7.11	HandyFeedback [141]	108
7.12	Energy Aware Clock [21]	109
7.13	Ténéré [106]	109
7.14	PowerViz [136]	110
7.15	Mobile ECD [200]	110
7.16	StationENR [155]	111
7.17	Une illustration du modèle transthéorique du changement [147].	112

7.18	La matrice de compatibilité théorique des types d'interface utilisateur pour chaque étape du modèle transthéorique du changement [147].	114
8.1	La consommation d'énergie de l'UE-28 en 2015.	116
8.2	L'ordinateur portable au travail branché au secteur même lorsque la batterie est complètement chargée ($N = 22$).	117
8.3	SEDYL, un outil développé <i>ad hoc</i> pour simuler le décalage du chargement de la batterie d'un ordinateur portable.	118
8.4	Les données sur le mix de la production électrique en entrée de l'outil SEDYL.	119
8.5	La configuration de l'ordinateur portable en entrée de l'outil SEDYL.	121
8.6	Les usages de l'ordinateur portable en entrée de l'outil SEDYL.	121
8.7	Les données calculées par SEDYL en sortie.	122
8.8	Les données visualisées par SEDYL en sortie.	122
8.9	Le clustering des courbes de production d'énergie solaire d'une année de travail (8h-17h, lundi-vendredi, 13 janvier 2012-12 janvier 2013, installation photovoltaïque ESTIA, Bidart, France).	123
8.10	Les composantes d'une variation EnR avec la courbe typique de production d'énergie solaire.	124
8.11	L'application du jeu de consignes avec SEDYL sur la courbe typique de production d'énergie solaire.	125
8.12	L'application du jeu alternatif de consignes avec SEDYL sur la courbe typique de production d'énergie solaire.	126
8.13	L'application du jeu alternatif de consignes avec SEDYL pour deux courbes fictives de production EnR.	128
8.14	L'EnNR consommée en moins que la pratique par défaut en fonction de $\Delta EnR_{pratique}$ pour $duration_{decharge} = 3h$ et $duration_{charge} = 1h$	128
8.15	Les variations de production d'énergie solaire sur une année de travail en fonction de $\Delta EnR_{variation}$ pour $duration_{decharge} = 3h$ et $duration_{charge} = 1h$ (8h-17h, lundi-vendredi, 13 janvier 2012-12 janvier 2013, installation photovoltaïque ESTIA, Bidart, France).	130
8.16	Les courbes de production d'énergie solaire sur une année de travail en fonction de $C1$ et $C2$ (8h-17h, lundi-vendredi, 13 janvier 2012-12 janvier 2013, installation photovoltaïque ESTIA, Bidart, France). $P1, P2, P3, P4$ sont les quatre courbes aux extrémités de l'espace $\binom{C1}{C2}$	130
8.17	L'application du jeu alternatif de consignes avec SEDYL sur les 4 courbes aux extrémités de l'espace $\binom{C1}{C2}$ pour $duration_{decharge} = 3h$ et $duration_{charge} = 1h$ (8h-17h, lundi-vendredi, 13 janvier 2012-12 janvier 2013, installation photovoltaïque ESTIA, Bidart, France).	132
8.18	L'EnNR potentielle à consommer en moins pour chaque journée de travail en appliquant le jeu alternatif de consignes avec SEDYL pour $duration_{decharge} = 3h$ et $duration_{charge} = 1h$ (8h-17h, lundi-vendredi, 13 janvier 2012-12 janvier 2013, installation photovoltaïque ESTIA, Bidart, France).	133

8.19	L’histogramme vertical avec un afficheur planaire (a) et un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution (b) sur un lieu de travail. .	134
8.20	Les quatre systèmes interactifs pour la propreté énergétique qui visualisent des prévisions pour permettre aux utilisateurs de les comparer et planifier leur usage en énergie en fonction de la disponibilité à venir des EnRs. . . .	135
8.21	Les trois versions d’histogrammes horizontaux à barres graphiques <i>Hist1</i> , <i>Hist2</i> et <i>Hist3</i> visualisant les données <i>P1</i> , <i>P2</i> , <i>P3</i> et <i>P4</i>	136
8.22	Le projet de la tour Da Vinci à Dubai (Émirats arabes unis) proposée par l’architecte David Fisher.	140

Liste des tableaux

4.1	Les tests statistiques conseillés ¹ en fonction du type de données et du nombre de groupes indépendants.	36
4.2	Le résumé des résultats et des valeurs- p des tests statistiques sur le score donné par les participants aux deux qualités du questionnaire UEQ-S [158].	37
4.3	Le résumé des résultats et des valeurs- p des tests statistiques sur la réussite des tâches par les participants.	38
4.4	Les tests statistiques conseillés ² en fonction du type de données et du nombre de groupes indépendants.	49
4.5	Le résumé des résultats et valeurs- p des tests statistiques sur la détection et l'esthétique du mouvement de l'anneau dans le champ de vision périphérique.	50
4.6	Le résumé des résultats et valeurs- p des tests statistiques sur la conscientisation, la distraction et l'esthétique du mouvement de l'anneau dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention.	52
4.7	Les tests statistiques conseillés ³ en fonction du type de données pour deux groupes indépendants ou appariés.	63
4.8	Le résumé des résultats et les valeurs- p des tests statistiques sur le score donné par les participants aux deux qualités de UEQ-S [158].	64
4.9	Le résumé des résultats et les valeurs- p des tests statistiques sur le score donné par les participants aux valeurs du NEP [45].	66
4.10	Le résumé des résultats et les valeurs- p des tests statistiques sur l'accomplissement de la pratique par les participants [45].	68

Remerciements

Tout d'abord, mes remerciements s'adressent à Mesdames Gaëlle Calvary et Elena Mugellini pour avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteuses. Je remercie également Messieurs Pascal Desbarats, Aurélien Tabard et Alexandre Dugarry pour avoir accepté de juger ce travail en tant qu'examineurs. Je tiens à remercier la région Nouvelle-Aquitaine et la communauté d'agglomération Pays Basque pour avoir financé ce travail.

Ensuite, je souhaite remercier mes directeurs de thèse Guillaume Rivière et Nadine Couture et mon co-encadrant de thèse Stéphane Kreckelbergh pour m'avoir accompagné tout au long de ces trois années de thèse. Guillaume, merci pour ton engagement et ta patience et aussi pour la démarche et la rigueur scientifique que tu m'as transmise. Cette quantité et qualité de travail n'aurait pas pu être sans tes efforts. Nadine, merci pour ta bienveillance, ton enthousiasme, tes encouragements et tes conseils pendant ces trois années. Stéphane, merci pour nos discussions enrichissantes sur le secteur de l'énergie et les problématiques auxquelles ce secteur fait face aujourd'hui.

Merci à mes collègues et surtout amis Jérémie Faham, Julien Ambrosino, Jérémy Legardeur, Dimitri Masson, Audrey Abi Akle, Julie Lartigau, Eric Villeneuve, Denis Geral, Valentine Cazaubon, Guillaume Terrasson, Marion Real et Benjamin Tyl. Merci aussi à mes amis de longue date Thomas Lebourlot, Simon Hubert, Laura Boulay, Alexis Toulat, Alice Rotiel, Guillaume Contat, Jean Buikang, Margot Soubre, Adrien Souquère, Camille Souquère, Romain Crozon, Romain Delzor, Raphael Harismendy, Ruben Rust, Mathieu Le Goff et Dimitri Ranc. Désolé si j'en ai oublié. Merci à vous tous pour votre amitié et pour les bons moments passés ensemble ces trois dernières années.

Enfin, merci à ma famille pour leur soutien inébranlable et leur amour impérissable.

Introduction

Depuis des milliers d'années, *Homo sapiens* manifeste sa sagesse, son intelligence en transformant le monde qui l'entoure ; Il manie l'outil pour modifier son environnement et le façonner de sa pensée. Pendant cette période, l'humanité n'a cessé d'accumuler de la connaissance sur les outils et les techniques. En science-fiction, il n'est pas rare de retrouver des technologies permettant à l'Homme de plier la «matière» à sa volonté [182]. En Interaction Homme-Machine, les interfaces utilisateur à changement de forme (*Shape-Changing Interfaces (SCIs)*) sont des interfaces «conçues, avec l'hypothèse que dans un futur proche, les objets physiques deviendront aussi malléables que leurs homologues virtuels» [91, 170, 172]. Avec les avancées technologiques récentes sur les actionneurs et les matériaux intelligents, la société assiste à l'arrivée de la première génération de SCIs (figure 1). Alors que la société a déjà commencé à expérimenter les SCIs, la recherche sur le domaine «se concentre principalement sur les potentiels et les challenges techniques des SCIs plutôt que sur l'expérience des utilisateurs avec ce type d'interfaces» [152]. Il devient important pour la communauté scientifique «d'illustrer comment les SCIs peuvent s'intégrer et bénéficier à des contextes d'usages, tout comme comprendre comment les SCIs peuvent s'intégrer à la vie quotidienne des personnes de manières inattendues et nouvelles» [71, 152].



FIGURE 1 – Un afficheur à changement de forme déployé sur une place publique (Coca-Cola, 8 août 2017, Times Square, New York, USA).

Afficheurs cylindriques à changement de forme. Dans la première partie du mémoire, nous traitons des afficheurs cylindriques à changement de forme.

Dans un premier chapitre, nous décrivons les domaines de recherche de l'Interaction Homme-Machine abordés par cette thèse en Informatique qui s'intéresse à la virtualité augmentée notamment aux interfaces utilisateur tangibles, plus particulièrement aux interfaces à changement de forme et à deux de leurs domaines d'application, la physicalisation des données et l'interaction périphérique.

Dans un second chapitre, nous présentons une problématique et un état de l'art concernant les afficheurs cylindriques à changement de forme. Au milieu des espaces collectifs (p. ex., le lieu de travail) et publics (p. ex., une place publique), un seul afficheur planaire (p. ex., un écran plat) ne peut pas communiquer avec tout les utilisateurs qui l'entourent. En réponse à ce problème, des afficheurs cylindriques apparaissent. La plupart des afficheurs cylindriques ont une symétrie statique de révolution (p. ex., une forme unique en cylindre) et utilisent le changement de lumière (intensité, couleur) pour représenter des informations numériques à 360°. Nous imaginons RevoFORM, un concept d'afficheur cylindrique à changement de forme. En plus du changement de lumière, RevoFORM utilise le changement de forme pour représenter des informations numériques à 360° d'une manière plus expressive. RevoFORM dispose de deux types de changement de forme : l'asymétrie dynamique de révolution (p. ex., pour faire apparaître une image d'un visage en relief sur une partie de la surface cylindrique) et la symétrie dynamique de révolution (p. ex., pour passer d'une surface cylindrique à une surface conique). Nous questionnons l'utilité et l'utilisabilité de la symétrie dynamique de révolution pour les afficheurs cylindriques à changement de forme.

Dans un troisième chapitre, nous introduisons CairnFORM, un prototype d'afficheur cylindrique capable de changer de symétrie de révolution à l'aide d'une pile modulaire d'anneaux extensibles illuminés. Nous détaillons une solution technique complète pour la conception d'une pile modulaire d'anneaux extensibles illuminés. En relation avec un cas d'usage, nous posons trois questions de recherche concernant (1) l'utilisabilité de la symétrie de révolution pour informer les utilisateurs par physicalisation des données, (2) l'utilisabilité du changement de symétrie de révolution pour notifier sans déranger les utilisateurs par interaction périphérique et (3) l'expérience utilisateur sur la durée avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution.

Dans un dernier chapitre, nous répondons aux questions de recherche posées par des expérimentations avec des utilisateurs : (1) avec 90 participants pendant un événement public, nous avons utilisé un CairnFORM à 10 anneaux pour afficher un histogramme à anneaux physiques visualisant trois variations de données ordinales avec différentes amplitudes et durées : nous observons qu'un histogramme à anneaux physiques est plus efficace pour une tâche d'intervalle et une tâche de comparaison plutôt que pour une tâche d'ordonnancement ; (2) avec 30 participants en condition de laboratoire, nous avons utilisé un CairnFORM à 1 anneau avec trois vitesses différentes de mouvement dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention alors que l'utilisateur effectue une tâche de mémorisation à court terme dans le champ de vision centrale au centre de l'attention : nous observons que le changement de diamètre d'un anneau avec vitesse exponentielle est perçu plus souvent et plus calmement plutôt qu'avec une vitesse constante ou logarithmique ; (3) avec 6 participants sur un lieu de travail pendant 2 mois, nous avons déployé CairnFORM

et un écran plat en contexte d'usage afin de comparer l'expérience des utilisateurs sur la durée : nous observons que CairnFORM est aussi pragmatique mais plus hédonique qu'un écran plat. Cette différence de qualité hédonique sur la durée peut s'expliquer par l'aspect fascinant de la symétrie dynamique de révolution.

En résumé, les contributions de ces travaux de thèse concernant les afficheurs cylindriques à changement de forme sont les suivantes :

- RevoFORM, un concept d'afficheur cylindrique à changement de forme.
- CairnFORM, un prototype d'afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution utilisant une solution technique complète et détaillée d'une pile modulaire d'anneaux extensibles illuminés.
- Une expérimentation avec 90 participants pendant un évènement public qui montre que la symétrie de révolution est utilisable pour informer les utilisateurs par physicalisation des données : un histogramme à anneaux physiques visualisant des variations de données ordinales est plus efficace pour une tâche d'intervalle et une tâche de comparaison plutôt que pour une tâche d'ordonnancement.
- Une expérimentation avec 30 participants en condition de laboratoire qui montre que le changement de symétrie de révolution est utilisable pour informer les utilisateurs par physicalisation des données : un changement de diamètre d'un anneau avec vitesse exponentielle est perçu plus souvent et plus calmement dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention plutôt qu'avec une vitesse constante ou logarithmique.
- Une expérimentation avec 6 participants en contexte d'usage qui montre que les afficheurs cylindriques à symétrie dynamique de révolution offrent une expérience utilisateur supérieure sur la durée aux afficheurs planaires : après deux mois en contexte d'usage sur un lieu de travail, nous observons que CairnFORM est aussi pragmatique mais plus hédonique qu'un écran plat. Cette différence de qualité hédonique sur la durée peut s'expliquer par l'aspect fascinant de la symétrie dynamique de révolution.

Gestion de la demande en énergie. Dans la deuxième partie du mémoire, nous traitons du cas d'usage étudié pour les afficheurs sur le lieu de travail.

Dans un premier chapitre, nous présentons la problématique de la gestion de la demande en énergie. 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.

Dans un second chapitre, nous décrivons les domaines de recherche en Interaction Homme-Machine qui traitent des systèmes interactifs pour la sobriété et la propreté énergétique.

Dans un troisième chapitre, nous analysons un corpus de 67 systèmes interactifs pour la propreté et la sobriété énergétique discriminés selon 5 classes, 16 critères et 73 caractéristiques. Nous discutons de la compatibilité des différents types d'interface

utilisateur pour chaque étape du modèle transthéorique du changement de comportement notamment de la place des afficheurs déployés sur les espaces collectifs ou publics.

Dans un dernier chapitre, nous proposons une application des afficheurs sur le lieu de travail pour promouvoir la propreté énergétique en aidant les employés à décaler le chargement de batterie de leur ordinateur portable vers les heures de pic de production locale d'énergie renouvelable. À l'aide de SEDYL, un outil de simulation développé *ad hoc*, nous définissons et validons des consignes à donner aux employés pour appliquer la pratique. Pour aider les employés à appliquer les consignes *in situ*, nous proposons un histogramme vertical à afficher avec les afficheurs déployés sur le lieu de travail (p. ex., CairnFORM ou un écran plat).

En résumé, les contributions de ces travaux de thèse concernant la gestion de la demande en énergie sont les suivantes :

- Une analyse de la conception et la mise en oeuvre de 67 systèmes interactifs pour la propreté et la sobriété énergétique.
- Une discussion sur les types d'interface utilisateur pour le changement de comportement.
- Une application des afficheurs sur le lieu de travail pour aider les employés à décaler le chargement de batterie des ordinateurs portables.
- SEDYL, un outil pour simuler le décalage du chargement de batterie des ordinateurs portables.
- Des consignes pour décaler le chargement de batterie des ordinateurs portables.
- Un histogramme vertical à afficher pour aider à décaler le chargement des batteries.

Première partie

Afficheurs cylindriques à changement de forme

Chapitre 1

Domaines de recherche

Ce chapitre décrit les domaines de recherche de l'Interaction Homme-Machine abordés par cette thèse en Informatique. L'interface utilisateur est une entité existant dans une réalité mixte entre le réel et le virtuel et dont les ressources d'interaction évoluent sur un continuum de réalité-virtualité entre réalité augmentée et virtualité augmentée. Cette thèse s'intéresse à la virtualité augmentée et contribue aux interfaces utilisateur tangibles et plus particulièrement aux interfaces à changement de forme. Elle contribue également à la physicalisation des données et à l'interaction périphérique, deux domaines d'application des interfaces à changement de forme.

1.1 Informatique

Depuis 1990, l'Informatique est un domaine de recherche en pleine expansion qui est piloté par l'émergence de nouveaux domaines d'application et par les avancées technologiques permettant de casser d'anciens verrous scientifiques, de relever de nouveaux défis et de créer nouvelles opportunités de recherche [88]. Parmi les domaines d'application émergents (figure 1.1), on compte le *Génie Logiciel (GL)*, l'*Infographie (CG)*, l'*Intelligence Artificielle (IA)* et notamment l'*Interaction Homme-Machine (IHM)*.

1.2 Interaction Homme-Machine

L'*Interaction Homme-Machine (IHM)* est une discipline de recherche née dans les années 1970 [25] qui a pour mission «l'élaboration de théories, de modèles, de méthodes et de solutions techniques pour la conception et la mise en œuvre de systèmes interactifs utiles, utilisables et plaisants, et ceci en toute circonstance» [36]. Un *Système Interactif (SI)* est décomposable en deux entités : le *Système* qui rassemble les données et les fonctions de calcul informatique et l'*Interface Utilisateur* qui rassemble les éléments matériels servant d'intermédiaires entre le système et l'utilisateur [36]. Les éléments matériels de cette interface, comme l'écran et la souris, perceptibles et actionnables

par l'utilisateur, tiennent le rôle de ressources d'interaction [36]. Ainsi, l'utilisateur et le système communiquent par la perception et l'actionnement de ces ressources.

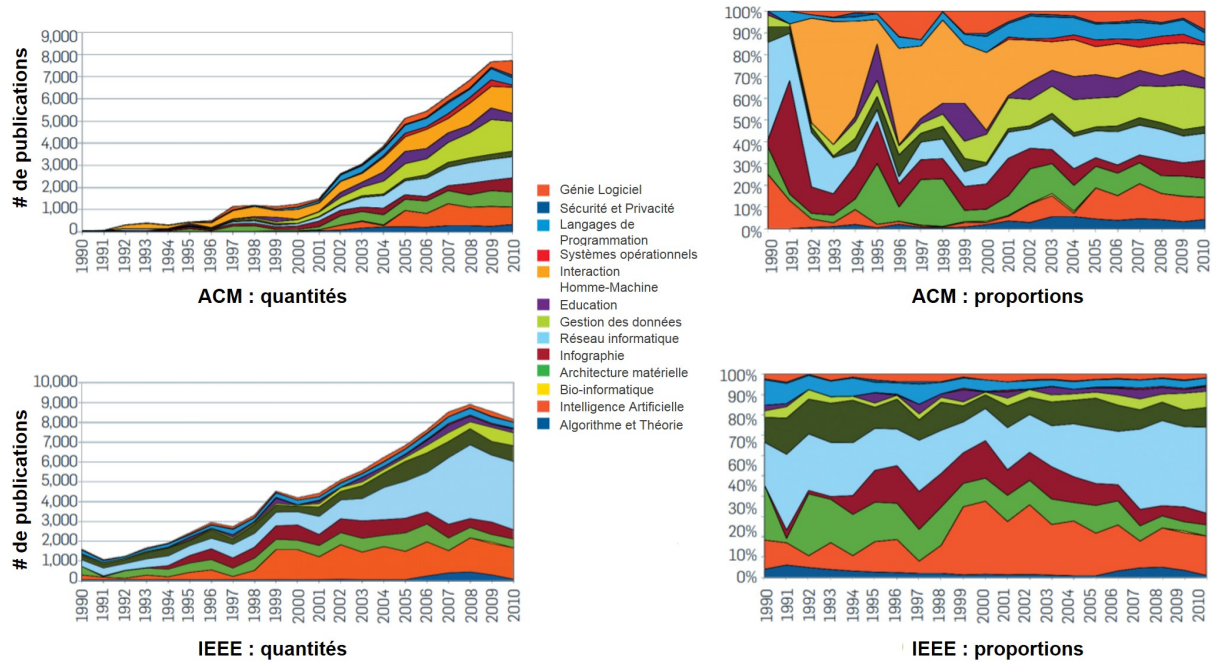


FIGURE 1.1 – Les fréquences et les proportions des publications dans les domaines d'application de la recherche en Informatique de 1990 à 2010 à partir des bases de données ACM et IEEE [88].

1.3 Continuum de réalité-virtualité

L'interface utilisateur est une entité à la frontière entre le monde virtuel (où existe le système) et le monde réel (où existe l'utilisateur). À cette frontière, les ressources d'interaction évoluent au sein d'une réalité mixte de ces deux mondes. En 1995, Milgram et al. [129] introduisent le continuum de réalité-virtualité qui décompose la *Réalité Mixte (RM)* en deux catégories (figure 1.2) : la *Réalité Augmentée (RA)* et la *Virtualité Augmentée (VA)*. La RA regroupe les ressources d'interaction qui augmentent l'interaction de l'utilisateur avec le monde réel par des éléments du monde virtuel [44]. La VA regroupe les ressources d'interaction qui augmentent l'interaction de l'utilisateur avec le monde virtuel par des éléments du monde réel [44]. D'après Hoonlor et al. [88], la RA est devenue un sujet de prédilection en IHM au début des années 2000 alors que la VA l'est devenue à la fin des années 2000 avec l'essor des *Interfaces Utilisateurs Tangibles (TUIs)*.

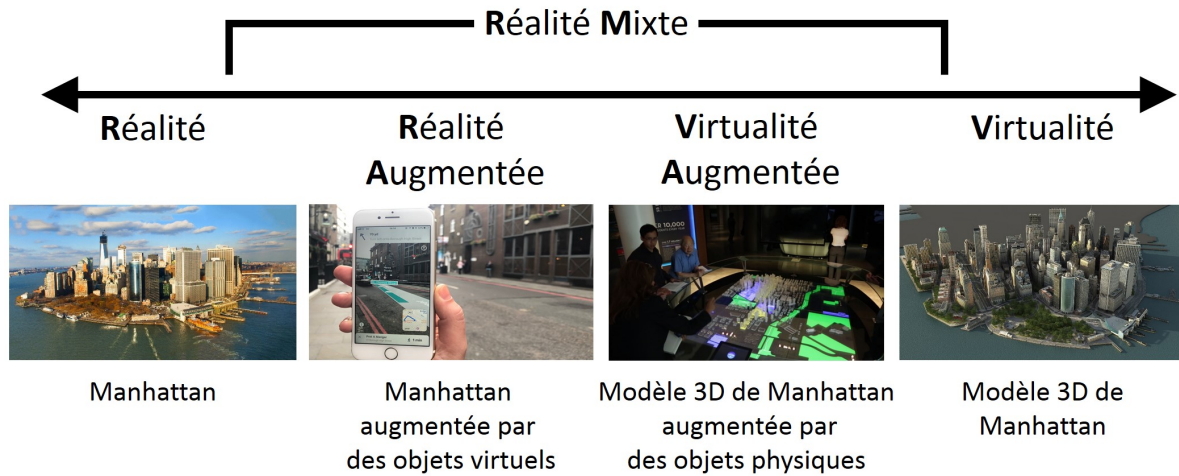


FIGURE 1.2 – Une illustration du continuum de réalité-virtualité [129].

1.4 Interfaces utilisateur tangibles

En 1993, Wellner et al. [190] évoquent le fait que nous vivons dans un monde complexe rempli d'une multitude d'objets, d'outils et de personnes avec lesquels nous interagissons de diverses façons. Pour autant, ils indiquent que la plupart de nos tâches avec les systèmes sont réalisées avec une interface utilisateur limitée à un écran, un clavier et une souris. En 1995, Fitzmaurice et al. [61] présente les *Graspable User Interfaces* comme des interfaces permettant à l'utilisateur de saisir des objets physiques pour manipuler des objets numériques. En 1997, Ishii et Ullmer [94] présentent la vision des «Tangible Bits» en opposition aux «Painted Bits» (c.-à-d. les *interfaces utilisateur graphiques (GUIs)*). Ils introduisent les *Interfaces Utilisateur Tangibles (TUIs)* comme des interfaces utilisant des objets physiques pour représenter et manipuler des informations numériques.

En 2010, Shaer et Hornecker [161] réalisent une revue de la littérature après 15 ans de conception et de mise en œuvre de TUIs. Elles identifient quatre genres :

- *Interfaces tangibles ambiantes*. Elles proposent uniquement des ressources d'interaction VA en sortie. Par exemple, PinWheel [93] est un moulin à vent en sortie du système qui visualise le trafic d'un réseau informatique (figure 1.3a).
- *Interfaces tangibles avec table interactive*. Elles offrent des ressources d'interaction VA en entrée ou sortie sur une table interactive. Par exemple, GeoTUI [37] ou encore Reactable [104]. Ce dernier propose un ensemble d'objets physiques à poser sur une table interactive en entrée du système qui permettent aux utilisateurs de composer de la musique (figure 1.3b).
- *Interfaces tangibles avec réalité augmentée*. Elles emploient des ressources d'interaction VA en entrée ou sortie combinées à des ressources d'interaction RA en sortie. Par exemple, SandScape [92] est un bac à sable en entrée du système qui

permet aux utilisateurs de modifier la topologie d'un modèle 3D d'un terrain, couplé à un vidéo-projecteur en sortie du système qui projette la topologie du modèle 3D du terrain directement sur le sable (figure 1.3c).

- *Interfaces tangibles incarnées.* Elles exploitent simultanément des ressources d'interaction VA en entrée et en sortie. Par exemple, Materiable [133] est une matrice de tiges motorisées utilisée simultanément en entrée et en sortie du système permettant aux utilisateurs de directement manipuler une surface contrôlée par le système (figure 1.3d).

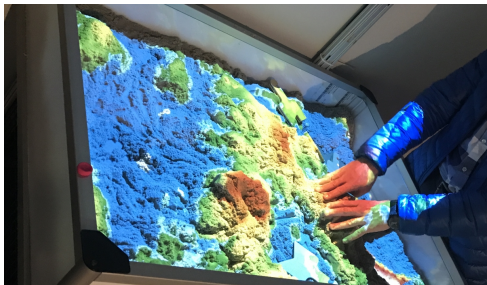
Shaer et Hornecker listent également plusieurs forces reconnues des TUIs [161] telles que la *collaboration* (c.-à-d. les TUIs supportent l'apprentissage collaboratif et favorisent le dialogue entre les experts et les parties prenantes), la *localisation* (c.-à-d. les TUIs existent dans le monde réel et se placent dans des contextes précis) et la *réflexion tangible* (c.-à-d. en exploitant les propriétés des objets physiques, les TUIs stimulent la connexion entre le corps humain et le monde réel ce qui contribue à renforcer la réflexion de l'utilisateur). Enfin, Shaer et Hornecker évoquent certaines limitations aux TUIs contemporaines [161] notamment la *malléabilité* (c.-à-d. les informations numériques sont malléables, facile à créer, à modifier, à répliquer et à distribuer alors que les ressources d'interaction offertes par les TUIs actuelles sont rigides et statiques). Elles relèvent que la recherche sur les interfaces à changement de forme promet de répondre au manque de malléabilité des TUIs actuelles.



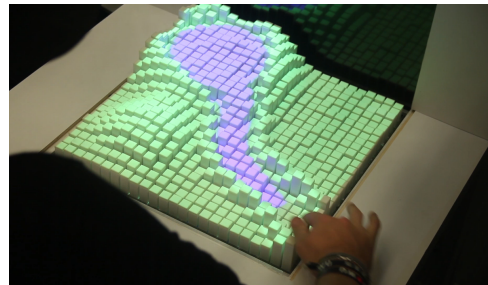
(a) PinWheel [93], une interface tangible ambiante.



(b) Reactable [104], une interface tangible avec table interactive.



(c) SandScape [92], une interface tangible avec réalité augmentée.



(d) Materiable [133], une interface tangible incarnée.

FIGURE 1.3 – Un exemple de chaque genre de TUIs.

1.5 Interfaces à changement de forme

Dans la lignée des TUIs, les *interfaces à changement de forme* (*Shape-Changing Interfaces (SCIs)*) sont «conçues, avec l’hypothèse que dans un futur proche, les objets physiques deviendront aussi malléables que leurs homologues virtuels» [91, 170, 172]. Pour Ishii et al. [91] cela implique un «nouveau genre de matière capable de changer dynamiquement de propriétés». En science-fiction, il est commun de trouver des illustrations de ce que pourrait être cette «matière» programmable par nano-technologie (p. ex., figure 1.4).



FIGURE 1.4 – Une «matière» programmable par nano-technologie extraite du film *Man of Steel* (2013).

Avec les avancées technologiques récentes sur les actionneurs et les matériaux intelligents, on observe un nombre croissant de travaux sur les interfaces à changement de forme [170]. Les SCIs récentes emploient des actionneurs (p. ex., mécaniques [14], acoustiques [160], magnétiques [115], pneumatiques [196], thermiques [83], biologiques [197]) pour changer les propriétés physiques (p. ex., position [114], orientation [179], forme [89], volume [107], texture [117], viscosité [98]) des courbes (figure 1.5a), des surfaces (figure 1.5b), et des volumes (figure 1.5c) qu’elles utilisent comme entrée ou sortie du système (en sortie seulement [179], en sortie et en entrée simultanément [133]).

Plusieurs forces des SCIs sont identifiées à ce jour [152] telles que la *représentation tangible dynamique* (c.-à-d. le changement de forme permet de communiquer dynamiquement les différentes données du système), l’*affordance dynamique* (c.-à-d. le changement de forme permet de communiquer dynamiquement les différentes fonctions du système) et le *retour haptique* (c.-à-d. le changement de forme ajoute de la kinesthésie à l’interaction [175, 120]). Parmi les applications récurrentes des SCIs [170], il y a notamment la physicalisation des données et l’interaction périphérique.

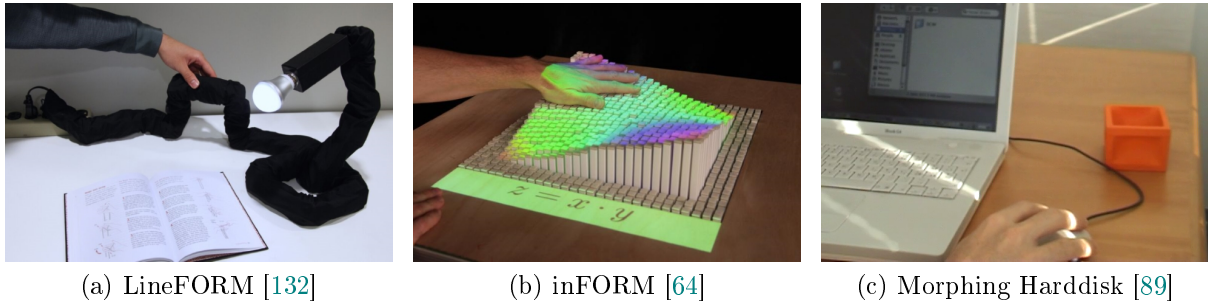


FIGURE 1.5 – Trois SCIs altérant la forme d’une courbe (a), d’une surface (b) et d’un volume (c).

1.6 Physicalisation des données

Récemment, la *Physicalisation des données* (*DataPhys*) a émergé comme un nouveau champ de recherche à l’intersection entre la *Visualisation des données* (*InfoViz*) et les *Tangible User Interfaces* (*TUIs*). En 2015, Jansen et al. [97] définissent une *physicalisation* comme un «artefact physique dont les propriétés géométriques et matérielles encodent une donnée» et proposent de considérer la *Physicalisation des données* comme un domaine de recherche qui «examine comment les représentations physiques des données (c.-à-d. les 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 dynamiques à lignes physiques (figure 1.6a), à barres physiques (figure 1.6b) et en camembert physique (figure 1.6c).

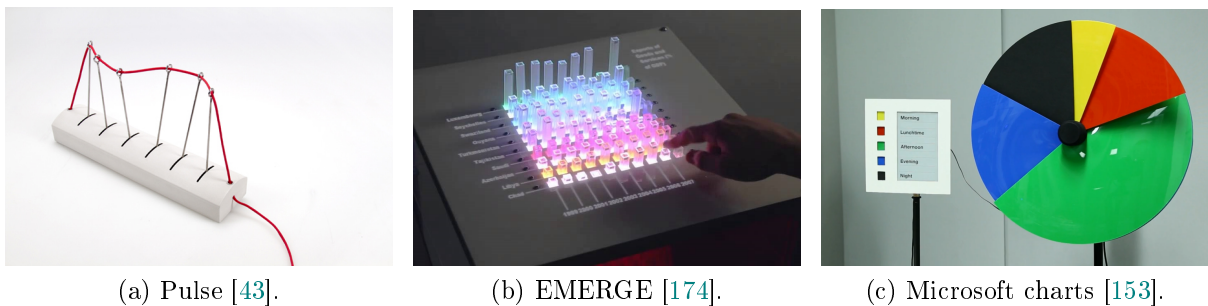


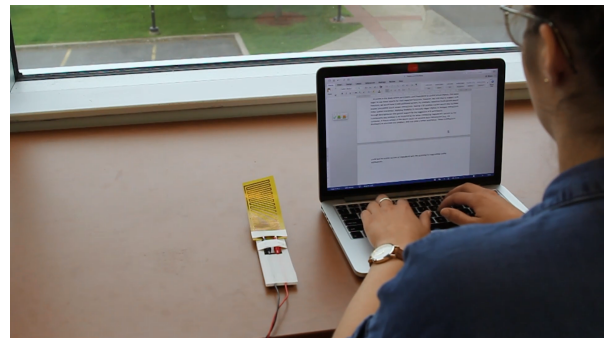
FIGURE 1.6 – Trois SCIs utilisées pour un diagramme dynamique à lignes physiques (a), à barres physiques (b) et en camembert physique (c)

1.7 Interaction périphérique

La *Conscientisation Ambiante* est la capacité des êtres humains qui leur permet d'être conscients des informations environnantes [192]. En 1996, Weiser et Brown [188] 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 passé, de ce qui se passe et de ce qui va se passer autour d'eux [188]. Dans la lignée des technologies calmes, les *interfaces ambiantes* utilisent des artefacts perceptibles (p. ex., forme, mouvement, son, couleur, lumière, odeur) pour subtilement représenter des (changements d') informations numériques. Récemment, le terme *Interaction Périphérique (PI)* 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 ciblent des interactions simples en périphérie de l'attention de l'utilisateur qui peuvent être réalisées avec un minimum d'attention et qui se reposent sur des théories sur les capacités humaines telles que la proprioception [16], l'attention divisée [191], les processus habituels [11] ou encore le continuum interaction-attention [10, 4]. Les interfaces ambiantes sont normalement utilisées pour des tâches secondaires (p. ex., changer son statut dans une messagerie instantanée, changer la taille du pinceau lorsque l'on dessine sur un logiciel d'édition graphique) en parallèle d'une tâche principale (p. ex., lire, écrire, dessiner). Depuis 2013, on trouve des travaux proposant d'utiliser le changement de forme avec les interfaces périphériques pour notifier sans déranger les utilisateurs [41, 102, 112, 137] (figure 1.7).



(a) Wrigglo [137].



(b) Peripheral Circuit [102].

FIGURE 1.7 – Deux SCIs utilisées comme interfaces périphériques pour notifier sans déranger les utilisateurs de l'arrivée d'un message sur une messagerie instantanée.

Chapitre 2

Problématique & État de l’art

Ce chapitre décrit la problématique abordée par cette thèse sur les afficheurs cylindriques à changement de forme. Au milieu d’un espace collectif (p. ex., le lieu de travail) ou public (p. ex., une place publique), un seul afficheur planaire (p. ex., un écran plat) ne peut pas communiquer avec tout les utilisateurs qui l’entourent. En réponse à ce problème, on voit apparaître des afficheurs cylindriques. La plupart des afficheurs cylindriques ont une symétrie statique de révolution (p. ex., une seule forme de cylindre) et utilisent le changement de lumière (intensité, couleur) pour représenter des informations numériques à 360°. Ces afficheurs cylindriques ont tendance à distordre les images qu’ils affichent autour de l’axe de symétrie de révolution. Comme solution à ce problème, nous imaginons RevoFORM, un concept d’afficheur cylindrique à changement de forme. En plus du changement de lumière, RevoFORM utilise le changement de forme pour représenter des informations numériques à 360° d’une manière plus expressive. RevoFORM dispose de deux types de changement de forme : l’asymétrie dynamique de révolution (p. ex., pour faire apparaître une image d’un visage en relief sur une partie de la surface cylindrique et ainsi réduire la distorsion de l’image affichée) et la symétrie dynamique de révolution (p. ex., pour passer d’une surface cylindrique à une surface conique). Nous questionnons l’utilité et l’utilisabilité de la symétrie dynamique de révolution pour les afficheurs cylindriques.

2.1 Afficheurs sur les espaces collectifs et publics

Depuis près d'un siècle, des afficheurs sont déployés sur les espaces collectifs (p. ex., hall d'entrée d'une entreprise) et les espaces publics (p. ex., aéroports, gares) pour communiquer de l'information (p. ex., civique, publicitaire, sanitaire) au plus grand nombre d'utilisateurs [6]. Aujourd'hui, sur ces espaces on retrouve majoritairement des afficheurs planaires (figure 2.1), certains offrant de l'interaction tactile [6].



FIGURE 2.1 – Des afficheurs planaires dans un métro (8 Août 2017, New York, USA).

2.2 Afficheurs cylindriques

Un problème récurrent avec les espaces collectifs et publics est que les utilisateurs arrivent de différentes directions. Au milieu de ces espaces, un seul afficheur planaire ne peut pas communiquer avec tout les utilisateurs qui l'entourent. Avec la volonté de communiquer avec un maximum d'utilisateurs, on voit apparaître des afficheurs cylindriques (figure 2.2), certains offrant de l'interaction tactile [13]. Contrairement aux afficheurs planaires, les afficheurs cylindriques sont visibles (et interactifs p. ex., avec interaction tactile) à 360° autour d'un axe [17]. Ils 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, et cela, tout en conservant une certaine intimité [6].



FIGURE 2.2 – Des afficheurs cylindriques dans un aéroport (28 Février 2012, Pékin, Chine).

2.3 RevoFORM

Aujourd'hui, la plupart des afficheurs cylindriques ont une symétrie statique de révolution (p. ex., une forme unique en cylindre) et utilisent le changement de lumière (intensité, couleur) pour représenter des informations numériques à 360°. Cependant, un problème avec ces afficheurs cylindriques est que les images qu'ils affichent sont distordues autour de l'axe de la symétrie de révolution [6]. Avec les avancées technologiques récentes sur les actionneurs et les matériaux intelligents, nous anticipons l'arrivée des afficheurs cylindriques à changement de forme comme solution à ce problème. Nous imaginons RevoFORM (figure 2.3), un concept d'afficheur cylindrique à changement de forme. En plus du changement de lumière, RevoFORM utilise le changement de forme pour représenter des informations numériques à 360° d'une manière plus expressive. RevoFORM dispose de deux types de changement de forme : l'asymétrie dynamique de révolution (figure 2.3b) (p. ex., pour faire apparaître une image d'un visage en relief sur une partie de la surface cylindrique et ainsi réduire la distorsion de l'image affichée) et la symétrie dynamique de révolution (figure 2.3c) (p. ex., pour passer d'une surface cylindrique à une surface conique). Nous questionnons l'utilité et l'utilisabilité de la symétrie dynamique de révolution pour les afficheurs.

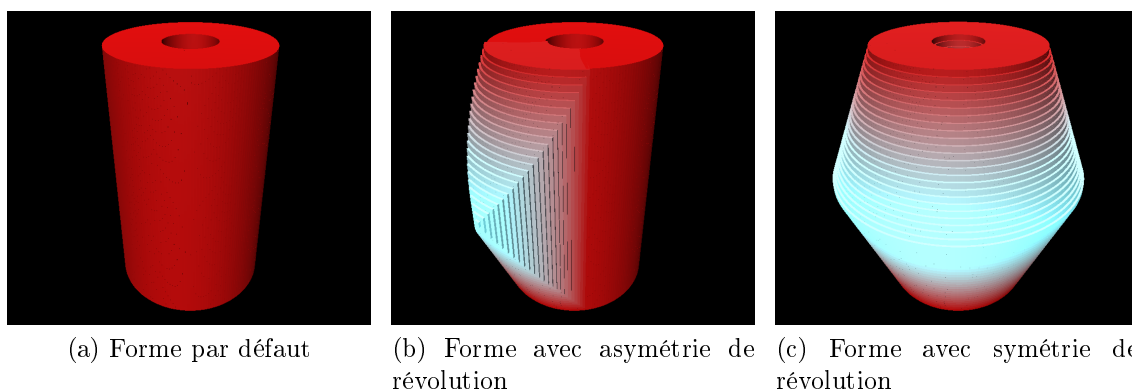


FIGURE 2.3 – RevoFORM, un concept d'afficheur cylindrique à changement de forme.

2.4 Utilité et utilisabilité de la symétrie dynamique de révolution

Dans la littérature scientifique sur les afficheurs cylindriques à changement de forme, Wu [194] propose d'utiliser la symétrie dynamique de révolution pour représenter des informations numériques à 360° *de manière identique*. Pour permettre aux SCIs de changer de symétrie de révolution, deux travaux de recherche proposent la conception d'une pile modulaire d'anneaux extensibles illuminés [113, 194] (figure 2.4) : WeatherLamp [194] utilise une pile modulaire de 3 anneaux extensibles (figure 2.4a) et Amphorm [113] utilise une pile fixe de 5 anneaux extensibles indirectement illuminés (figure 2.4b). Cependant,

les solutions techniques proposées sont incomplètes et peu détaillées pour être intégrées dans un afficheur cylindrique [194, 113]. À la section 3.1 (page 23), nous détaillons une solution technique complète pour la conception d’une pile modulaire d’anneaux extensibles illuminés. Cette solution technique est utilisée par CairnFORM, un prototype d’afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution.

Plus précisément, Wu [194] propose deux usages de la symétrie dynamique de révolution pour les afficheurs : la symétrie de révolution pour informer les utilisateurs à 360° par physicalisation des données et le changement de symétrie de révolution pour notifier sans déranger les utilisateurs à 360° par interaction périphérique. Cependant, aucune étude n’est reportée sur l’utilisabilité de ces deux usages. De plus, aucune étude n’est reportée sur l’expérience des utilisateurs sur la durée avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution en contexte d’usage.



(a) WeatherLamp [194]

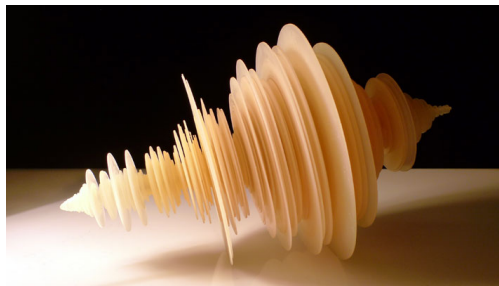


(b) Amphorm [113]

FIGURE 2.4 – Deux solutions techniques pour la conception d’une pile modulaire d’anneaux extensibles illuminés afin de permettre aux SCIs de changer de symétrie de révolution.

2.4.1 Utilisabilité de la symétrie de révolution pour informer par physicalisation des données

En physicalisation des données, on retrouve des physicalisations avec symétrie de révolution (figure 2.5). Ces artefacts encodent les données de manière identique à 360° autour d’un axe et semblent appropriées pour visualiser des données sur les espaces sociaux ouverts. Pour autant, les physicalisations existantes sont statiques et l’utilisabilité des physicalisations avec symétrie de révolution pour informer les utilisateurs n’a pas été étudiée à notre connaissance. À la section 4.1 (page 32), nous rapportons une expérimentation avec 90 participants pendant un événement public concernant l’utilisabilité de la symétrie de révolution pour informer les utilisateurs par physicalisation des données.



(a) Earthquake Sculpture [43]



(b) Political Satire [43]



(c) Vessels of Irelands Past [86].

FIGURE 2.5 – Trois physicalisations avec symétrie de révolution qui encodent des données de manière identique à 360°.

2.4.2 Utilisabilité du changement de symétrie de révolution pour notifier sans déranger par interaction périphérique

En interaction périphérique, on retrouve des afficheurs avec symétrie de révolution utilisant le changement de lumière pour notifier sans déranger les utilisateurs à 360° (figure 2.6). Cependant, utiliser le changement de symétrie de révolution pour notifier sans déranger les utilisateurs n'a pas été étudié à notre connaissance. À la section 4.2 (page 42), nous rapportons une expérimentation avec 30 participants en condition de laboratoire concernant l'utilisabilité du changement de symétrie de révolution pour notifier sans déranger les utilisateurs par interaction périphérique.



(a) Statube [80]



(b) EnergyOrb [58]

FIGURE 2.6 – Deux afficheurs avec symétrie de révolution utilisant le changement de lumière pour notifier sans déranger les utilisateurs à 360°.

2.4.3 Expérience utilisateur sur la durée avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution en contexte d'usage

À notre connaissance, intégrer un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution à un contexte d'usage sur un espace social ouvert et étudier l'expérience des utilisateurs sur la durée avec un tel afficheur n'a pas été réalisé à notre connaissance. À la section 4.3 (page 56), nous rapportons une expérimentation avec 6 participants dans deux bureaux ouverts d'un lieu de travail pendant 2 mois qui compare l'expérience des utilisateurs sur la durée avec un afficheur planaire (c.-à-d. un écran plat) et celle avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution (c.-à-d. CairnFORM).

Chapitre 3

Proposition

Ce chapitre présente CairnFORM, un prototype d’afficheur cylindrique à changement de forme capable de changer de symétrie de révolution à l’aide d’une pile modulaire d’anneaux extensibles illuminés. Nous détaillons une solution technique complète pour la conception d’une pile modulaire d’anneaux extensibles illuminés. En relation avec un cas d’usage, nous posons trois questions de recherche concernant (1) l’utilisabilité de la symétrie de révolution pour informer les utilisateurs par physicalisation des données, (2) l’utilisabilité du changement de symétrie de révolution pour notifier sans déranger les utilisateurs par interaction périphérique et (3) l’expérience utilisateur sur la durée avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution en contexte d’usage.

3.1 CairnFORM

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 [7, 49, 178]. On appelle communément ces amas de pierres, des *cairns* (figure 3.1). Inspiré par cet usage millénaire des pierres, nous proposons CairnFORM, un prototype d’afficheur cylindrique à changement de forme capable de changer de symétrie de révolution à l’aide d’une pile modulaire d’anneaux extensibles illuminés.



FIGURE 3.1 – Un *cairn*, du gaélique écossais *cárn*, apparenté au breton *karn* signifiant monticule de pierres.

3.1.1 Un anneau

Pour concevoir un anneau empilable, extensible et illuminé, nous avons suivi un processus de conception illustré en figure 3.2 : inspiré par trois mécanismes existants d’anneau extensible *HobermanRing-7points* (a), *HobermanRing-12points* (b) (utilisé par Amphorm [113]) et *DiscontinuousRing-6arms-6arcs* (c) (utilisé par WeatherLamp [194]), nous avons prototypé un anneau extensible et empilable avec la volonté de : 1) offrir un espace intérieur fixe suffisant pour y ajouter de l’électronique de contrôle (p. ex., moteur, capteur) ; 2) toujours maintenir une forme similaire à un anneau continu et régulier ; 3) et atteindre une forme avec un diamètre deux fois supérieur au diamètre initial. Après avoir conçu *DiscontinuousRing-4arms-4arcs* (d) et *IrregularRing-4arms-8arcs* (e), nous avons conçu le mécanisme final *RingLike-8arms-8arcs* (f) et nous y avons ajouté de l’illumination directe (g).

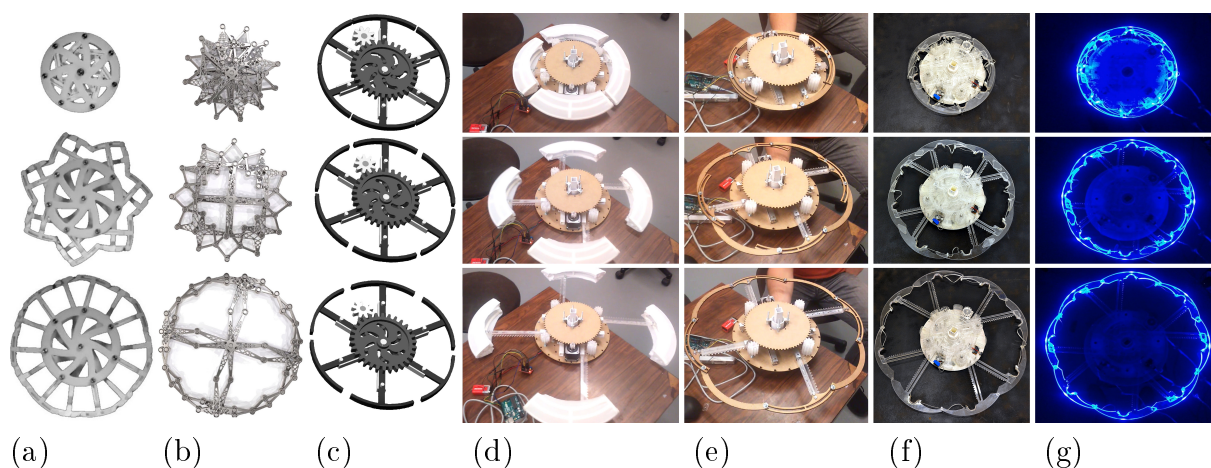


FIGURE 3.2 – Le processus de conception d’un anneau extensible illuminé.

Le prototype final est illustré en figure 3.3 et le modèle CAO est disponible en ligne¹. La colonne centrale permet de rendre l’anneau empilable. Un moteur pas-à-pas TRINAMIC QSH4218-41-10-035 avec un engrenage de transmission actionne une roue dentée. Cette roue actionne quatre pinions. Chaque pignon actionne une crémaillère axiale et une crémaillère diagonale. Au bout de chaque crémaillère, il y a un arc qui représente un huitième d’un anneau. Lorsque l’anneau est complètement fermé, les arcs forment un anneau de 35 cm de diamètre. Lorsque l’anneau est complètement ouvert, les arcs forment une forme similaire à un anneau de 62 cm de diamètre. Un capteur de fin de course détecte la fermeture complète de l’anneau. L’anneau est illuminé par 24 NeoPixel RGB LEDs (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 le long d’une crémaillère. La colonne est fabriquée en PLA par impression 3D. Les autres parties sont en PMMA transparent, découpées par découpe laser et assemblées par

1. <https://cad.onshape.com/documents/7d4ecae370a1e03250f148cc/w/40919688efd268263900abc1/e/6c37dd97791037a37d7dd39b>, visité le 14 octobre 2026.

collage chimique 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.

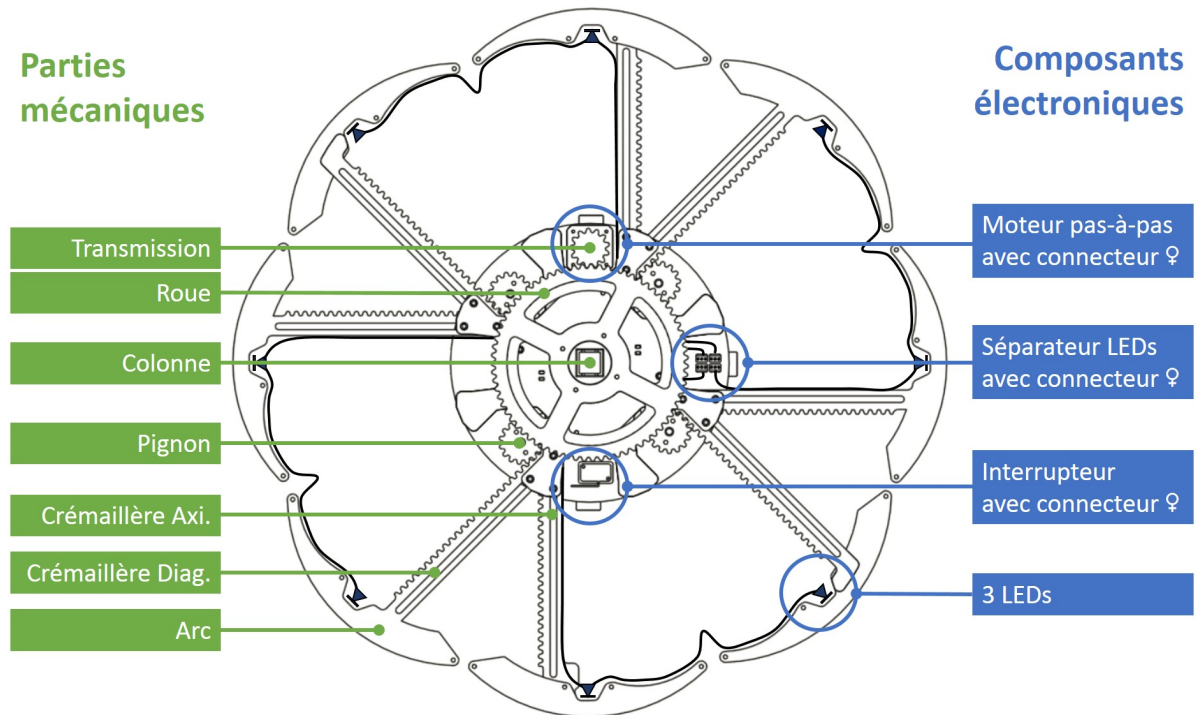


FIGURE 3.3 – Les parties mécaniques et électroniques du prototype final d'anneau extensible illuminé.

3.1.2 Une pile d'anneaux

Par la suite, nous avons usiné et empilé 10 anneaux extensibles illuminés. Pour contrôler un CairnFORM à 10 anneaux (figure 3.5), nous avons utilisé le matériel et le logiciel illustré en figure 3.4 : un Raspberry PI 3 (RPI3) communique avec 5 Adafruit stepper motor HATs via un bus I²C. Chaque HAT contrôle deux moteurs pas-à-pas (c.-à-d. deux anneaux). Pour détecter que l'anneau est complètement fermé, le RPI3 communique via GPIO avec un Adafruit perma-proto HAT sur lequel est soudé 10 résistances de tirage (une résistance par interrupteur mécanique c.-à-d. par anneau). Pour contrôler les LEDs, le RPI3 communique par port série avec un Arduino Mega 2560 à 10 sorties PWM (une sortie PWM par séparateur LEDs c.-à-d. par anneau). Le pilote de CairnFORM est écrit en Python 2.7 et permet de contrôler des anneaux en série ou en parallèle. Le code source est disponible sur Github² sous licence GPL.

Le pilote de CairnFORM est composé de quatre classes. Pour planifier la prochaine transformation de la pile, un objet de la classe *CairnFormHandler* est instancié qui lui-

2. <https://github.com/maximedaniel/CairnFORM>, visité le 14 octobre 2026.

même instancie un tableau de 10 objets *RingHandler*. La classe *RingHandler* modélise un anneau (adresse, diamètre, couleur) et utilise deux files pour stocker la prochaine transformation de l'anneau par interval (p. ex., une transformation toutes les 0,1 secondes) : une file pour le changement de couleur et une file pour le changement de diamètre. L'objet *CairnFormHandler* appelle la transformation des anneaux en séquence ou en parallèle : lorsqu'un objet *RingHandler* appelle l'anneau à se transformer, il instancie un processus léger dans lequel un objet *MotionHandler* est appelé à vider la file du changement de diamètre de l'anneau et un objet *LightHandler* est appelé à vider la file du changement de couleur de l'anneau. Connaissant l'adresse de l'anneau, l'objet *MotionHandler* lit l'état de l'interrupteur associé à l'adresse de l'anneau en utilisant la bibliothèque Python GPIO et contrôle le moteur pas-à-pas associé à l'adresse de l'anneau en utilisant la bibliothèque Python Adafruit. Connaissant l'adresse de l'anneau, l'objet *LightHandler* envoie l'adresse et les valeurs RGB associées à l'Arduino Mega 2560 en utilisant la bibliothèque Python Arduino. Un programme écrit en C installé sur la carte Arduino reçoit l'adresse et les valeurs RGB sur le port série afin de mettre à jour les LEDs correspondantes à l'adresse de l'anneau. Les éléments décrits permettent de contrôler de 1 à 10 anneaux. En ajoutant des HATs au Raspberry PI 3 et des cartes Arduino, on peut empiler jusqu'à 24 anneaux (limité par la largeur maximale des faisceaux électriques).

Chaque anneau peut adopter 256^3 lumières différentes et 250 diamètres différents. Le prototype actuel de CairnFORM à 10 anneaux peut afficher 256^{30} combinaisons de lumières différentes sur 250^{10} symétries de révolution différentes. Nous avons identifié plusieurs limitations à la solution technique proposée :

- *Facteur d'agrandissement.* Les anneaux peuvent seulement atteindre un diamètre 1,8 fois supérieur au diamètre initial (de 35 cm à 62 cm).
- *Bruit du mouvement.* L'actionnement d'un anneau génère ~ 60 dB à une distance de 1 mètre avec un moteur sous 5V, à 60 RPM et en mode double bobines.
- *consommation d'énergie.* Dans le pire des cas, un CairnFORM à 10 anneaux tire 122 W (jusqu'à 72 W pour 240 LEDs et jusqu'à 50 W pour 10 moteurs).
- *Coût de fabrication.* Une pile de 10 anneaux coûte ~ 2000 € de matériaux pour usiner les anneaux, ~ 300 € d'électroniques pour le contrôle des anneaux et ~ 50 € pour le socle.

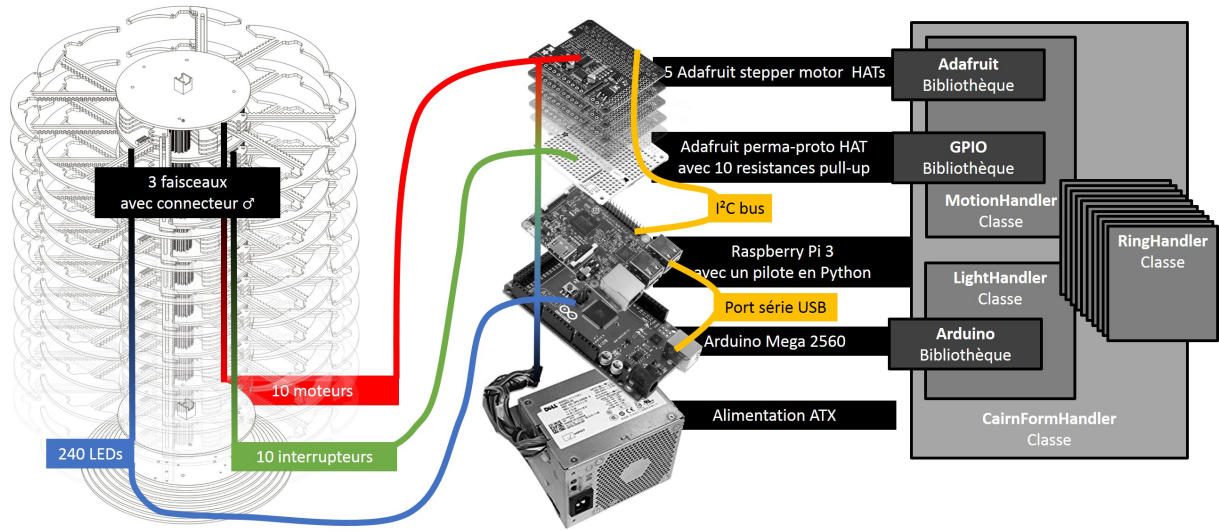


FIGURE 3.4 – Les éléments matériels et logiciels pour contrôler un CairnFORM à 10 anneaux.

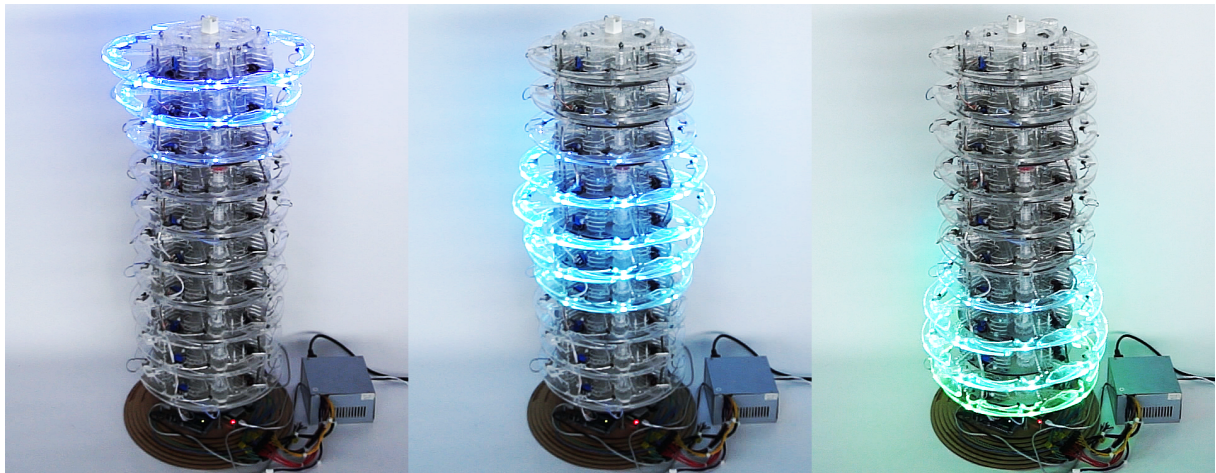


FIGURE 3.5 – Un CairnFORM à 10 anneaux.

3.2 Cas d'usage

En 2012, Rasmussen et al. [152] constatent que l'expérience des utilisateurs avec les SCIs est majoritairement évaluée par des expérimentations en condition de laboratoire. Cependant, l'effet de nouveauté [163] (c.-à-d. le participant a une réponse au stress plus élevée les premières fois qu'il fait face à une nouvelle expérience) et l'effet de l'observateur [126] (c.-à-d. le participant a conscience d'être observé et modifie son comportement en conséquence) sont des facteurs connus pour biaiser l'expérience des utilisateurs en condition de laboratoire. Pour minimiser, voire supprimer ces effets, il

est conseillé d'évaluer l'expérience des utilisateurs par des expérimentations en contexte d'usage (pendant au moins deux mois [171]). Il devient important pour la communauté d'illustrer «comment les SCIs peuvent s'intégrer et bénéficier à des contextes d'usages, tout comme comprendre comment les SCIs peuvent s'intégrer à la vie quotidienne des personnes de manières inattendues et nouvelles» [71, 152]. Nous proposons d'étudier l'expérience des utilisateurs sur la durée pour un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution (c.-à-d. CairnFORM) en contexte d'usage. Pendant 2 mois, nous avons déployé CairnFORM dans un bureau ouvert d'un lieu de travail afin d'aider les employés à décaler le chargement de la batterie de leur ordinateur portable vers les heures de pic de production locale d'énergie renouvelable.

Pour aider les employés dans cette tâche, nous avons défini des consignes à appliquer à l'aide d'un histogramme vertical à afficher sur un afficheur déployé sur un lieu de travail (p. ex., un écran plat ou CairnFORM). Le choix du cas d'usage, des consignes à appliquer, des données à exploiter, du filtre appliqué aux données à visualiser et de la visualisation des données à afficher sont justifiés au chapitre 8 (page 115). Ledit histogramme vertical visualise une à une les variations de production locale d'énergie renouvelable à venir pendant la journée de travail : la production locale d'énergie renouvelable pour chaque heure de la variation est représentée avec CairnFORM par la largeur des anneaux verts. Plus la production locale d'énergie renouvelable sera grande pendant l'heure, plus l'anneau est large (voir figure 3.6). L'histogramme visualise également l'heure actuelle : l'heure actuelle est représentée avec CairnFORM par l'anneau bleu (voir figure 3.6). Enfin, l'histogramme visualise la plus grande profondeur de charge réalisée (c.-à-d. le plus grand pourcentage de batterie chargé) par les employés pour les heures passées : la plus grande profondeur de charge pour chaque heure passée est représentée avec CairnFORM par la couleur des anneaux précédents l'anneau bleu. Plus la profondeur de charge était grande pendant l'heure, plus l'anneau vert devient blanc (voir figure 3.6).

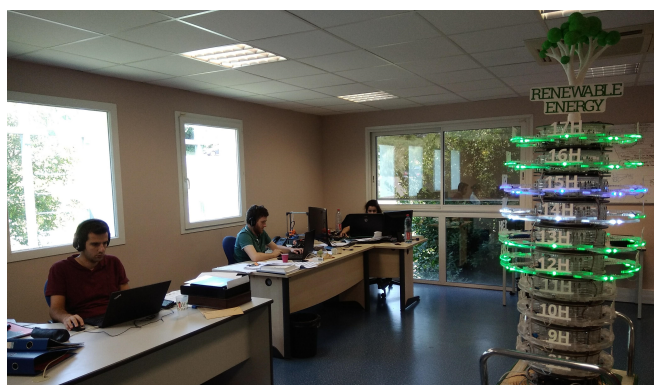


FIGURE 3.6 – Le CairnFORM à 10 anneaux déployé dans un bureau ouvert d'un lieu de travail affichant l'histogramme vertical proposé au chapitre 8 (page 115) afin d'aider les utilisateurs à décaler le chargement de la batterie de leur ordinateur portable vers les heures de pic de production locale d'énergie renouvelable.

3.3 Questions de recherche

Selon le modèle *Motivation-Opportunity-Abilities (MOA)*[123] (figure 3.7), la vraisemblance pour qu'un comportement se produise, en l'occurrence, décaler le chargement de la batterie au travail, dépend de la *capacité* à effectuer ce comportement, de l'*opportunité* d'effectuer ce comportement et de la *motivation* pour effectuer ce comportement. La *motivation* est une enquête sur le pourquoi du comportement [130]. Elle est divisée entre la *motivation intrinsèque* et la *motivation extrinsèque*. La *motivation intrinsèque* se réfère à la motivation qui est contrôlée par des facteurs internes à l'individu (p. ex., l'alignement du comportement avec les valeurs ou les attitudes de l'individu) et la *motivation extrinsèque* se réfère à la motivation qui est contrôlée par des facteurs externes à l'individu (p. ex., punition, récompense, pression sociale, autorité).

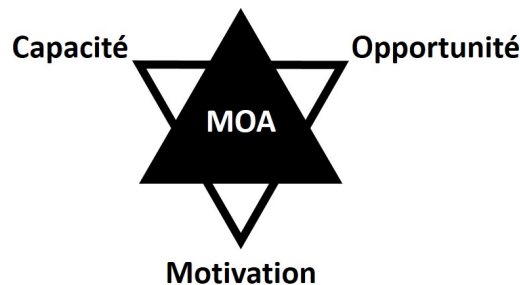


FIGURE 3.7 – Le modèle *Motivation-Opportunity-Abilities (MOA)*[123] décrivant trois critères de vraisemblance d'un comportement.

En relation avec chaque critère de ce modèle, nous posons des questions de recherche auxquelles nous allons répondre par des expérimentations avec des utilisateurs.

Capacité. Pour qu'un employé ait la *capacité* de mettre les consignes en pratique, il est nécessaire de connaître l'heure de début, l'heure de pic et l'heure de fin de la variation EnR actuelle. Dans une expérimentation sur la physicalisation des données rapportée à la section 4.1 (page 32), nous émettons des hypothèses pour répondre à la question :

***Q1** Est-ce qu'afficher l'histogramme vertical avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution permet aux utilisateurs d'identifier l'heure de début, l'heure de pic et l'heure de fin d'une variation EnR ?*

Opportunité. Pour qu'un employé ait l'*opportunité* de mettre les consignes en pratique, il doit être prévenu de l'arrivée d'une variation EnR. Le lieu de travail est un espace social destiné aux activités professionnelles. Il est important que la mise à jour de l'histogramme notifie les employés de l'arrivée d'une variation EnR sans pour autant interrompre leur activité professionnelle. Dans une expérimentation sur l'interaction périphérique rapportée à la section 4.2 (page 42), nous émettons des hypothèses pour répondre à la question :

Q2 *Comment mettre à jour l'histogramme vertical avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution pour notifier sans déranger les utilisateurs de l'arrivée d'une variation EnR ?*

Motivation. Pour qu'un employé ait la *motivation* pour mettre les consignes en pratique, la pratique de décalage du chargement de batterie doit être alignée avec ses valeurs (lié à la *motivation intrinsèque*) et son expérience avec l'artefact affichant l'histogramme doit être satisfaisante (lié à la *motivation extrinsèque*). Dans une expérimentation sur les afficheurs cylindriques à symétrie dynamique de révolution rapportée à la section 4.3 (page 56), nous émettons des hypothèses pour répondre à la question :

Q3 *Est-ce qu'afficher l'histogramme vertical avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution véhicule une meilleure expérience aux utilisateurs sur la durée qu'avec un afficheur planaire ?*

Chapitre 4

Expérimentations

Dans ce chapitre, nous rapportons trois expérimentations avec des utilisateurs qui répondent aux questions de recherche posées. Dans une première expérimentation avec 90 participants pendant un événement public, nous étudions l'utilisabilité de la symétrie de révolution pour informer par physicalisation des données. Nous utilisons un CairnFORM à 10 anneaux pour afficher un histogramme à anneaux physiques visualisant trois variations de données avec différentes amplitudes et durées : nous observons qu'un histogramme à anneaux physiques est plus efficace pour une tâche d'intervalle et une tâche de comparaison plutôt que pour une tâche d'ordonnancement. Dans une deuxième expérimentation avec 30 participants en condition de laboratoire, nous étudions l'utilisabilité du changement de symétrie de révolution pour notifier sans déranger par interaction périphérique. Nous utilisons un CairnFORM à 1 anneau avec trois vitesses différentes de mouvement dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention alors que l'utilisateur effectue une tâche de mémorisation à court terme dans le champ de vision centrale au centre de l'attention : nous observons que le changement de diamètre d'un anneau avec vitesse exponentielle est perçu plus souvent et plus calmement plutôt qu'avec une vitesse constante ou logarithmique. Dans une troisième expérimentation avec 6 participants sur un lieu de travail pendant 2 mois, nous étudions l'expérience utilisateur sur la durée pour un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution en contexte d'usage. Nous déployons CairnFORM et un écran plat en contexte d'usage afin de comparer l'expérience des utilisateurs sur la durée : nous observons que CairnFORM est aussi pragmatique mais plus hédonique qu'un écran plat. Cette différence de qualité hédonique sur la durée peut s'expliquer par l'aspect fascinant de la symétrie dynamique de révolution.

4.1 Utilisabilité de la symétrie de révolution pour informer par physicalisation des données

Dans cette première expérimentation, nous étudions l'utilisabilité de la symétrie de révolution pour informer par physicalisation des données. Pour qu'un employé ait la *capacité* de mettre les consignes en pratique, il est nécessaire de connaître l'heure de début, l'heure de pic et l'heure de fin de la variation EnR actuelle :

***Q1** Est-ce qu'afficher l'histogramme vertical avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution permet aux utilisateurs d'identifier l'heure de début, l'heure de pic et l'heure de fin d'une variation EnR ?*

4.1.1 Hypothèses

Au quotidien, CairnFORM affiche un histogramme vertical à anneaux physiques visualisant une-à-une des variations EnR 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 EnR (c.-à-d. une *tâche d'intervalle*) et l'heure de pic de la variation EnR (c.-à-d. une *tâche de comparaison*).

En 2015, Jansen et al. [96] ont comparé l'efficacité des diagrammes à barres graphiques et celle des diagrammes à barres physiques pour des tâches de recherche d'information. Ils montrent que les diagrammes à barres physiques rendent les utilisateurs plus efficaces (c.-à-d. plus rapides) que leurs homologues graphiques pour trois tâches issues de taxonomies sur les tâches bas-niveaux de recherche d'information [3, 187] soit une *tâche d'intervalle* (c.-à-d. indiquer l'intervalle de valeurs pour un pays donné), une *tâche d'ordonnancement* (c.-à-d. trier par ordre croissant les valeurs pour un pays donné) et une *tâche de comparaison* (c.-à-d. localiser trois paires pays/année et déterminer laquelle a la plus faible valeur). Nous émettons les hypothèses suivantes :

***H1** Peu importe l'amplitude et la durée de la variation, un histogramme vertical avec symétrie de révolution est efficace pour des tâches d'intervalle sur une variation.*

***H2** Peu importe l'amplitude et la durée de la variation, un histogramme vertical avec symétrie de révolution est efficace pour des tâches de comparaison sur une variation.*

***H3** Peu importe l'amplitude et la durée de la variation, un histogramme vertical avec symétrie de révolution est efficace pour des tâches d'ordonnancement sur une variation.*

Pour valider ou invalider ces hypothèses, nous avons déployé CairnFORM affichant un histogramme vertical à anneaux physiques pendant un événement public. Pendant l'événement, nous avons visualisé trois variations avec des amplitudes et des durées différentes. Pour chaque variation, nous avons évalué l'efficacité des histogrammes

verticaux à anneaux physiques pour les trois tâches de Jansen et al. [96] adaptées à notre cas d'usage. De plus, nous avons reçu des retours sur l'expérience utilisateur véhiculée par un histogramme vertical à anneaux physiques affiché avec CairnFORM.

4.1.2 Apparatus

Les 1 et 2 décembre 2017, CairnFORM a été déployé à l'entrée d'un événement public, les 24h de l'innovation® [116] à Biarritz (France). L'apparatus est illustré par la figure 4.1. CairnFORM était posé sur une table à 1 mètre du bord. En face de CairnFORM et posé sur la même table, se trouvait une feuille A3 expliquant l'utilité de CairnFORM (c.-à-d. représenter les données de manière identique à 360° sur les espaces collectifs et publics, p. ex., des données prévisionnelles sur la production locale 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 portable contrôlant CairnFORM par connexion SSH en WiFi. Les visiteurs étaient interpellés par un instructeur afin de leur présenter CairnFORM et leur proposer de participer à l'expérimentation.

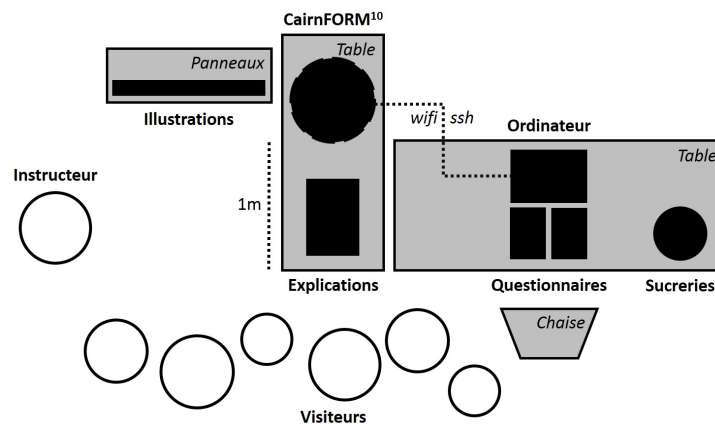


FIGURE 4.1 – La vue de dessus de l'environnement de la première expérimentation.

4.1.3 Participants

Un total de 90 participants (figure 4.2) ont été recrutés parmi les visiteurs. Les 90 participants ont tous effectué les trois tâches et étaient répartis en trois groupes :

- G_1 . 8 femmes, 22 hommes, Md 20-29 ans, Md Bac+3 (figure 4.2a).
- G_2 . 7 femmes, 23 hommes, Md 20-29 ans, Md Bac+2 (figure 4.2b).
- G_3 . 8 femmes, 22 hommes, Md 20-29 ans, Md Bac+2 (figure 4.2c).

4.1. Utilisabilité de la symétrie de révolution pour informer par physicalisation des données

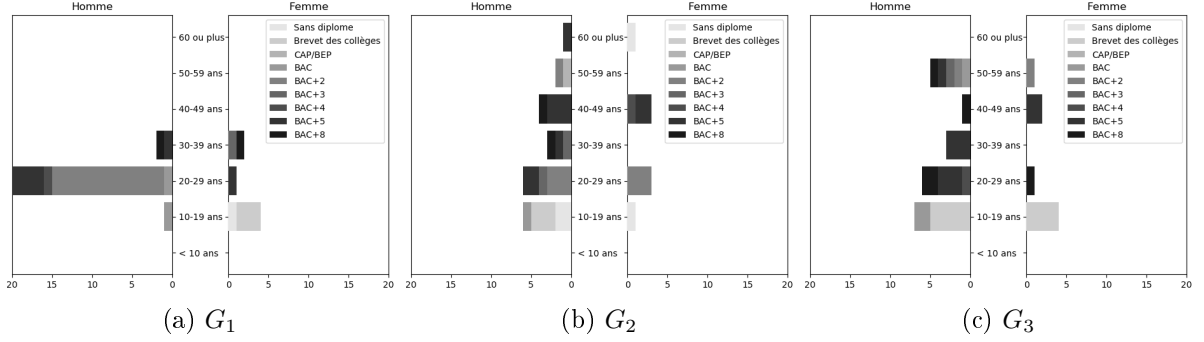


FIGURE 4.2 – La pyramide de population des trois groupes de participants de la première expérimentation.

4.1.4 Modalités

Pendant l'événement, nous avons visualisé plusieurs variations de données ordinales avec une amplitude et une durée différente. Nous avons choisi des données synthétiques de manière 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. une échelle de valeurs de 30 points) permet aux utilisateurs d'accomplir des tâches bas-niveaux de recherche d'information à 1 m de distance de l'interface. Dans l'ordre suivant, nous avons visualisé trois variations (figure 4.3) avec une amplitude et une durée différente, chacune assignée à un groupe :

- V_{3h} . (G_1) Variation d'une durée de 3h de 10h00 à 12h59 avec un pic à 11h00 (figure 4.3a).
- V_{6h} . (G_2) Variation d'une durée de 6h de 8h00 à 13h59 avec un pic à 11h00 (figure 4.3b).
- V_{9h} . (G_3) Variation d'une durée de 9h de 9h00 à 17h59 avec un pic à 13h00 (figure 4.3c).

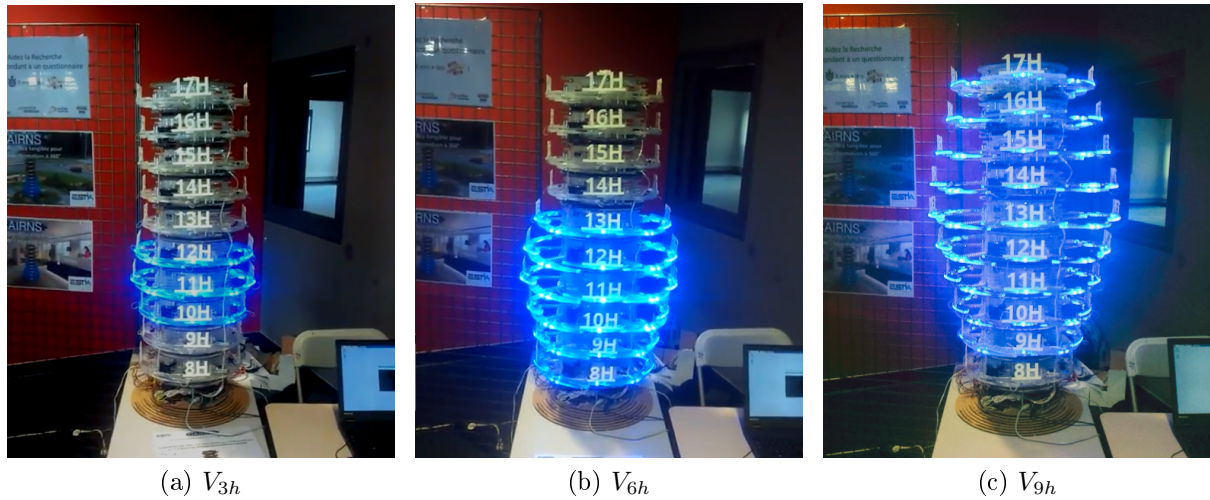


FIGURE 4.3 – Le CairnFORM à 10 anneaux affichant un histogramme à anneaux physiques visualisant trois variations avec une durée et une amplitude différente pendant un évènement public (24h de l'innovation® [116], Biarritz, France).

4.1.5 Tâches

Pour chaque variation, 30 participants ont effectué les trois tâches de Jansen et al. [96] adaptées à notre cas d'usage :

- T_{range} . Donner l'heure de début et de fin de la variation EnR (p. ex., de 9h00 à 17h59 pour la figure 4.3c).
- $T_{compare}$. Indiquer l'heure de pic de la variation EnR (p. ex., à 11h00 pour la figure 4.3b).
- T_{order} . Trier les heures de la variation EnR pour ordre croissant de la production d'énergie renouvelable (p. ex., 10h00, 12h00 et 11h00 pour la figure 4.3a).

4.1.6 Procédure

Les visiteurs s'arrêtant devant CairnFORM ou interpellés par l'instructeur ont reçu des explications orales sur l'utilité de CairnFORM en s'appuyant sur les supports présents. Par la suite, les visiteurs 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). Les participants pouvaient écrire leurs commentaires sur le questionnaire. Nous avons pris note d'observations et des commentaires oraux des participants. Tout les 30 participants, l'histogramme était mis à jour pour visualiser une variation EnR avec une amplitude et une durée différente.

4.1.7 Mesures et questionnaires

Pour estimer l'expérience des utilisateurs avec un histogramme vertical à anneaux physiques affiché avec CairnFORM, nous avons utilisé les réponses des participants au questionnaire UEQ-S [158]. Pour estimer l'efficacité d'un histogramme vertical à anneaux physiques affiché avec CairnFORM pour les trois tâches bas-niveaux de recherche d'information, nous avons mesuré le taux de réussite des participants. Nous avons également regroupé les observations et les commentaires des participants.

4.1.8 Outils

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. Pour les statistiques descriptives des données, nous avons principalement effectué le calcul de deux critères de position (la moyenne et la médiane) et de quatre critères de dispersion (l'écart-type, les quartiles, le minimum et le maximum). Le tableau 4.1 présente les tests statistiques utilisés pour les données qualitatives nominales (c.-à-d. le taux de réussite des trois tâches) et qualitatives ordinales (c.-à-d. les scores UEQ-S [158]).

Nombre de Groupes	Données	
	Qualitative Nominale	Qualitative Ordinale
2	Fischer	Cochran-Armitage
3+	χ^2	Kruskal-Wallis

TABLEAU 4.1 – Les tests statistiques conseillés¹ en fonction du type de données et du nombre de groupes indépendants.

4.1.9 Résultats

Afin de faciliter la lecture des résultats, les valeurs- p des tests statistiques sont présentées dans des tableaux et représentées sur des figures : un astérisque (*) représente une valeur- p inférieure à 0,05 pour un test statistique avec trois groupes de données ou plus (p. ex., $V_{3h}/V_{6h}/V_{9h}$). Un double astérisque (**) représente une valeur- p inférieure à 0,05 pour un test statistique avec deux groupes de données (p. ex., V_{3h}/V_{6h}). Les paragraphes suivants présentent les résultats obtenus.

Qualité hédonique et qualité pragmatique de l'artefact. Sur l'échelle de -3 pts à 3 pts de UEQ-S [158], on observe que les participants ont donné un score médian de

1. <https://biostatgv.sentiweb.fr/?module=tests>, visité le 14 octobre 2026.

2,25 pts à la qualité hédonique ($Q_{hedonic}$, figure 4.4a) et un score médian de 1,75 pts à la qualité pragmatique ($Q_{pragmatic}$, figure 4.4b) d'un histogramme vertical à anneaux physiques pour les trois tâches, toutes variations confondues. L'amplitude et la durée de la variation visualisée par l'histogramme n'a pas eu d'effet significatif sur le score donné par les participants (figure 4.4).

Le résumé des résultats et les valeurs- p des tests statistiques sur le score donné par les participants aux deux qualités de UEQ-S [158] sont présentés dans le tableau 4.2. La section 4.1.10 (page 39) discute de notre interprétation de ces résultats.

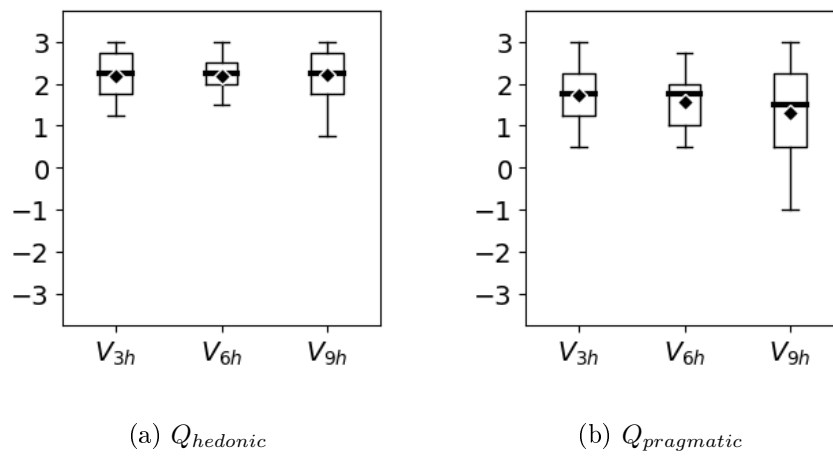


FIGURE 4.4 – Le score donné par les participants pour les deux qualités du questionnaire UEQ-S [158].

Réponses au UEQ-S		
Modalité	$Q_{hedonic}$	$Q_{pragmatic}$
$V_{3h+6h+9h}$	2.25 pts	1.75 pts
V_{3h}	2.25 pts	1.75 pts
V_{6h}	2.25 pts	1.75 pts
V_{9h}	2.25 pts	1.5 pts
valeurs- p		
$V_{3h/6h/9h}$	.17	.26
$V_{3h/6h}$	.84	.67
$V_{3h/9h}$	.81	.23
$V_{6h/9h}$	.94	.39

TABLEAU 4.2 – Le résumé des résultats et des valeurs- p des tests statistiques sur le score donné par les participants aux deux qualités du questionnaire UEQ-S [158].

4.1. Utilisabilité de la symétrie de révolution pour informer par physicalisation des données

Réussite des tâches avec l'artefact. Les participants ont accompli T_{range} (figure 4.5a) et $T_{compare}$ (figure 4.5b) avec plus de 90% de réussite sur un histogramme à anneaux physiques, toutes variations confondues. L'amplitude et la durée de la variation visualisée par l'histogramme n'a pas eu d'effet significatif sur la performance des participants pour ces deux tâches. Cependant, la performance des participants pour T_{order} (figure 4.5c) est significativement différente entre les variations visualisées par l'histogramme : le taux de réussite pour V_{9h} est significativement plus faible que pour V_{6h} ou que pour V_{3h} .

Le résumé des résultats et les valeurs- p des tests statistiques sur la réussite des tâches par les participants sont présentés dans le tableau 4.3. La section 4.1.10 (page 39) discute de notre interprétation de ces résultats.

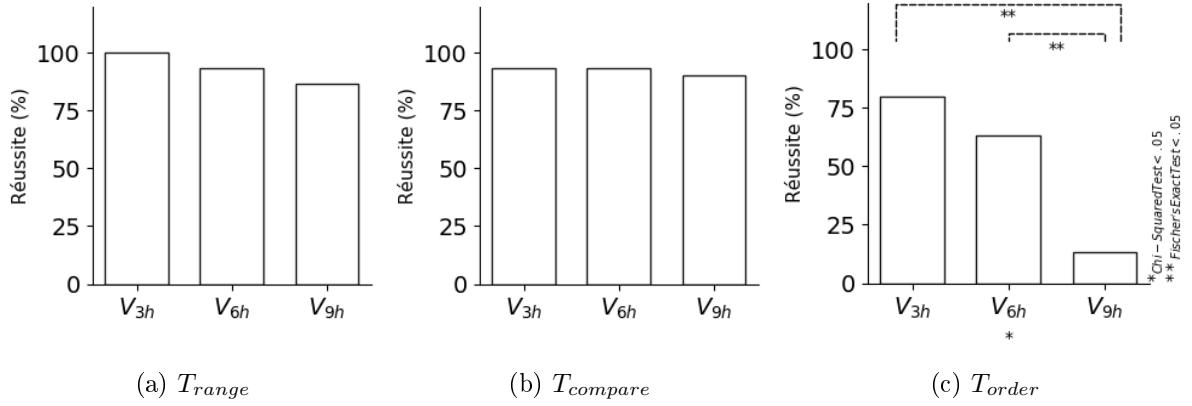


FIGURE 4.5 – Le taux de réussite des participants pour les trois tâches bas-niveaux de recherche d'information.

Taux de réussite des tâches			
Modalité	T_{range}	$T_{compare}$	T_{order}
$V_{3h+6h+9h}$	93.3%	92.2%	52.2%
V_{3h}	100%	93.3%	80.0%
V_{6h}	93.3%	93.3%	63.3%
V_{9h}	86.6%	90.0%	13.3%
valeurs- p			
$V_{3h/6h/9h}$	.12	.85	.001
$V_{3h/6h}$	.49	1	.25
$V_{3h/9h}$	.11	.64	.001
$V_{6h/9h}$	.67	.64	.001

TABLEAU 4.3 – Le résumé des résultats et des valeurs- p des tests statistiques sur la réussite des tâches par les participants.

Retours d'information des participants. Les commentaires écrits et oraux des participants montrent que CairnFORM affichant un histogramme vertical à anneaux physiques est hédonique (p. ex., **P7** : «*Plaisant.*», **P23** : «*Esthétique et avant-gardiste.*», **P58** : «*Exquis.*») et pragmatique (p. ex., **P10** : «*Étant lisible à 360°, il est utile notamment pour les personnes à mobilité réduite.*»). Nous avons principalement identifié quatre commentaires :

- **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 (5,5%) ont déclaré qu'il était difficile de percevoir 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 11h00 et 12h00 [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 sablier pour l'événement public (**P59** : «*Je pensais que c'était un décompte jusqu'à la fin de l'événement.*»).
- **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. La couleur verte est plus associée aux énergies renouvelables que la couleur bleue.*»).

4.1.10 Discussion

Dans les paragraphes suivants, nous interprétons les résultats obtenus pour valider ou invalider les hypothèses émises (**H1**, **H2** et **H3**) et répondre à la question de recherche **Q1**.

Qualité hédonique et qualité pragmatique de l'artefact. D'après le questionnaire UEQ-S [158], les scores médians donnés par les participants signifient qu'un histogramme vertical à anneaux physiques affiché avec CairnFORM visualisant des variations de données ordinales avec différentes amplitudes et durées véhicule une *excellente* qualité hédonique et une *bonne* qualité pragmatique pour les trois tâches bas-niveaux de recherche d'information.

Réussite des tâches avec l'artefact. Les résultats suggèrent qu'un histogramme vertical à anneaux physiques visualisant des variations de données ordinales avec différentes amplitudes et durées est efficace pour une tâche d'intervalle et une tâche de comparaison (**H1** et **H2** validées). Cependant, ce n'est pas le cas pour une tâche d'ordonnancement (**H3** non validée) : plus la variation est ample et longue, moins l'histogramme est efficace pour la tâche d'ordonnancement. Les diagrammes à courbes et les diagrammes à barres (p. ex., un histogramme) sont deux techniques de visualisation de données connues pour leur efficacité lorsqu'il s'agit de mettre en évidence une discontinuité dans une série temporelle de données (c.-à-d. efficacité pour les tâches de comparaison) [176]. Un histogramme à anneaux physiques est exactement la symétrie de révolution d'un histogramme à barres physiques. Jansen et al. [96] observent qu'avec un histogramme à barres physiques, les participants complètent plus rapidement la tâche d'intervalle puis la tâche de comparaison et enfin la tâche d'ordonnancement. Nous observons la même relation d'ordre pour le taux de réussite des tâches avec un histogramme à anneaux physiques : les participants complètent avec plus de succès la tâche d'intervalle puis la tâche de comparaison et enfin la tâche d'ordonnancement. Cette similitude dans la relation d'ordre nous amène à penser que l'efficacité des histogrammes à anneaux physiques pour des tâches de recherche d'information est similaire à celle des histogrammes à barres physiques, au moins pour les tâches d'intervalle, de comparaison et d'ordonnancement.

Retour d'information des utilisateurs. Pour répondre à **C2**, nous avons diminué la granularité de diamètre des anneaux de l'histogramme de 1 cm à 2 cm (c.-à-d. d'une échelle de valeurs de 30 points à 15 points pour les données). En considérant **C3** et **C4**, nous avons changé la couleur des anneaux de l'histogramme 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 visualisées (figure 4.6). Enfin par rapport à **C1**, nous avons choisi de conserver le changement de couleur (p. ex., un dégradé de vert à blanc) pour représenter une autre donnée (p. ex., la plus grande profondeur de charge réalisée par les employés pendant les heures passées de la variation) et de fixer une luminosité constante pour tout les anneaux.

Réponse à la question de recherche. **H3** n'est pas validée mais **H1** et **H2** le sont. Par conséquent, nous répondons oui à **Q1**. Nous affirmons qu'afficher l'histogramme vertical avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution permet aux utilisateurs d'identifier l'heure de début, l'heure de pic et l'heure de fin d'une variation EnR.

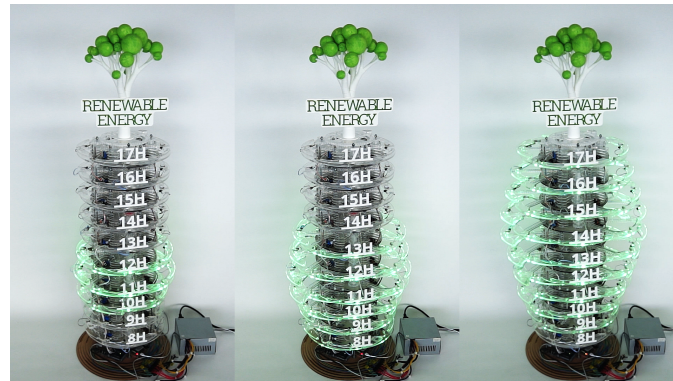


FIGURE 4.6 – L'apparence finale de CairnFORM affichant un histogramme vertical à anneaux physiques visualisant une variation EnR pendant la journée de travail.

4.2 Utilisabilité du changement de symétrie de révolution pour notifier sans déranger par interaction périphérique

Dans cette deuxième expérimentation, nous étudions l'utilisabilité du changement de symétrie de révolution pour notifier sans déranger par interaction périphérique. Pour qu'un employé ait l'*opportunité* de mettre les consignes en pratique, il doit être prévenu de l'arrivée d'une variation EnR. Le lieu de travail est un espace social destiné aux activités professionnelles. Il est important que la mise à jour de l'histogramme notifie les employés de l'arrivée d'une variation EnR sans pour autant interrompre leur activité professionnelle :

Q2 Comment mettre à jour l'histogramme vertical avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution pour notifier sans déranger les utilisateurs de l'arrivée d'une variation EnR ?

4.2.1 Hypothèses

Alors que l'utilisateur effectue une tâche au centre de l'attention dans le champ de vision centrale (p. ex., un employé écrit un mail sur son ordinateur portable), CairnFORM peut déclencher un changement de forme (c.-à-d. un changement de diamètre des anneaux) ou un changement de lumière (c.-à-d. un changement de couleur ou de luminosité des anneaux) dans le champ de vision périphérique afin de mobiliser l'attention périphérique de l'utilisateur. D'après Gutwin et al. [75], le changement de forme (p. ex., un changement de position ou de taille) est mieux perçu dans l'ensemble du champ de vision humain que le changement de lumière (p. ex., un changement de couleur ou de luminosité) notamment dans le champ de vision périphérique. Nous nous concentrons donc sur l'usage du changement de diamètre des anneaux. D'après Tynan et Sekuler [184], la vitesse affecte la perception du mouvement dans le champ de vision périphérique, c'est-à-dire une vitesse lente (p. ex., 4°/sec) engendre un temps de perception du mouvement plus élevé qu'une vitesse rapide (p. ex., 16°/sec) [184]. D'après Graham [69] et Kinchla [109], un mouvement est détecté lorsque la cible s'est déplacée d'une distance critique dans le champ de vision humain. Par conséquent, un mouvement avec une vitesse rapide atteindra plus rapidement cette distance critique et sera donc plus rapidement perçu. En relation avec la vitesse, nous faisons l'hypothèse que l'accélération joue un rôle dans la subtilité du mouvement en périphérie de l'attention. Nous émettons les hypothèses suivantes concernant la détection et l'esthétique du mouvement dans le champ de vision périphérique :

H1 Peu importe l'accélération, l'utilisateur va détecter le changement de diamètre de l'anneau après une certaine distance parcourue dans le champ de vision périphérique.

H2 L'utilisateur va considérer le changement de diamètre de l'anneau perçu

dans le champ de vision périphérique comme plus ou moins calme en fonction de l'accélération du mouvement.

Aussi, nous émettons les hypothèses suivantes concernant la conscientisation, la distraction et l'esthétique du mouvement en périphérie de l'attention :

H3 *peu importe l'accélération, l'utilisateur peut effectuer une tâche dans le champ de vision centrale au centre de l'attention et être conscient d'un changement de diamètre des anneaux après une certaine distance parcourue dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention.*

H4 *Alors qu'il effectue une tâche dans le champ de vision centrale au centre de l'attention, l'utilisateur va considérer le changement de diamètre de l'anneau perçu dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention comme plus ou moins dérangeant en fonction de l'accélération du mouvement.*

H5 *Alors qu'il effectue une tâche dans le champ de vision centrale au centre de l'attention, l'utilisateur va considérer le changement de diamètre de l'anneau perçu dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention comme plus ou moins calme en fonction de l'accélération du mouvement.*

Pour valider ou invalider ces hypothèses, nous avons réalisé une étude en condition de laboratoire dans laquelle nous avons évalué l'interaction périphérique des utilisateurs avec l'ouverture et la fermeture d'un anneau pour une vitesse constante (c.-à-d. une accélération nulle), une vitesse exponentielle (c.-à-d. une accélération exponentielle) et une vitesse logarithmique (c.-à-d. une accélération logarithmique).

4.2.2 Apparatus

L'apparatus est illustré par la figure 4.7. Le 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° vers la gauche lorsque l'on regarde le centre de l'écran). La vision périphérique moyenne est la région qui couvre de 30° à 60° de chaque côté du champ de vision humain [75]. À 2,6 m du participant, le diamètre de l'anneau couvre $\sim 7^\circ$ du champ de vision lorsque l'anneau est complètement rétracté (la région de $41,5^\circ$ à $48,5^\circ$) et $\sim 14^\circ$ lorsqu'il est complètement étendu (la région de 38° à 52°) : l'anneau ne quitte jamais la vision périphérique moyenne. Pour déclencher le mouvement de l'anneau à distance, un serveur MQTT Mosquitto [118] est installé sur le Raspberry Pi 3 de l'anneau qui est également configuré pour être Hotspot. L'ordinateur utilisé pour l'expérimentation est connecté en wifi au Raspberry Pi 3. En utilisant un client MQTT [118], l'ordinateur envoie un message au Raspberry Pi 3 qui déclenche le mouvement de l'anneau correspondant au message reçu.

4.2. Utilisabilité du changement de symétrie de révolution pour notifier sans déranger par interaction périphérique

Pour l'expérimentation, les participants devaient percevoir le mouvement de l'anneau seulement avec la vue. Afin de réduire le bruit du mouvement de l'anneau de 60 dB à 50 dB, nous avons utilisé une mousse que nous avons posé en dessous de l'anneau pour absorber les vibrations. Pour masquer le bruit restant, les participants portaient un casque anti-bruit (-30 dB SNR) et des enceintes, disposées autour du participant, jouaient du bruit blanc. Le bruit blanc était éteint lorsque des instructions étaient données ou que l'utilisateur complétait un questionnaire.

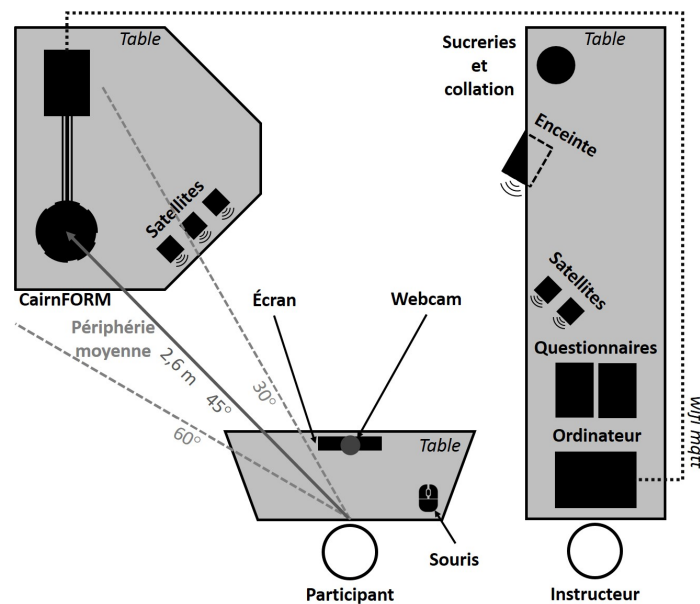


FIGURE 4.7 – La vue de dessus de l'environnement de la deuxième expérimentation.

4.2.3 Participants

Les 30 participants (13 femmes, 17 hommes, *Md* 30-34 ans, *Md* BAC+5) ont été recrutés dans le laboratoire, dans le département administratif et sur le campus de l'école (figure 4.8). L'expérimentation a été conduite pendant une semaine.

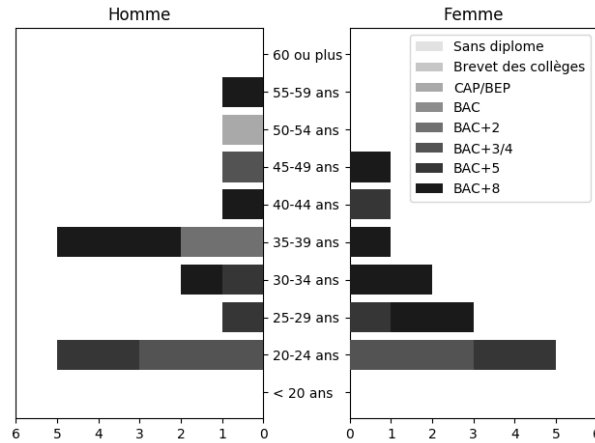


FIGURE 4.8 – La pyramide des participants de la deuxième expérimentation.

4.2.4 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.
- $M_{retraction}$. 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 4.9 illustre les trois vitesses pour les deux types de mouvement au cours du temps.

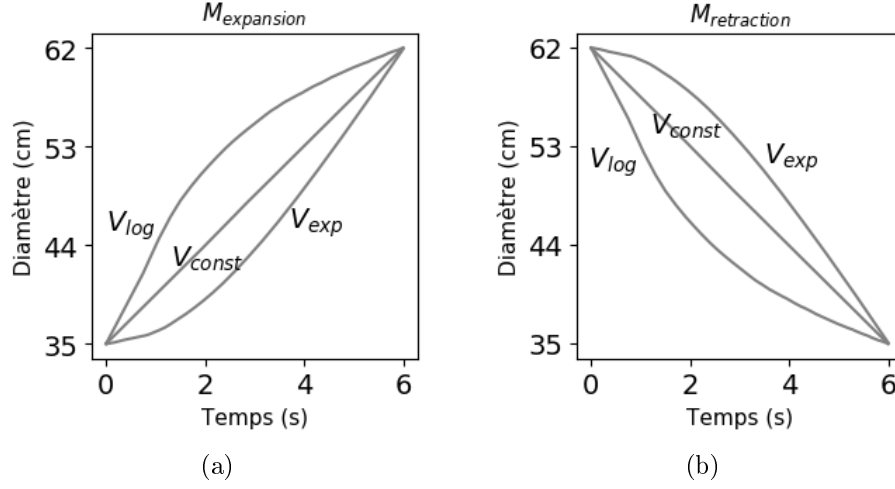


FIGURE 4.9 – L’expansion (a) et la rétraction (b) d’un anneau en six secondes avec une vitesse constante, exponentielle et logarithmique.

4.2.5 Tâches

Pour cette expérimentation, nous avons conçu deux tâches :

- T_{vision} : Une première tâche pour évaluer la perception du mouvement de l’anneau dans le champ de vision périphérique au centre de l’attention 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 s (voir la capture d’écran de la figure 4.10a). L’utilisateur doit fixer son regard sur le compte à rebours et cliquer sur le bouton lorsqu’il détecte un mouvement de l’anneau dans le champ de vision périphérique. Un mouvement est déclenché aléatoirement entre 5 s et 15 s après le début de la tâche. La tâche se termine après 25 s ou plus tôt si le bouton est cliqué.
- $T_{\text{attention}}$: Une seconde tâche pour évaluer la perception du mouvement de l’anneau dans le champ de vision périphérique en périphérie de l’attention de l’utilisateur. Pour distraire l’utilisateur et éloigner son attention centrale de l’anneau [81], nous avons utilisé une tâche principale faisant 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 une demi-minute). Une séquence de N symboles (croix et ronds) est affichée verticalement à l’écran pendant $2N$ s (voir la capture d’écran de la figure 4.10b). Une fois que la séquence a disparu, l’utilisateur doit reproduire la séquence, symbole par symbole. Toutes les 2 s, l’utilisateur doit restituer le prochain symbole de la séquence en cliquant sur la croix ou le rond affichés à droite de l’écran 4.10c. La tâche se termine après $2N$ s.

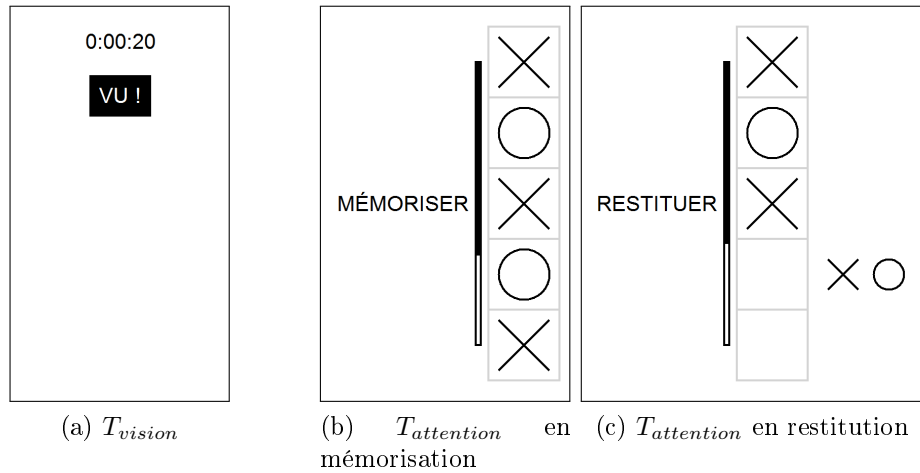


FIGURE 4.10 – Les deux tâches utilisées pendant la deuxième expérimentation.

4.2.6 Procédure

Dans un premier temps, nous avons expliqué le contexte de l'étude au participant. Puis, nous lui avons demandé de compléter et signer un formulaire de consentement éclairé. Pendant 45 min, le participant a successivement traversé deux phases :

1. *Phase 1.* T_{vision} 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 fois $M_{expansion}$ et trois fois $M_{retraction}$) et complète un questionnaire.
2. *Phase 2.* $T_{attention}$ 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 est immobile). À chaque fois, la taille de la séquence suivante augmente de un. Enfin, pour chaque vitesse, le participant effectue la tâche sept fois (trois fois $M_{expansion}$, trois fois $M_{retraction}$ et une fois sans mouvement) et complète un questionnaire.

Effectuer tout ces exercices d'affilée est fatigant. Avant de commencer la *phase 2*, le participant fût invité à boire du jus d'orange et manger des bonbons. Pour la *phase 1* et *phase 2*, nous avons invité le participant à se concentrer sur l'écran et à ne pas regarder l'anneau directement. Nous avons utilisé un carré latin pour contrebalancer l'ordre des vitesses. Pour chaque participant, le même ordre fut répété dans les trois phases.

4.2.7 Mesures et questionnaires

Pour T_{vision} , nous avons mesuré :

- *Temps de réaction.* Le temps écoulé entre le moment où le mouvement de l'anneau est déclenché et le moment où l'utilisateur clique sur le bouton à l'écran avec la souris.

4.2. Utilisabilité du changement de symétrie de révolution pour notifier sans déranger par interaction périphérique

- *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.
- *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.
- *Mouvements regardés.* Le nombre de fois où l'utilisateur a regardé l'anneau alors qu'il y avait un mouvement de l'anneau.

Pour $T_{attention}$, nous avons mesuré :

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

À la fin de $T_{attention}$, les participants devaient répondre à deux questions affichées à l'écran avec la souris :

1. *Avez-vous perçu un mouvement de l'anneau ? Oui/Non.*
2. *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 oraux des participants.

4.2.8 Outils

Le logiciel Face Reader 4 fût utilisé sur les enregistrements vidéo afin de détecter les regards des participants : si l'utilisateur regarde en direction de l'anneau alors qu'il est en mouvement, le mouvement est étiqueté «Regardé». 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». Puis, nous avons soustrait 200 ms à tout 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 [177] et 50 ms de réaction musculaire pour des personnes en bonne santé [151]. 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.

Pour les statistiques descriptives des données, nous avons principalement effectué le calcul de deux critères de position (la moyenne et la médiane) et de quatre critères de dispersion (l'écart-type, les quartiles, le minimum et le maximum). Le tableau 4.4 présente les tests statistiques utilisés pour les données quantitatives (p. ex., le temps de perception), qualitatives nominales (p. ex., la quantité de mouvements manqués) et qualitatives ordinales (p. ex., les réponses aux questionnaires sur une échelle de Likert).

Nombre de Groupes	Type de Données		
	Quantitative	Qualitative Nominale	Qualitative Ordinale
2	Student	Fischer	Cochran-Armitage
3+	ANOVA	χ^2	Kruskal-Wallis

TABLEAU 4.4 – Les tests statistiques conseillés ² en fonction du type de données et du nombre de groupes indépendants.

4.2.9 Résultats

Afin de faciliter la lecture des résultats, les valeurs- p des tests statistiques sont présentées dans des tableaux et représentées sur des figures : un astérisque (*) représente une valeur- p inférieure à 0,05 pour un test statistique avec trois groupes ou plus et un double astérisque (**) représente une valeur- p inférieure à 0,05 pour un test statistique avec deux groupes. Le type de mouvement de l'anneau ($M_{expansion}$ et $M_{retraction}$) a eu aucun effet significatif sur les résultats de l'expérimentation. Pour cette raison, les paragraphes suivants décrivent les résultats de l'expérimentation seulement en fonction de la vitesse du mouvement de l'anneau (c.-à-d. V_{const} , V_{exp} et V_{log}). Pour T_{vision} , les données étaient disponibles sur 180 mouvements de V_{const} , 180 de V_{log} et 180 de V_{exp} . Les participants ont manqué 11 mouvements de V_{const} (5,6%), 8 de V_{log} (10%) et 8 de V_{exp} (5,6%). Ils ont halluciné 10 mouvements de V_{const} (5,6%), 18 de V_{log} (10%) et 10 de V_{exp} (5,6%). Enfin, ils ont regardé 12 mouvements de V_{const} (6,7%), 8 de V_{log} (4,4%) et 14 de V_{exp} (7,8%). Nous avons éliminé les données associées à ces mouvements afin d'établir les mesures qu'à partir des mouvements réellement détectés dans le champ de vision périphérique. Pour $T_{attention}$, les données étaient disponibles sur 180 mouvements de V_{const} , 180 de V_{log} et 180 de V_{exp} . Les participants ont halluciné 2 mouvements de V_{log} (1,1%), aucun mouvement de V_{const} et de V_{exp} , et ont regardé 13 mouvements de V_{const} (7,2%), 7 de V_{log} (3,8%) et 13 de V_{exp} (7,2%). Nous avons éliminé les données associées à ces mouvements afin d'établir les mesures qu'à partir des mouvements réellement détectés dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention. Les paragraphes suivants présentent les résultats obtenus.

2. <https://biostatgv.sentiweb.fr/?module=tests>, visité le 14 octobre 2026.

4.2. Utilisabilité du changement de symétrie de révolution pour notifier sans déranger par interaction périphérique

Détection et esthétique avec vision périphérique. Alors qu'ils effectuaient T_{vision} , les participants ont considéré que V_{log} (Md 1 *pts*) était le plus facile à détecter dans le champ de vision périphérique, puis V_{exp} (Md - 0,75 *pts*) et enfin V_{const} (Md - 1 *pts*) (figure 4.11a). V_{log} est considéré significativement plus facile à détecter que V_{const} . En effet, les participants ont détecté plus de V_{log} (138/146, 94,5%) et de V_{exp} (140/148, 94,6%) que de V_{const} (136/147, 92,5%) (figure 4.11b). De manière significative, les participants ont tout d'abord détecté V_{log} ($1,18 \pm 0,95$ s), puis V_{const} ($1,99 \pm 1,49$ s) et enfin V_{exp} ($3,38 \pm 1,29$ s) (figure 4.11c). V_{const} ($8,92 \pm 6,40$ cm) a été perçu après un changement de diamètre plus petit que V_{log} ($10,57 \pm 5,54$ cm) ou que V_{exp} ($10,58 \pm 6,47$ cm) (figure 4.11d). V_{log} et V_{exp} sont significativement détectés au un même changement de diamètre. Enfin, les participants ont considéré que V_{const} (Md 1 *pts*) et V_{exp} (Md 1 *pts*) étaient plus calmes que V_{log} (Md 0 *pts*). V_{const} est considéré significativement plus calme que V_{log} (figure 4.11e).

Le résumé des résultats et les valeurs- p des tests statistiques sur la détection et l'esthétique du mouvement de l'anneau dans le champ de vision périphérique sont présentés dans le tableau 4.5. La section 4.2.10 (page 53) discute de notre interprétation de ces résultats.

Détection et esthétique avec vision périphérique					
Modalité	Facilité	Détection	Temps	Distance	Tranquillité
V_{const}	-1 pts	93%	$1,99 \pm 1,49$ s	$8,92 \pm 6,40$ cm	1 pts
V_{exp}	-0,75 pts	95%	$3,38 \pm 1,29$ s	$10,58 \pm 6,47$ cm	1 pts
V_{log}	1 pts	95%	$1,18 \pm 0,95$ s	$10,57 \pm 5,54$ cm	0 pts
valeurs- p					
$V_{const}/exp/log$	.1	.73	.001	.004	.01
V_{const}/exp	.91	.63	.001	.002	.46
V_{const}/log	.001	.63	.001	.47	.02
V_{exp}/log	.002	1	.001	.01	.09

TABLEAU 4.5 – Le résumé des résultats et valeurs- p des tests statistiques sur la détection et l'esthétique du mouvement de l'anneau dans le champ de vision périphérique.

4. Expérimentations

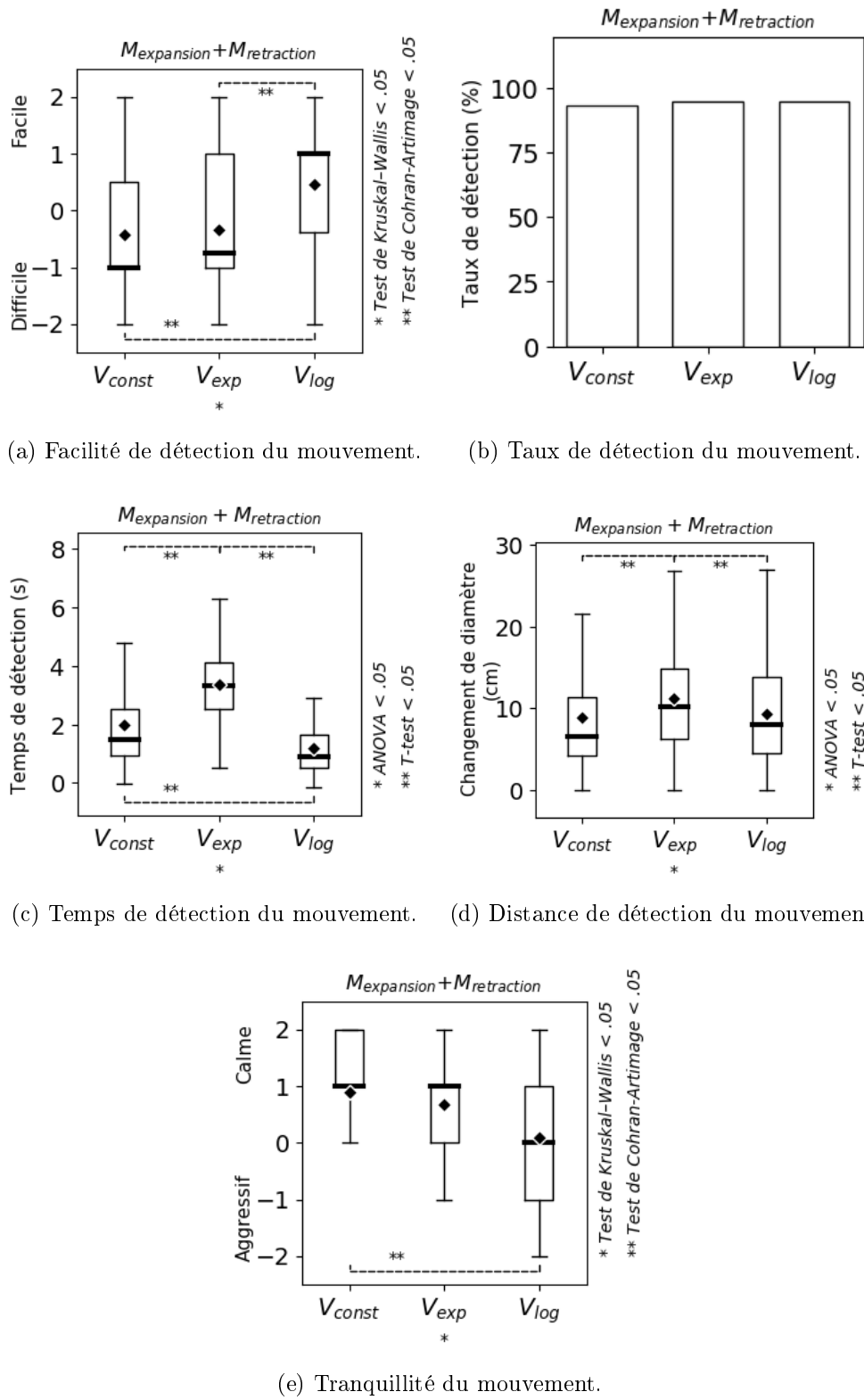


FIGURE 4.11 – Les résultats sur la détection et l'esthétique du mouvement de l'anneau dans le champ de vision périphérique.

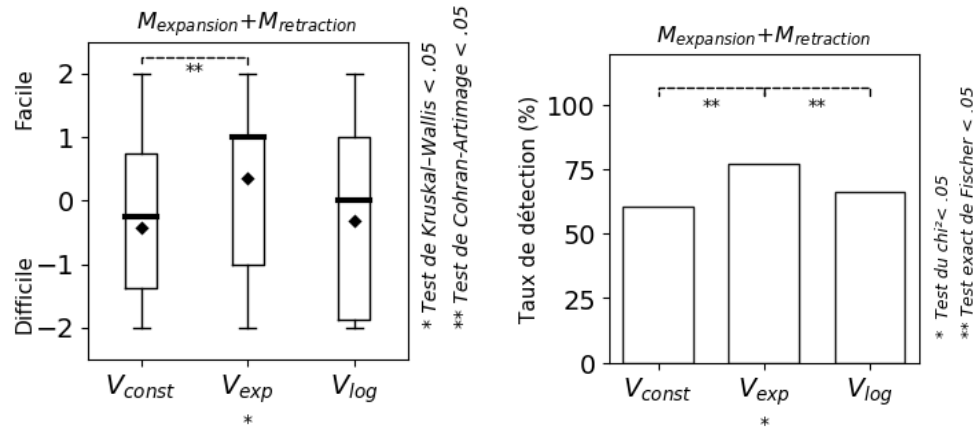
4.2. Utilisabilité du changement de symétrie de révolution pour notifier sans déranger par interaction périphérique

Conscientisation, distraction et esthétique en périphérie de l'attention. Alors qu'ils effectuaient $T_{attention}$, les participants ont considéré qu'il était plus facile d'être conscient de V_{exp} que de V_{const} ou que de V_{log} en périphérie de l'attention (figure 4.12a). Il était significativement plus facile d'être conscient de V_{exp} que de V_{const} en périphérie de l'attention. En effet, les participants étaient plus conscients de V_{exp} (129/167, 77,2%) que de V_{const} (101/167, 60%) ou que de V_{log} (115/173, 66,4%) (figure 4.12b). Les participants étaient significativement plus conscients de V_{exp} que de V_{const} . Les participants ont considéré que V_{const} (Md 1,25 pts) était moins dérangement que V_{exp} (Md 1 pts) et que V_{log} (Md 1 pts) (figure 4.12c). Les participants ont considéré que V_{const} (Md 1 pts) et V_{exp} (Md 1 pts) étaient plus calmes que V_{log} (Md 0,5 pts) (figure 4.12d). Enfin, on observe que les participants ont correctement restitué plus de 99% (2680/2700) des symboles (V_{exp} 8 fois, V_{log} 6 fois, V_{const} 6 fois). 90% des symboles erronés ont été sélectionnés par les 60% (20/30) des participants qui n'ont pas pu restituer correctement une séquence supérieure à 9 symboles. On observe également que les participants ont correctement identifié le type du mouvement qu'ils ont perçu ($M_{expansion}$ ou $M_{retraction}$) avec plus de 90% de réussite (à 94,6% (122/129) avec V_{exp} , à 90,4% (104/115) avec V_{log} et à 90,1% (91/101) avec V_{const}).

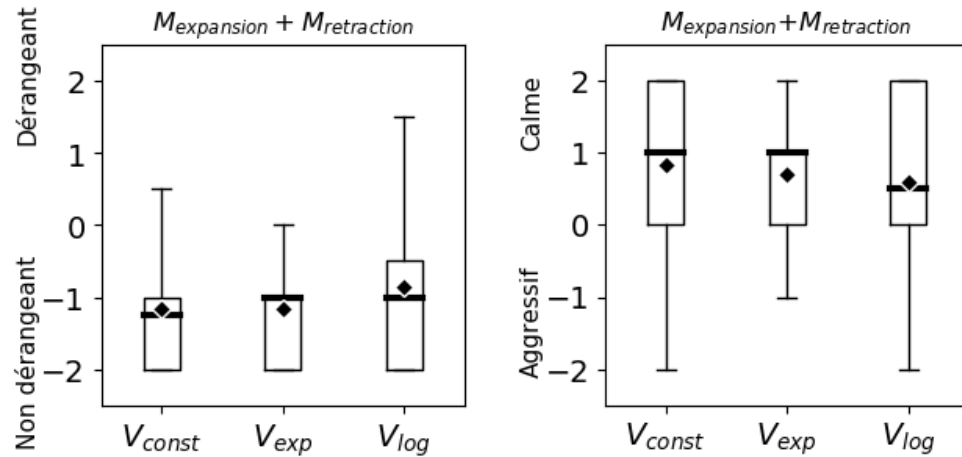
Le résumé des résultats et les valeurs- p des tests statistiques sur la conscientisation, la distraction et l'esthétique du mouvement de l'anneau dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention sont présentés dans le tableau 4.6. La section 4.2.10 (page 53) discute de notre interprétation de ces résultats.

Conscientisation, distraction et esthétique avec attention périphérique				
Modalité	Facilité	Conscientisation	Distraction	Tranquillité
V_{const}	-0,25 pts	60,5%	-1,25 pts	1 pts
V_{exp}	1 pts	72,5%	-1 pts	1 pts
V_{log}	0 pts	66,5%	-1 pts	0,5 pts
valeurs- p				
$V_{const}/exp/log$	.04	.004	.54	.73
V_{const}/exp	.04	.002	1	.66
V_{const}/log	.78	.26	.35	.48
V_{exp}/log	.08	.03	.31	.75

TABLEAU 4.6 – Le résumé des résultats et valeurs- p des tests statistiques sur la conscientisation, la distraction et l'esthétique du mouvement de l'anneau dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention.



(a) Facilité de conscientisation du mouvement. (b) Taux de conscientisation du mouvement.



(c) Distraction du mouvement.

(d) Tranquillité du mouvement.

FIGURE 4.12 – Les résultats sur la conscientisation, la distraction et l'esthétique du mouvement de l'anneau dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention.

4.2.10 Discussion

Dans les paragraphes suivants, nous interprétons les résultats obtenus pour valider ou invalider les hypothèses émises (**H1**, **H2**, **H3**, **H4** et **H5**) et répondre à la question de recherche **Q2**.

Détection et esthétique avec vision périphérique. Au regard du tableau 4.5 et de la figure 4.13, on observe que V_{log} et V_{exp} ont été détectés dans le champ de vision périphérique à des moments différents mais qu'ils sont devenus détectables au même changement de diamètre (c.-à-d. 10,58 cm soit 2,74° du champ de vision humain pour un

4.2. Utilisabilité du changement de symétrie de révolution pour notifier sans déranger par interaction périphérique

anneau à 2,6 m). Cependant, V_{const} n'a pas été détecté au même changement de diamètre que V_{log} et V_{exp} . Par conséquent l'hypothèse que, peu importe l'accélération, l'utilisateur détecte le changement de diamètre de l'anneau après une certaine distance parcourue dans son champ de vision périphérique n'est pas validée (**H1** non validée). V_{log} et V_{exp} ont été détectés au même changement de diamètre mais V_{exp} a été perçu significativement plus calme que V_{log} . Cette observation suggère que l'utilisateur considère un changement de diamètre des anneaux perçu dans son champ de vision périphérique comme plus ou moins calme en fonction de l'accélération du mouvement (**H2** validée).

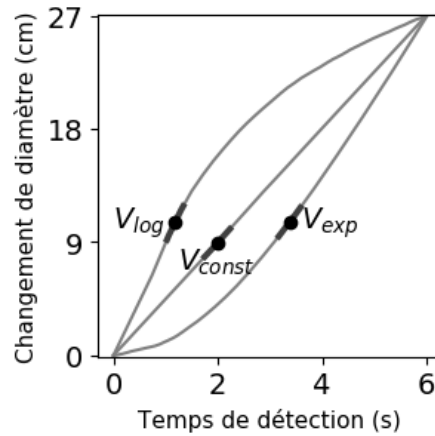


FIGURE 4.13 – Le changement de diamètre de l'anneau par rapport au temps de perception des participants.

Conscientisation, distraction et esthétique en périphérie de l'attention. Au regard du tableau 4.6, on observe que les participants étaient plus conscients de V_{exp} que de V_{log} et que de V_{const} dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention ce qui est contradictoire avec le fait qu'ils percevaient autant de V_{log} que de V_{exp} et que de V_{const} dans le champ de vision périphérique au centre de l'attention. Donc l'hypothèse que, peu importe l'accélération, l'utilisateur peut effectuer une tâche dans le champ de vision centrale au centre de l'attention et être conscient d'un changement de diamètre de l'anneau après une certaine distance parcourue dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention n'est pas validée (**H3** non validée). Une explication possible est que la tâche de mémorisation à court terme n'était pas adaptée. Backs et Seljos [9] montrent que la charge mentale de travail augmente avec la difficulté de la tâche (c.-à-d. la taille de la séquence de symboles à restituer) et qu'elle réduit le champ de vision (c.-à-d. effet tunnel) : le champ de vision peut être réduit à 86,41% avec une charge mentale de travail élevée. Dans notre cas, la charge mentale du participant et l'effet tunnel sont à leur paroxysme au début de la tâche de mémorisation lorsque la taille de la séquence est la plus grande. À mesure que le participant restitue les symboles, la taille de la séquence diminue tout comme la charge mentale du participant et l'effet tunnel. Les résultats de l'expérimentation montrent que les participants ont perçu V_{log} après 1,18 s et

V_{exp} après 3,38 s. Dans la tâche de mémorisation, ces moments correspondent à la phase de restitution du premier au deuxième symbole pour V_{log} et du deuxième au troisième symbole pour V_{exp} . Par conséquent, l'effet tunnel dans le champ de vision périphérique a pu être plus important pour V_{log} ce qui l'a rendu moins perceptible que V_{exp} . Le résultat reste donc à être confirmé avec d'autres tâches cognitives.

Aussi, V_{exp} et V_{const} ont été perçus comme plus calmes que V_{log} en périphérie de l'attention et V_{const} a été perçu comme moins dérangent que V_{exp} et V_{log} . Ces résultats suggèrent que l'utilisateur considère le changement de diamètre des anneaux perçu dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention comme plus ou moins dérangent et comme plus ou moins calme en fonction de l'accélération du mouvement (**H4** validée et **H5** validée).

Réponse à la question de recherche. **H2**, **H4** et **H5** sont validées. En effet, on observe que V_{exp} est perçu plus souvent et plus calmement que V_{log} et V_{const} dans le champ de vision périphérique au centre de l'attention et en périphérie de l'attention. Par conséquent, en réponse à **Q2** nous conseillons d'utiliser le changement de symétrie de révolution avec une vitesse exponentielle pour mettre à jour l'histogramme vertical avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution pour notifier sans déranger les utilisateurs de l'arrivée d'une variation EnR.

4.3 Expérience utilisateur sur la durée avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution en contexte d'usage

Dans cette troisième expérimentation, nous étudions l'expérience utilisateur sur la durée avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution en contexte d'usage. Pour effectuer au quotidien la pratique de décalage du chargement de batterie, l'employé doit être motivé *intrinsèquement* ou *extrinsèquement* pour appliquer les consignes. La *motivation intrinsèque* se réfère à la motivation qui est contrôlée par des facteurs inhérents à l'individu, sans attente de récompense externe, tel que l'alignement de la pratique avec les valeurs de l'individu. La *motivation extrinsèque* se réfère à la motivation qui est contrôlée par des facteurs externes à l'individu, tels que l'effet de l'observateur de l'expérimentation et l'effet de nouveauté des artefacts. Une fois l'employé motivé (*intrinsèquement* ou *extrinsèquement*), l'exécution de la pratique dépendra des opportunités (c.-à-d. l'artefact annonce l'arrivée d'une variation EnR) et des capacités de l'individu (c.-à-d. l'individu est au bureau et est prêt à appliquer les consignes pour les heures à venir de la variation EnR).

Au-delà de l'effet de l'observateur de l'expérimentation et l'effet de nouveauté des artefacts, nous posons la question suivante :

Q3 *Est-ce qu'afficher l'histogramme vertical avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution véhicule une meilleure expérience aux utilisateurs sur la durée qu'avec un afficheur planaire ?*

4.3.1 Hypothèses

Concernant la motivation des participants, nous émettons deux hypothèses. Avec l'effet de nouveauté [163], le participant (c.-à-d. l'employé) a une réponse au stress plus élevée les premières fois qu'il fait face à une nouvelle expérience (p. ex., lorsque l'artefact annonce l'arrivée d'une variation EnR). Nous émettons l'hypothèse :

H1 *Au début de l'expérimentation, les employés appliqueront les consignes principalement car ils seront extrinsèquement motivés par l'utilisation de nouveaux artefacts.*

Au-delà de l'effet de nouveauté des artefacts, c'est-à-dire après deux mois d'utilisation des artefacts [171], nous émettons l'hypothèse :

H2 *À la fin de l'expérimentation, les participants continueront à appliquer les consignes principalement car ils seront intrinsèquement motivés par une pratique alignée sur leurs valeurs.*

Concernant l'expérience des participants sur la durée, nous émettons deux hypothèses. La *représentation tangible* des TUIs peut radicalement affecter les performances et le

raisonnement de l'utilisateur par rapport à la *représentation graphique* des GUIs [161]. Nous émettons l'hypothèse suivante :

H3 *Un artefact utilisant la représentation tangible dynamique possède une qualité pragmatique³ supérieure sur la durée à un artefact utilisant la représentation graphique dynamique.*

La *représentation tangible dynamique* est une propriété typique des SCIs offrant au système la possibilité d'utiliser le changement de forme pour communiquer avec les utilisateurs d'une manière plus expressive [152]. Nous émettons l'hypothèse suivante :

H4 *Un artefact utilisant la représentation tangible dynamique possède une qualité hédonique³ supérieure sur la durée à un artefact utilisant la représentation graphique dynamique.*

Pour valider ou invalider ces hypothèses, nous avons déployé et étudié CairnFORM (c.-à-d. un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution) et CairnSCREEN (c.-à-d. un afficheur planaire) sur un lieu de travail pendant 2 mois.

4.3.2 Apparatus

L'apparatus de CairnFORM et de CairnSCREEN est illustré par la figure 4.14. CairnFORM et CairnSCREEN ont été déployés dans deux bureaux ouverts du laboratoire avec respectivement 3 doctorants et 3 doctorants. Sur les ordinateurs portables de tout les participants, un programme était installé pour traquer l'identité de la personne (en récupérant le nom d'utilisateur de la session Windows/Linux/macOS), la présence au bureau (en balayant les réseaux Wi-Fi à proximité et en détectant le réseau Wi-Fi propre au bureau) et les événements de la batterie (par la surveillance du système de contrôle des batteries). Le programme envoyait ensuite ces informations toutes les 15 minutes par Ethernet ou par Wi-Fi au serveur web. Toutes les 30 minutes, le serveur web mettait à jour les données prévisionnelles sur la production locale d'énergie solaire (fournies par l'entreprise EPICES-ENERGIE⁴). CairnFORM et CairnSCREEN étaient positionnés dans leur bureau ouvert respectif de manière à ce qu'un maximum de participants puissent voir l'artefact tout en étant assis à leur bureau. Pour CairnFORM, un Raspberry Pi 3 était connecté par Ethernet au serveur web pour mettre à jour les données à visualiser avec l'histogramme toutes les 15 minutes. Ce Raspberry Pi 3 se connectait avec un client MQTT au Raspberry Pi 3 de CairnFORM qui était utilisé comme hotspot Wi-Fi sur lequel tournait un serveur MQTT. Le client MQTT s'abonnait au sujet «mqtt/cairnform» et publiait les transformations que CairnFORM devait effectuer pour mettre à jour l'histogramme. CairnSCREEN était contrôlé par un ordinateur fixe connecté par Ethernet au serveur web pour mettre à jour les données à visualiser avec l'histogramme toutes les 15 minutes. Aussi, CairnSCREEN était équipé d'enceintes pour émettre un son lorsque l'histogramme se mettait à jour pour contrebalancer le biais induit par le bruit généré par le changement de diamètre des anneaux de CairnFORM. Enfin, un livre d'or était

3. au sens de UEQ-S[158]

4. <http://www.epices-energie.fr/>, visité le 14 octobre 2026.

4. Expérimentations

2 hommes, *Md* 20-29 ans, *Md* Bac+5). Dans le bureau ouvert de CairnSCREEN, on retrouvait 3 doctorants (1 femme, 2 hommes, *Md* 20-29 ans, *Md* Bac+5).

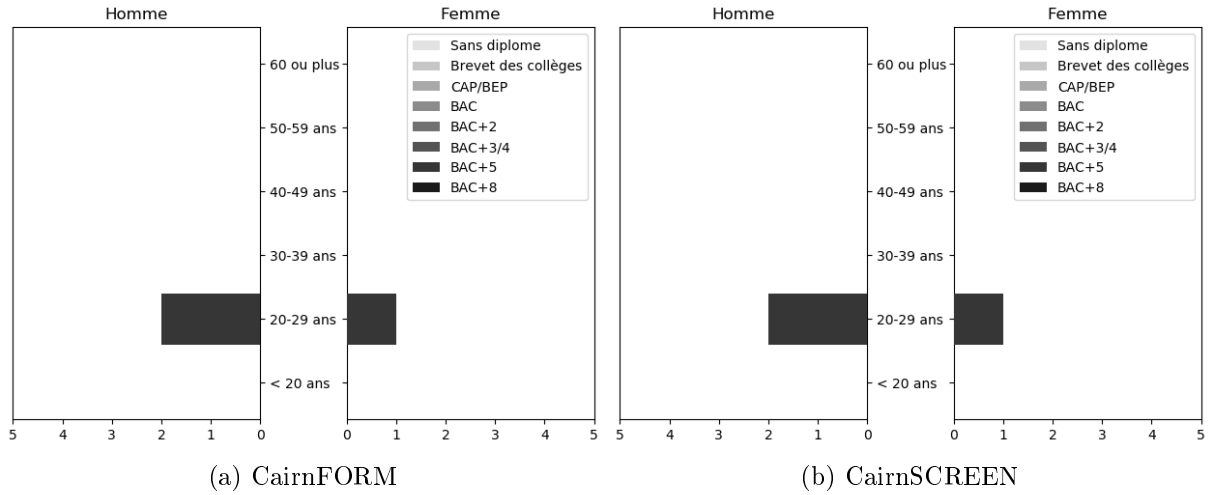


FIGURE 4.15 – La pyramide des participants de la troisième expérimentation.

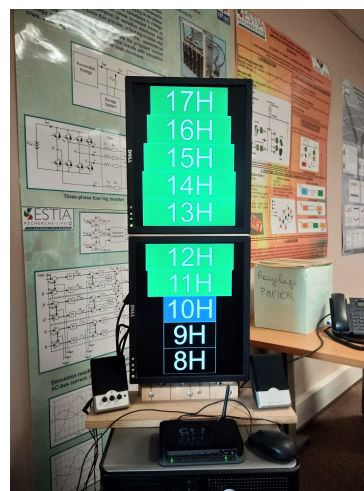
4.3.4 Modalités

Pendant cette étude, nous avons comparé l'expérience des utilisateurs avec deux types d'afficheur :

1. *CairnFORM*. Un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution.
2. *CairnSCREEN*. Un afficheur planaire.



(a) CairnFORM.



(b) CairnSCREEN.

FIGURE 4.16 – Les deux types d'afficheur utilisés pour la troisième expérimentation.

Pendant 2 mois, ces deux artefacts affichaient un histogramme vertical. Ledit histogramme vertical visualisait une à une les variations de production locale d'énergie renouvelable à venir pendant la journée de travail : la production locale d'énergie renouvelable de chaque heure de la variation est représentée avec CairnFORM/CairnSCREEN par la largeur des anneaux verts/les barres vertes (voir figure 4.16). Plus la production locale d'énergie renouvelable sera grande pendant l'heure, plus l'anneau/la barre est large (voir figure 4.16). L'histogramme visualisait également l'heure actuelle : l'heure actuelle est représentée avec CairnFORM/CairnSCREEN par l'anneau bleu/la barre bleue (voir figure 4.16). Enfin, l'histogramme visualisait la plus grande profondeur de charge réalisée (c.-à-d. le plus grand pourcentage de batterie chargé) par les employés pour les heures passées : la plus grande profondeur de charge pour chaque heure passée est représentée avec CairnFORM/CairnSCREEN par la couleur des anneaux/barres précédents l'anneau bleu/la barre bleue. Plus la profondeur de charge était grande pendant l'heure, plus l'anneau vert/la barre verte devient blanc/blanche (voir figure 4.16)

Pendant 2 mois, le système commun utilisé par CairnFORM et CairnSCREEN récoltait les données *ProdData* et *ConsData* :

- *ProdData*. Les données prévisionnelles sur la capacité (en %) de production d'énergie solaire du laboratoire, heure par heure, pour la journée de travail (8h00-17h59). Données fournies par l'entreprise EPICES-ENERGIE.
- *ConsData*. Les données historiques sur la profondeur maximale de charge des batteries des ordinateurs portables (en %), heure par heure, pour la journée de travail (8h00-17h59). Données récupérées par un programme espion installé sur l'ordinateur portable des participants sous consentement éclairé.

Le choix des données à récolter, du filtre appliqué aux données à visualiser et de la visualisation des données à afficher sont justifiés au chapitre 8 (page 115).

4.3.5 Tâches

Pendant cette étude, nous avons cherché à observer si des artefacts tels que CairnFORM et CairnSCREEN pouvait s'intégrer au lieu de travail pour aider les employés à décaler le chargement de la batterie de leur ordinateur portable (c.-à-d. $T_{batterie}$). Pour les aider à accomplir $T_{batterie}$, les employés avaient à disposition des consignes leur conseillant une pratique. Le jeu de consignes pour accomplir $T_{batterie}$ avec un ordinateur portable à batterie amovible était :

1. Pendant les heures ascendantes de la variation EnR, *décharger* la batterie et, si la batterie est à 50%, *enlever* la batterie.
2. Pendant l'heure de pic de la variation EnR, *charger* la batterie.
3. Pendant les heures descendantes de la variation EnR, continuer à *charger* la batterie.

Et le jeu de consignes pour accomplir $T_{batterie}$ avec un ordinateur portable à batterie non amovible était :

1. Pendant les heures ascendantes de la variation EnR, *décharger* la batterie à 50%.
2. Pendant l'heure de pic de la variation EnR, *charger* la batterie.
3. Pendant les heures descendantes de la variation EnR, continuer à *charger* la batterie.

Le choix du cas d'usage et des jeux de consignes à appliquer sont justifiés au chapitre 8 (page 115).

4.3.6 Procédure

L'expérimentation s'est déroulée sur dix semaines (du 14 mai 2018 au 27 juillet 2018) et en quatre phases :

1. *Phase de contrôle.* Après que le participant ait signé un formulaire de consentement éclairé, un programme espion a été installé sur son ordinateur portable pour surveiller ses pratiques de chargement de batterie au travail avant le déploiement de l'artefact. Cette phase a duré deux semaines.
2. *Phase de préparation.* Une réunion d'information a ensuite été organisée avec tout les participants. Pendant cette réunion, nous avons demandé aux participants de remplir un questionnaire démographique et un questionnaire concernant leurs valeurs pro-environnementales. À partir des données récoltées avec le programme espion pendant la phase de contrôle, nous leur avons montré que le chargement des batteries au travail n'est pas synchronisé avec la disponibilité des EnRs. Puis, nous leur avons présenté un histogramme pour les aider, s'ils le souhaitent, à décaler le chargement de la batterie de leur ordinateur portable vers les moments où la production locale d'énergie renouvelable est la plus forte. Enfin, nous leur avons expliqué le déroulement de l'expérimentation : un artefact affichant l'historique va être déployé pendant 2 mois dans les deux bureaux ouverts, des jeux de consignes imprimés sur une feuille A4 seront mis à disposition dans les bureaux pour aider les participants à appliquer la pratique et un livre d'or sera également mis à disposition dans les deux bureaux pour permettre aux participants de commenter l'expérimentation à l'écrit. Enfin, un entretien individuel sera réalisé au début et à la fin de l'expérimentation pour recueillir leurs commentaires oraux sur l'expérimentation et leur demander de compléter des questionnaires.
3. *Phase de déploiement.* Les artefacts ont été déployés dans les deux bureaux. Le programme espion était toujours installé sur l'ordinateur portable des participants. Cette phase a duré huit semaines. Au bout d'une semaine, nous avons réalisé un entretien individuel avec les participants pour récolter leurs commentaires oraux initiaux sur l'expérimentation et leur demander de compléter un questionnaire sur leur expérience initiale avec l'artefact.
4. *Phase de retrait.* Les artefacts ont été retirés des bureaux. Le programme a été désinstallé des ordinateurs portables des participants. Nous avons alors réalisé un entretien individuel avec les participants pour récolter leurs commentaires oraux finaux sur l'expérimentation et leur demander de compléter un questionnaire sur leurs valeurs pro-environnementales et sur leur expérience finale avec l'artefact.

4.3.7 Mesures et questionnaires

Pour observer l'accomplissement de $T_{batterie}$ par les employés, nous avons installé un programme espion sur leur ordinateur portable afin de mesurer toutes les 15 minutes :

- *L'identité de l'employé.* Le programme récupère le nom d'utilisateur de la session Windows/Linux/MacOS ;
- *La présence au bureau.* Le programme balaye les réseaux Wi-Fi à proximité et détecte si le réseau Wi-Fi associé au bureau de l'utilisateur est à proximité ;
- *Les événements de la batterie.* Le programme appelle le système de contrôle des batteries Windows/Linux/MacOS pour récupérer le niveau de batterie et le statut de la batterie (p. ex., branché ou débranché).

Ces informations étaient envoyées à un serveur Web par connexion Wi-Fi ou Ethernet.

Pour identifier des problèmes avec l'expérimentation au quotidien, nous avons demandé aux employés d'écrire leurs commentaires sur un livre d'or mis à disposition à côté de l'artefact.

Dans un entretien individuel au début et à la fin de l'expérimentation, nous avons demandé aux participants de remplir un questionnaire sur :

- *Les valeurs pro-environnementales.* Pour aider à estimer si l'accomplissement de $T_{batterie}$ a été influencé par les valeurs de l'employé (c.-à-d. une motivation intrinsèque) en utilisant le questionnaire *New Ecological Paradigm Scale (NEP)* [45].
- *L'expérience utilisateur.* Pour aider à estimer si l'accomplissement de $T_{batterie}$ a été influencé par l'artefact introduit à l'employé (c.-à-d. une motivation extrinsèque) en utilisant le questionnaire *Short User Experience (UEQ-S)* [158].

Pendant l'entretien individuel, nous avons également posé des questions relatives à l'artefact :

1. *Est-ce que l'artefact est toujours perceptible ? Si non, dans quelles conditions ?*
2. *Est-ce que l'artefact attire votre attention ? Si oui, dans quelles conditions ?*
3. *Est-ce que l'artefact vous déconcentre ? Si oui, dans quelles conditions ?*
4. *Avez-vous des commentaires sur l'artefact ?*

Mais aussi questions relatives à la pratique :

5. *Avez-vous essayé de décaler le chargement de la batterie de votre ordinateur portable ? Si oui, combien de fois ?*
6. *Qu'avez-vous fait pour appliquer les consignes ? Quelles étapes avez-vous suivies ?*
7. *Est-ce que vous avez rencontré des problèmes pour appliquer les consignes ? Si oui, quels problèmes ?*
8. *Avez-vous des commentaires sur la pratique ?*

Et enfin une question relative à la nature de leur motivation à appliquer les consignes :

9. *Pendant l'expérimentation, avez-vous préféré utiliser l'artefact ou réduire votre consommation EnNR ?*

4.3.8 Outils

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. Pour les statistiques descriptives des données, nous avons principalement effectué le calcul de deux critères de position (la moyenne et la médiane) et de quatre critères de dispersion (l'écart-type, les quartiles, le minimum et le maximum). Le tableau 4.7 présente les tests statistiques conseillés pour les données quantitatives (p. ex., nombre de charges), qualitatives nominales (p. ex., taux de charges décalées) et qualitatives ordinales (p. ex., réponses à l'UEQ-S [158] et au NEP [45]).

Deux groupes	Type de données		
	Quantitative	Qualitative Nominale	Qualitative Ordinale
Indépendants	Student	Fischer	Cochran-Armitage
Appariés	Student/Wilcoxon	Cochran	Wilcoxon/test des signes

TABLEAU 4.7 – Les tests statistiques conseillés⁵ en fonction du type de données pour deux groupes indépendants ou appariés.

4.3.9 Résultats

Afin de faciliter la lecture des résultats, les valeurs- p des tests statistiques sont présentées dans des tableaux et représentées sur des figures : un double astérisque (**) représente une valeur- p inférieure à 0,05 pour un test statistique entre deux groupes indépendants. Un double dièse (##) représente une valeur- p inférieure à 0,05 pour un test statistiques entre deux groupes appariés.

Qualité pragmatique et qualité hédonique des artefacts. Les résultats des tests statistiques sur le score donné par les participants aux deux qualités de UEQ-S [158] (figure 4.17) ne révèlent aucune différence significative de qualité hédonique ou de qualité pragmatique entre CairnFORM et CairnSCREEN et entre le début et la fin de l'expérimentation. Au début de l'expérimentation, on observe que CairnFORM (Md_{begin} 1,75pts) était considéré comme plus pragmatique pour $T_{batterie}$ que CairnSCREEN (Md_{begin} 1,5pts) soit une différence de 0,25pts. En deux mois, la qualité pragmatique de CairnFORM et de CairnSCREEN a simultanément augmenté et, à la fin de l'expérimentation, CairnSCREEN (Md_{end} 2pts) était considéré comme aussi pragmatique que CairnFORM (Md_{end} 2pts). Au début de l'expérimentation, on observe que CairnFORM (Md_{begin} 1,75pts) était considéré comme plus hédonique pour

5. <https://biostatgv.sentiweb.fr/?module=tests>, visité le 14 octobre 2026.

4.3. Expérience utilisateur sur la durée avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution en contexte d'usage

$T_{batterie}$ que CairnSCREEN (Md_{begin} 1,0pts) soit une différence de 0,75pts. À la fin de l'expérimentation, CairnFORM (Md_{end} 2,25pts) était toujours considéré comme plus hédonique que CairnSCREEN (Md_{end} 0,75pts). En deux mois, la qualité hédonique de CairnSCREEN a baissé alors que la qualité hédonique de CairnFORM a augmenté.

Le résumé des résultats et les valeurs- p des tests statistiques sur les réponses des participants au questionnaire UEQ-S [158] sont présentés dans le tableau 4.8. La section 4.3.10 (page 72) discute de notre interprétation de ces résultats.

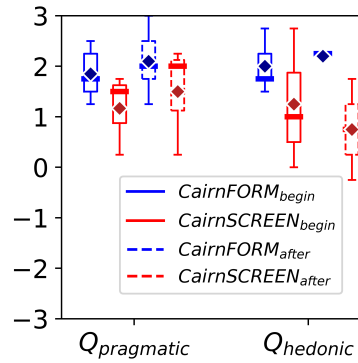


FIGURE 4.17 – Les résultats sur le score donné par les participants aux deux qualités de UEQ-S [158] pour CairnFORM et CairnSCREEN au début et à la fin de la troisième expérimentation.

Modalité	Réponses au UEQ-S	
	$Q_{pragmatic}$	$Q_{hedonic}$
$CairnFORM_{begin}$	1,75 pts	1,75 pts
$CairnFORM_{end}$	2 pts	2,25 pts
$CairnSCREEN_{begin}$	1,5 pts	1 pts
$CairnSCREEN_{end}$	2 pts	0,75 pts
valeurs- p		
$CairnFORM_{begin/end}$	.53	.40
$CairnSCREEN_{begin/end}$	.38	.51
$CairnFORM/CairnSCREEN_{begin}$	.61	.59
$CairnFORM/CairnSCREEN_{end}$	.62	.43

TABLEAU 4.8 – Le résumé des résultats et les valeurs- p des tests statistiques sur le score donné par les participants aux deux qualités de UEQ-S [158].

Valeurs pro-environnementales des participants. Les résultats des tests statistiques sur le score donné par les participants aux valeurs du NEP [45] (figure 4.18)

ne révèlent aucune différence significative de valeurs pro-environnementales entre CairnFORM et CairnSCREEN entre avant et après le déploiement. Tout les participants exprimaient des valeurs pro-environnementales similaires avant l'expérimentation et les deux artefacts n'ont pas influencé ces valeurs pendant l'expérimentation. Voici une illustration des valeurs pro-environnementales du participant moyen au regard du questionnaire NEP [45] :

1. *Équilibre de la Nature (EN)* : «1) Je suis d'accord pour dire que lorsque l'humain interfère avec la Nature cela produit souvent des conséquences désastreuses. 2) Je ne suis pas du tout d'accord pour dire que l'équilibre de la nature est assez fort pour compenser les impacts de l'industrie moderne. 3) Je suis d'accord pour dire que l'équilibre de la Nature est très délicat et facilement bouleversé.»
2. *Crise Écologique (CE)* : «1) Je suis tout à fait d'accord pour dire que les humains abusent sévèrement l'environnement. 2) Je ne suis pas du tout d'accord pour dire que "la crise écologique" a été grandement exagérée. 3) Je suis d'accord pour dire que si les choses continuent sur leur lancée, nous allons bientôt expérimenter une catastrophe écologique majeure.»
3. *Anti-Exceptionnalisme (AE)* : «1) Je ne suis pas sûr que l'ingéniosité humaine va nous assurer de ne pas rendre la Terre invivable. 2) Je suis d'accord pour dire que les plantes et les animaux ont autant le droit d'exister que les hommes. 3) Je suis d'accord pour dire que, malgré leurs capacités spéciales, les êtres humains sont toujours sujets aux lois de la nature.»
4. *Limites de Croissance (LC)* : «1) Je suis d'accord pour dire que nous approchons les limites du nombre d'humains que la Terre peut supporter. 2) Je suis d'accord pour dire que la Terre possède plein de ressources naturelles que nous devons apprendre à exploiter. 3) Je suis d'accord pour dire que la Terre est comme un vaisseau spatial avec des espaces et des ressources limitées.»
5. *Anti-Anthropocentrisme (AA)*. «1) Je ne suis pas sûr que l'humain a le droit de modifier l'environnement naturel pour qu'il corresponde à ses besoins. 2) Je ne suis pas d'accord pour dire que les humains étaient destinés à gouverner le reste de la nature. 3) Je ne suis pas sûr que les humains vont en apprendre suffisamment sur la nature pour pouvoir la contrôler un jour.»

Le résumé des résultats et les valeurs- p des tests statistiques sur les réponses des participants au questionnaire NEP [45] sont présentés dans le tableau 4.9. La section 4.3.10 (page 72) discute de notre interprétation de ces résultats.

4.3. Expérience utilisateur sur la durée avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution en contexte d'usage

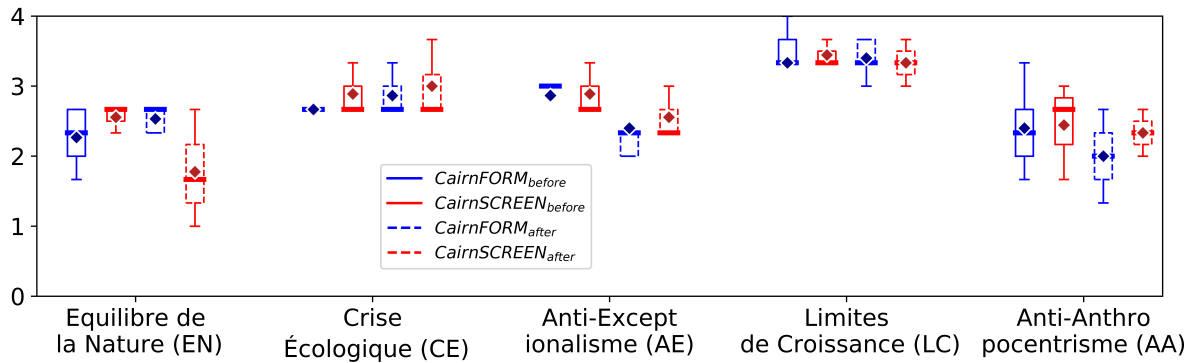


FIGURE 4.18 – Les résultats sur le score donné par les participants aux valeurs du NEP [45] pour CairnFORM et CairnSCREEN au début et à la fin de la troisième expérimentation.

Modalité	Réponses au NEP				
	EN	CE	AE	LC	AA
<i>CairnFORM_{before}</i>	2,3 pts	2,6 pts	3 pts	3,3 pts	2,3 pts
<i>CairnFORM_{after}</i>	2,6 pts	2,6 pts	2,3 pts	3,3 pts	2 pts
<i>CairnSCREEN_{before}</i>	2,6 pts	2,6 pts	2,6 pts	3,3 pts	2,6 pts
<i>CairnSCREEN_{after}</i>	1,6 pts	2,6 pts	2,3 pts	3,3 pts	2,3 pts
valeurs- <i>p</i>					
<i>CairnFORM_{before/after}</i>	.34	.30	.35	.91	.35
<i>CairnSCREEN_{before/after}</i>	.27	.82	.27	.66	.66
<i>CairnFORM/CairnSCREEN_{before}</i>	.84	.81	.65	.83	1
<i>CairnFORM/CairnSCREEN_{after}</i>	.64	.89	.96	.83	.71

TABLEAU 4.9 – Le résumé des résultats et les valeurs-*p* des tests statistiques sur le score donné par les participants aux valeurs du NEP [45].

Accomplissement de la pratique par les participants. Pendant les 15 jours de travail de P_{before} , il y a eu 10 journées avec au moins une variation EnR pour lesquelles les employés auraient pu appliquer les consignes. Pendant les 37 jours de travail de P_{after} , il y a eu 22 journées avec au moins une variation EnR pour lesquelles les employés auraient pu appliquer les consignes. La figure 4.19 visualise la profondeur de chaque charge réalisée par les participants pendant les journées de P_{before} et de P_{after} avec au moins une variation EnR. La figure visualise également le taux EnNR décalé par chaque charge (un taux EnNR décalé qui est négatif/positif indique une charge décalée vers un pic/creux EnR).

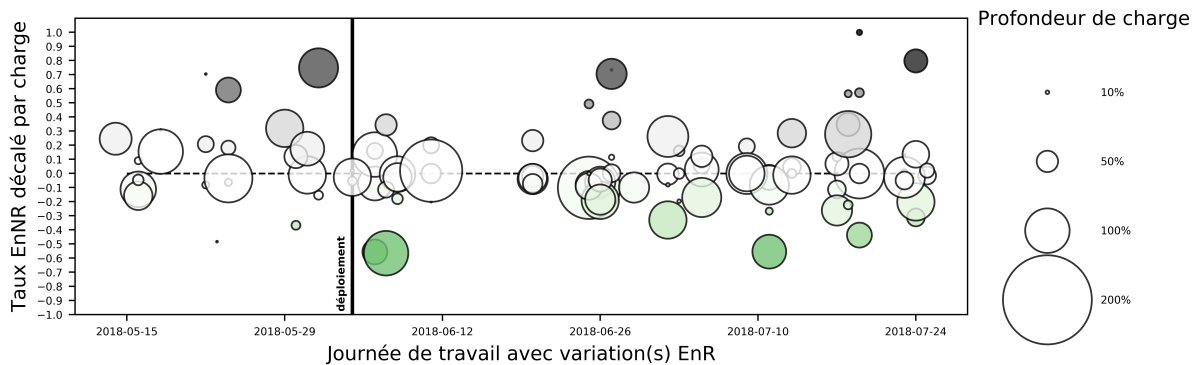


FIGURE 4.19 – Le taux EnNR décalé par charge et la profondeur par charge pour chaque journée de travail avec au moins une variation EnR, avant et après le déploiement de CairnFORM et CairnSCREEN.

Les résultats des tests statistiques sur l’accomplissement de la pratique entre avant et après le déploiement des artefacts révèlent des différences significatives : CairnFORM et CairnSCREEN ont influencé l’accomplissement de la pratique après leur déploiement. Cependant, les résultats des tests statistiques sur les mesures de l’accomplissement de la pratique entre CairnFORM et CairnSCREEN ne révèlent aucune différence significative. Sans être tous statistiquement significatifs, les résultats suivants suggèrent que les deux artefacts ont aidé les participants à charger la batterie de leur ordinateur portable plus souvent pendant les variations EnR et plus souvent et plus profondément pendant les pics EnR. En conséquence, on observe une économie d’EnNR : une charge consommait $+6,2$ Wh EnNR avant le déploiement puis $-0,46$ Wh EnNR après le déploiement.

Avant/Après déploiement. Pour une journée avec variation EnR, le nombre de charges par participant a significativement augmenté de $+0,27 \pm 0,16$ charges après l’introduction des artefacts (CairnFORM $+0,3 \pm 0,21$ charges/jour, CairnSCREEN $+0,23 \pm 0,05$ charges/jour, voir figure 4.20a). Le nombre de charges décalé par participant a augmenté de $+0,17 \pm 0,11$ charges décalées après l’introduction des artefacts (CairnFORM $+0,22 \pm 0,09$ charges décalées/jour, CairnSCREEN $+0,11 \pm 0,10$ charges décalées/jour, voir figure 4.20b). Au final, le taux de charges décalées par participant pendant une journée avec variation EnR a augmenté de $+12 \pm 22\%$ après l’introduction des artefacts (CairnFORM $+7 \pm 6\%$ de charges décalées, CairnSCREEN $+16 \pm 30\%$ de charges décalées, voir figure 4.20c). La profondeur des charges décalées par les participants a augmenté de $+25 \pm 28\%$ après l’introduction des artefacts (CairnFORM $+17 \pm 10\%$ de profondeur, CairnSCREEN $+32 \pm 37\%$ de profondeur, voir figure 4.20d). Au final, une charge décalée après l’introduction des artefacts économisait $-5 \pm 7\%$ de batterie en EnNR par rapport à une charge décalée avant l’introduction des artefacts (figure 4.20e). Pour un Lenovo ThinkPad T540p avec une puissance nominale de 15W équipé d’une batterie lithium-ion à 6 cellules (8,8Ah, 11,11V), $-5 \pm 7\%$ de batterie correspond approximativement à $13\text{Wh} \pm 17\text{Wh}$.

CairnFORM/CairnSCREEN. Pour une journée avec variation EnR, le nombre de

4.3. Expérience utilisateur sur la durée avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution en contexte d'usage

charges par participant de CairnFORM était supérieur à celui de CairnSCREEN avant l'introduction des artefacts (avant $+0,23 \pm 0,33$ charges/jour, voir figure 4.20a). Cette différence s'est accentuée pour le groupe de CairnFORM après l'introduction des artefacts (après $+0,3 \pm 0,18$ charges/jour, voir figure 4.20a). Le nombre de charges décalées par participant de CairnFORM était supérieur à celui de CairnSCREEN avant l'introduction des artefacts (avant $+0,07 \pm 0,12$ charges décalées/jour, voir figure 4.20b). Cette différence s'est accentuée pour CairnFORM après l'introduction des artefacts (après $+0,18 \pm 0,04$ charges décalées/jour, voir figure 4.20b). Le taux de charges décalées par participant de CairnFORM était supérieur à celui de CairnSCREEN avant l'introduction des artefacts (avant $+13 \pm 23\%$ de charges décalées, voir figure 4.20c). Cette différence s'est atténuée pour CairnSCREEN après l'introduction des artefacts (après $+4 \pm 11\%$ de charges décalées, voir figure 4.20c). La profondeur des charges décalées par participant de CairnFORM était supérieure à celle de CairnSCREEN avant l'introduction des artefacts et légèrement inférieure après l'introduction des artefacts (avant $+12 \pm 36\%$ de profondeur, après $-3 \pm 1\%$ de profondeur, voir figure 4.20d). Au final, une charge décalée par un participant de CairnFORM économisait $-4 \pm 2\%$ de batterie en EnNR par rapport à une charge décalée par participant de CairnSCREEN (figure 4.20e). Cette différence est restée inchangée après l'introduction des artefacts ($-4 \pm 8\%$ de batterie en EnNR par charge décalée).

Le résumé des résultats et les valeurs- p des tests statistiques sur l'accomplissement de la pratique par les participants sont présentés dans le tableau 4.10. La section 4.3.10 (page 72) discute de notre interprétation de ces résultats.

Modalité	Accomplissement de la pratique				
	<i>NbC</i>	<i>NbCD</i>	<i>TauxCD</i>	<i>ProfoCD</i>	<i>GainCD</i>
<i>CairnFORM</i> _{before}	0,53 $\pm 0,21$	0,20 $\pm 0,00$	44 $\pm 17\%$	41 $\pm 14\%$	-5 $\pm 1\%$
<i>CairnFORM</i> _{after}	0,83 $\pm 0,02$	0,42 $\pm 0,09$	51 $\pm 12\%$	59 $\pm 12\%$	-10 $\pm 7\%$
<i>CairnSCREEN</i> _{before}	0,30 $\pm 0,16$	0,13 $\pm 0,12$	31 $\pm 25\%$	29 $\pm 26\%$	-2 $\pm 2\%$
<i>CairnSCREEN</i> _{after}	0,53 $\pm 0,19$	0,24 $\pm 0,08$	47 $\pm 7\%$	61 $\pm 12\%$	-6 $\pm 3\%$
valeurs- p					
<i>CairnFORM</i> _{before/after}	.17	.07	.22	.91	.47
<i>CairnSCREEN</i> _{before/after}	.02	.27	.53	.66	.35
<i>CairnFORM/CairnSCREEN</i> _{before}	.27	.49	.58	.83	.06
<i>CairnFORM/CairnSCREEN</i> _{after}	.09	.10	.71	.83	.47

TABLEAU 4.10 – Le résumé des résultats et les valeurs- p des tests statistiques sur l'accomplissement de la pratique par les participants [45].

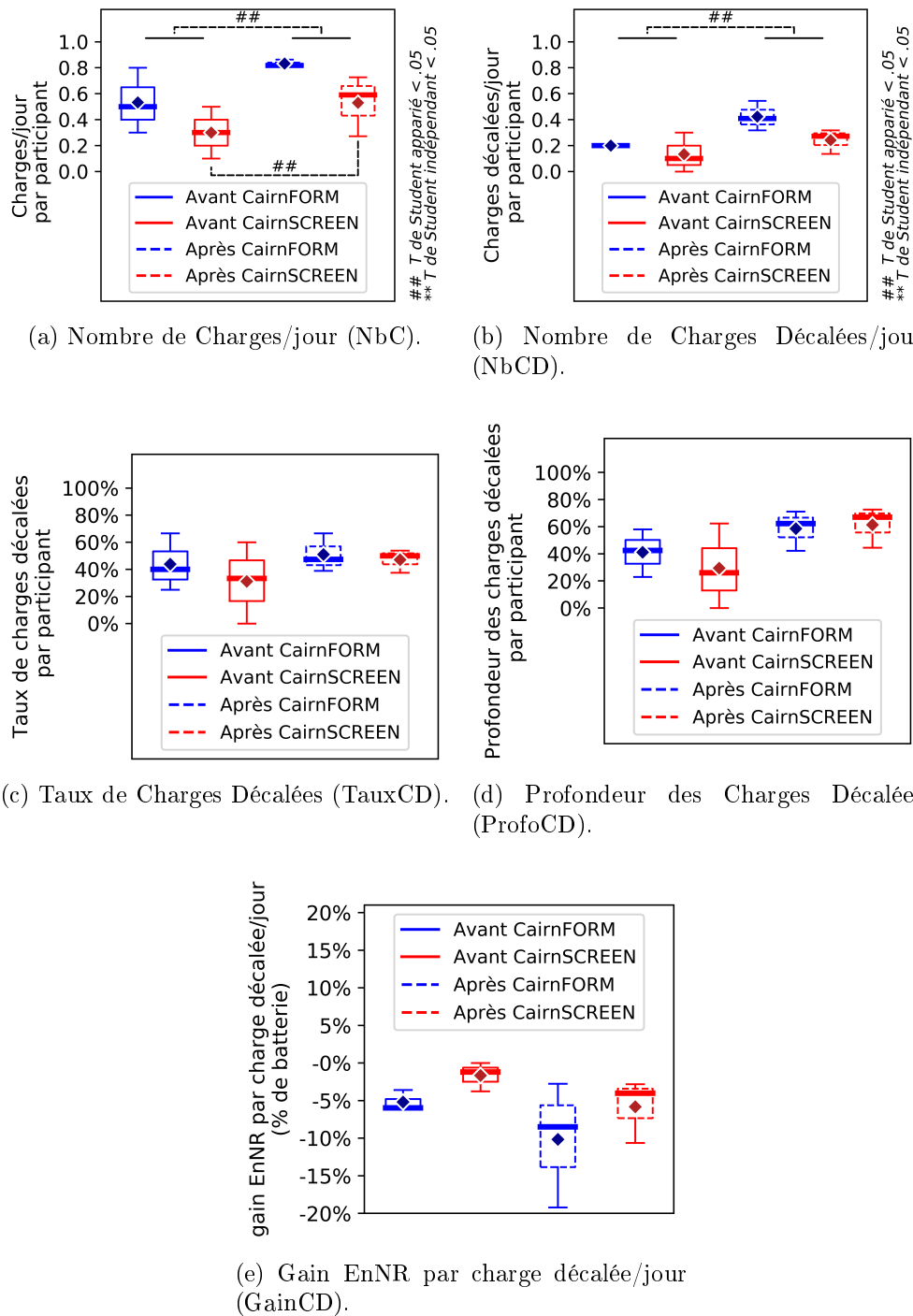


FIGURE 4.20 – Les résultats sur l’accomplissement de la pratique pour CairnFORM et CairnSCREEN avant et après le déploiement.

Retours d’information des participants. À partir des commentaires écrits dans le livre d’or et des commentaires oraux des entretiens individuels, nous avons principalement

identifié dix commentaires :

- **C1** : une pratique pertinente et simple au travail. Tout les participants déclarent avoir essayé d'effectuer la pratique chaque fois qu'ils étaient au bureau et que l'artefact annonçait une variation EnR. Les participants soulignent la pertinence de la pratique au travail (p. ex., **P2** : «*La pratique est intéressante. C'est la première fois qu'on me donne l'opportunité de charger ma batterie aux moments optimaux [de production EnR]. On peut faire quelque chose d'autre de positif [pour l'environnement] au travail.*», **P4** : «*On est beaucoup à utiliser des ordinateurs portables au travail, la pratique est donc pertinente.*»). Les participants soulignent également la simplicité de la pratique au travail (p. ex., **P5** : «*La pratique ne coûte rien. Je n'ai pas besoin de me lever de mon bureau. J'ai juste à débrancher/brancher mon ordinateur portable.*», **P3** : «*La pratique est extrêmement simple.*»).
- **C2** : des problèmes rencontrés pour appliquer certaines consignes. Un participant déclare qu'il peut être difficile d'appliquer les consignes au travail quand on est pressé ou stressé (**P4** : «*Les moments où on est pressé ou stressé, je ne fais pas attention à être vert.*»). On note que la consigne qui consiste à enlever la batterie si la batterie est déjà à 50% avant l'arrivée d'un pic EnR semble être contraignante et difficile à appliquer. En effet, un participant déclare que cette consigne est contraignante (**P3** : «*Enlever la batterie c'est trop contraignant.*»). De plus, certains participants ont rencontré des difficultés à appliquer cette consigne. En effet, un participant déclare avoir débranché son ordinateur portable du secteur alors qu'il avait déjà enlevé la batterie (**P1** : «*2h avant l'arrivée du pic EnR, j'ai enlevé ma batterie et je suis resté branché au secteur. 1 heure avant le pic, par réflexe, j'ai débranché mon ordinateur portable en oubliant que j'avais enlevé la batterie et mon ordinateur s'est éteint.*»). Un autre participant déclare avoir enlevé la batterie de son ordinateur portable alors qu'il avait déjà débranché l'ordinateur du secteur (**P2** : «*Une fois, j'ai enlevé ma batterie pour attendre un pic [EnR] ce qui a éteint mon ordinateur car j'avais oublié que j'avais débranché l'ordinateur 1 heure avant.*»).
- **C3** : plus de retours sur l'accomplissement de la pratique. Plusieurs participants auraient aimé avoir des rétro-informations sur l'accomplissement de leur pratique personnelle (**P1** : «*j'aurais bien aimé avoir plus de retours sur ce que j'ai économisé [en EnNR].*», **P4** : «*Ce serait intéressant d'avoir un bilan énergétique en plus du prototype.*»).
- **C4** : des artefacts qui véhiculent de la tristesse et de la joie. Les participants déclarent qu'ils étaient plutôt tristes lorsque les artefacts n'annonçaient pas une variation EnR (p. ex., **P2** : «*Les jours gris quand le prototype n'est pas illuminé, c'est déprimant.*»). Au contraire, ils étaient plutôt contents lorsque les artefacts annonçaient une variation EnR (p. ex., **P5** : «*Quand il est vert, on est content car on sait qu'il va y avoir du soleil.*»). Les conditions météorologiques sont connues pour affecter l'humeur des êtres humains [39, 105]. La capacité des deux artefacts à véhiculer de fortes émotions (c.-à-d. la tristesse et la joie) est fortement liée au fait que l'histogramme affiché visualisent des données sur la production locale d'énergie

solaire qui est liée à une condition météorologique c.-à-d. l'ensoleillement (**P2** : «*Le seul moyen d'être en contact avec l'extérieur dans un bureau, c'est de regarder par la fenêtre. Avec le prototype, on avait un autre contact avec l'extérieur.*»).

- **C5** : le bruit des artefacts attirait l'attention avant la lumière ou le mouvement. Au début et à la fin de l'expérimentation, les six participants déclarent qu'ils étaient toujours en mesure de percevoir l'artefact de leur bureau. Les participants déclarent que le bruit généré par les artefacts lorsqu'ils annonçaient une variation EnR attirait leur attention avant la lumière ou le mouvement (**P3** : «*Le bruit, la lumière puis le mouvement attirait mon attention sur le prototype. Le mouvement, je le percevais seulement lorsqu'il y avait de grands changements.*», **P6** : «*Le bruit puis la lumière attirait mon attention sur le prototype.*»). Le bruit a rendu difficile pour les deux artefacts de mobiliser l'attention périphérique des participants. Pour autant, les participants déclarent que les artefacts n'étaient pas dérangeants au quotidien (p. ex., **P2** : «*Le bruit ne me dérangeait pas.*», **P3** : «*Le bruit était intéressant car il était discret et ne me dérangeait pas dans mon travail.*»). Cependant, le bruit a distrait certains participants (p. ex., **P3** : «*Le bruit était une source de distraction positive car il me permettait de déplacer mes yeux quelques instants de l'écran de l'ordinateur portable.*»).
- **C6** : des interactions sociales pour comprendre les artefacts et la pratique. Plusieurs participants déclarent qu'il y a eu des discussions au bureau autour des artefacts et de la pratique (p. ex., **P4** : «*Le prototype a créé des discussions autour du prototype lui-même mais surtout de la pratique. On blaguait sur le fait de blanchir une barre [pour CairnSCREEN].*», **P6** : «*Au début c'était compliqué de comprendre quand est-ce qu'il fallait (dé)brancher l'ordinateur portable. Après quelques semaines d'utilisation [de CairnSCREEN] et de discussions avec les collègues de bureau, j'ai compris.*»).
- **C7** : une pédagogie amenée par les artefacts. Un participant affirme que les artefacts étaient originaux pour comprendre l'intermittence des sources de production d'énergie renouvelable (**P6** : «*Innovant pour comprendre comment fonctionne la génération d'énergie renouvelable. C'est une façon d'enseigner aux gens qu'il y a des moments où l'énergie est plus propre.*»). Un autre participant a apprécié le fait que les artefacts servent de rappel écologique (**P4** : «*J'ai bien aimé que le prototype nous rappelle qu'on peut tous contribuer à être plus écologiques.*»).
- **C8** : une représentation tangible dynamique plus fascinante que la représentation graphique dynamique. Un participant de CairnFORM déclare qu'il ne pouvait pas s'empêcher de regarder les animations de CairnFORM jusqu'à la fin (**P2** : «*Lorsque les prévisions se mettent à jour, je ne peux pas m'empêcher de regarder l'animation jusqu'à la fin.*»). Un participant de CairnFORM regrette qu'il n'y ai pas eu plus d'animations (**P3** : «*J'ai bien aimé le prototype car il occupe l'espace et mets de la présence. Cependant, il n'était pas assez dynamique.*»). Aucun participant n'a déclaré la même chose pour CairnSCREEN.
- **C9** : des participants motivés par les artefacts au début puis par la pratique à la

fin. Les participants déclarent qu'utiliser le prototype était ce qui les motivait à adopter la pratique au début de l'expérimentation (p. ex., **P2** : «*Au début de l'expérimentation, c'était le prototype qui me motivait. Je voulais voir comment est-ce qu'il changeait si je charge ma batterie.*», **P3** : «*Au début de l'expérimentation, c'était la nouveauté du prototype qui me motivait [à adopter la pratique]*»). À la fin de l'expérimentation, les participants déclarent qu'effectuer la pratique en elle-même était ce qui les motivait (p. ex., **P6** : «*Ce qui me motivait pendant l'expérimentation c'était principalement le prototype surtout au début et la pratique à la fin.*», **P2** : «*À la fin de l'expérimentation, la pratique est devenue un réflexe, un automatisme.*»).

C10 : des problèmes de fiabilité des prévisions et de crédibilité des artefacts. Pendant l'expérimentation, il y a eu des problèmes de fiabilité des prévisions EnR. Il est arrivé que les artefacts annoncent aux participants l'arrivée d'une variation EnR et que, pendant la variation EnR, les prévisions EnR se mettent à jour et décalent l'heure du pic EnR. Par exemple, supposons qu'à 10h, les artefacts annoncent une variation EnR de 10h à 15h avec un pic EnR à 14h. On imagine qu'un participant a déchargé sa batterie à 50% de 10h à 12h avant d'aller manger avec l'objectif de charger la batterie à 14h après avoir mangé. Cependant à 12h30, les prévisions EnR sont mises à jour et le pic EnR est finalement annoncé pour 13h. Lorsque le participant revient à 14h pour charger sa batterie, il se rend compte que le pic n'est plus à 14h mais à 13h. Le participant n'a d'autre choix que de charger sa batterie pendant la phase descendante, voire le creux de la variation EnR, ce qui engendre une mauvaise pratique. Cette situation est arrivée plusieurs fois aux participants et a, sans aucun doute, impacté les résultats sur l'accomplissement de la pratique (**P5** : «*Des fois, les prévisions se sont mises à jour alors que j'avais déjà commencé à décharger ma batterie.*», **P2** : «*Lorsque les prévisions se mettaient à jour, je ne savais pas quoi faire.*», **P6** : «*C'était difficile de savoir ce qu'il fallait faire lorsque les prévisions changeaient.*», **P1** : «*Les changements de prévisions annulaient la pratique. Quand les prévisions arrivaient le midi alors qu'on était parti manger, c'était trop tard.*»). En plus d'impacter l'accomplissement de la pratique, ces situations ont engendré une perte de crédibilité des artefacts (**P5** : «*Des fois, je regardais la météo avant de venir et je savais qu'il [l'artefact] allait changer dans la journée. Je commençais à décharger avant que le prototype n'affiche des prévisions.*», **P3** : «*Quand le ciel était bleu et que le prototype était ouvert, je branchais. Quand les nuages arrivaient, je débranchais mon ordinateur portable en prévision de la mise à jour du prototype.*»). On note que cette observation est propre aux données sur l'ensoleillement et ne se produirait pas pour des données sur d'autres sources d'énergie renouvelable telle que le vent.

4.3.10 Discussion

Dans les paragraphes suivants, nous interprétons les résultats obtenus pour valider ou invalider les hypothèses émises (**H1**, **H2**, **H3** et **H4**) et répondre à la question de

recherche Q3.

Au début de l'expérimentation, des participants motivés extrinsèquement par l'utilisation des artefacts. À la fin de l'expérimentation, des participants motivés intrinsèquement par une pratique pertinente, simple et alignée sur leurs valeurs pro-environnementales. Le score donné par les participants aux valeurs du NEP indiquent que les participants exprimaient des valeurs pro-environnementales fortes et similaires avant et après l'expérimentation et que les artefacts n'ont pas influencé ces valeurs. Aussi, les retours oraux et écrits des participants indiquent qu'ils ont trouvé la pratique pertinente, simple et qu'ils ont tenté d'appliquer les consignes à chaque fois qu'ils étaient au bureau et que les artefacts annonçaient une variation EnR. En conséquence, après le déploiement des artefacts pour les journées de travail avec une variation(s) EnR, on observe un plus grand nombre de charges, un plus grand nombre de charges décalées, de plus grandes profondeurs de charges décalées et une plus grande économie d'EnNR des charges décalées. Les retours oraux et écrits indiquent qu'au début de l'expérimentation l'utilisation des nouveaux artefacts était le facteur qui motivait les participants pour appliquer les consignes (c.-à-d. motivation extrinsèque de l'effet de nouveauté). Certains participants déclarent qu'ils voulaient voir comment les artefacts allaient réagir s'ils se (dé)chargeaient (**H1** validée). À la fin de l'expérimentation, les participants déclarent que c'était la pratique elle-même (devenue par ailleurs un automatisme pour certains) qui les motivait à appliquer les consignes (c.-à-d. motivation intrinsèque) et non plus l'utilisation des nouveaux artefacts (c.-à-d. motivation extrinsèque) (**H2** validée). Il semblerait que 2 mois de déploiement ait été suffisant pour que la motivation intrinsèque des participants à effectuer la pratique prennent le dessus sur leur motivation extrinsèque à utiliser CairnFORM et CairnSCREEN au-delà de l'effet de nouveauté [163]. Ces résultats suggèrent que les participants ont effectué la pratique, dans un premier temps, car qu'ils étaient extrinsèquement motivés par l'utilisation des nouveaux artefacts puis, dans un second temps, car ils étaient intrinsèquement motivés par une pratique pertinente, simple et alignée sur leurs valeurs pro-environnementales.

Une qualité pragmatique identique sur la durée mais une qualité hédonique supérieure sur la durée pour la représentation tangible dynamique par rapport à la représentation graphique dynamique. Les réponses à UEQ-S indiquent que les participants ont considéré CairnFORM et CairnSCREEN comme plus pragmatiques à la fin qu'au début de l'expérimentation : une conséquence de l'effet d'expérience/apprentissage. En effet, les retours oraux et écrits des participants indiquent qu'ils ont rencontré des difficultés pour comprendre les artefacts au début de l'expérimentation. À la fin de l'expérimentation, ces difficultés ont disparu après plusieurs interactions sociales entre les participants. Les réponses à UEQ-S indiquent également que les participants ont considéré CairnFORM et CairnSCREEN comme aussi pragmatiques l'un que l'autre à la fin de l'expérimentation. On note que les artefacts ont tout deux amélioré les performances des participants pour le décalage du chargement de batterie. En effet, on observe que les charges décalées économisaient plus d'EnNR

après l'introduction des deux artefacts. Aussi, une charge décalée par un participant de CairnFORM économisait plus d'EnNR qu'une charge décalée par un participant de CairnSCREEN avant l'introduction des artefacts. Cependant, cette différence ne s'est ni accentuée ni atténuée après l'introduction des artefacts. Par conséquent, CairnFORM n'a plus amélioré les performances des participants que CairnSCREEN (**H3** non validée). On note que la qualité pragmatique des deux artefacts et les performances des participants ont souffert du manque de fiabilité des prévisions comme en témoigne les retours oraux et écrits des participants (c.-à-d. il y a eu des mauvaises pratiques effectuées lorsque les prévisions se mettaient à jour entraînant une perte de crédibilité des artefacts).

Les résultats sont différents concernant la qualité hédonique de CairnFORM et CairnSCREEN. En effet, les réponses à UEQ-S indiquent que les participants ont considéré CairnFORM comme plus hédonique que CairnSCREEN au début et à la fin de l'expérimentation. Aussi, les participants ont considéré CairnSCREEN comme moins hédonique à la fin qu'au début de l'expérimentation alors que les participants ont considéré CairnFORM comme aussi hédonique à la fin qu'au début de l'expérimentation. Certains participants déclarent qu'ils ne pouvaient pas s'empêcher de regarder les transformations de CairnFORM jusqu'à la fin et qu'ils regrettaient qu'il n'y en ai pas eu plus. Aucun utilisateur de CairnSCREEN n'a déclaré cela. Ces résultats indiquent qu'un artefact utilisant la représentation tangible dynamique possède une qualité hédonique supérieure sur la durée à un artefact utilisant la représentation graphique dynamique (**H4** validée). Aussi, il semblerait qu'un artefact utilisant la représentation tangible dynamique conserve sa qualité hédonique initiale plus long temps qu'un artefact utilisant la représentation graphique dynamique (sur au moins 2 mois).

Réponse à la question de recherche. **H1**, **H2** et **H4** sont validées mais **H3** n'est pas validée. Au-delà de l'effet de nouveauté, ces résultats suggèrent qu'afficher un histogramme vertical avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution véhicule une expérience utilisateur supérieure à un afficheur planaire en termes de qualité hédonique plutôt qu'en termes de qualité pragmatique. Cette différence de qualité hédonique sur la durée peut s'expliquer par l'aspect fascinant de la symétrie dynamique de révolution. Il y a une expressivité accrue sur au moins 2 mois de la représentation tangible dynamique par rapport à la représentation graphique dynamique.

Deuxième partie

Cas d'usage : la gestion de la demande en énergie

Chapitre 5

Problématique

Ce chapitre motive le cas d’usage étudié pour les afficheurs sur les espaces collectifs et publics. Aujourd’hui, le monde fait face à une crise écologique et sociale. Face à cette crise, le développement durable est l’objectif à atteindre. Le secteur de l’énergie est un acteur majeur du développement durable et cherche à passer d’un système dépendant de sources d’énergie à stock épuisable généralement polluantes (c.-à-d. énergies non-renouvelables p. ex., pétrole, le charbon ou le gaz) à des sources d’énergie à flux inépuisable généralement propres (c.-à-d. énergies renouvelables p. ex., le rayonnement solaire, le vent ou la marée). Cependant, cette transition énergétique est lente et est en partie la conséquence d’une difficulté à intégrer massivement les énergies renouvelables aux réseaux électriques traditionnels. La production décentralisée et intermittente des sources d’énergie renouvelable en est la cause. Afin de faciliter l’intégration des énergies renouvelables, les réseaux électriques intelligents émergent. Le stockage d’énergie est la pierre angulaire des réseaux électriques intelligents. Pour autant, les technologies actuelles de stockage de l’énergie sont économiquement et environnementalement coûteuses ce qui freine le développement de cette nouvelle génération de réseaux électriques. En parallèle de ce lent changement des réseaux électriques, des organisations appellent les citoyens à devenir des acteurs de la transition énergétique. 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.

5.1 Crise écologique et sociale

Aujourd’hui, le monde fait face à une crise écologique et sociale, conséquence d’une prise en compte insuffisante de l’environnement dans les activités humaines depuis la révolution industrielle et rendue visible aujourd’hui par plusieurs phénomènes tels que l’augmentation de la population (augmentation de 406% de la population mondiale de 1900 à 2000), la raréfaction des ressources (épuisement des réserves mondiales de pétrole, de gaz naturel, de charbon et d’uranium dans moins de 150 ans [154]), la déforestation (2,27 millions km² de forêts tropicales ont disparu de 1950 à 2010 soit plus de 3 fois la superficie de la France [1]) et le réchauffement climatique (niveau de CO₂ record dans

l'atmosphère en 650 000 ans et cela depuis 1950, augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre de 0,9 ° depuis 1880, perte de 57% de la banquise arctique de 1980 à 2010 (figure 5.1), montée du niveau des eaux de $88 \pm 4\text{mm}$ depuis 1993 [100]).

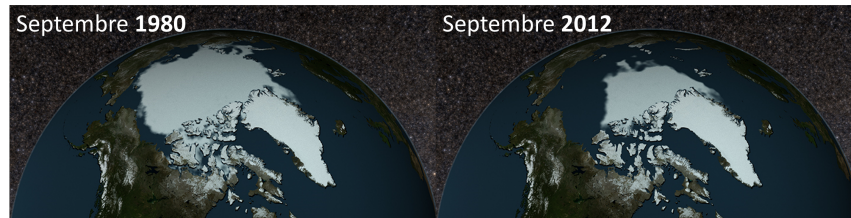


FIGURE 5.1 – Le réchauffement climatique a fait perdre plus de la moitié de la banquise arctique de 1980 à 2010 [100].

5.2 Développement durable

Face à cette crise écologique et sociale, le développement durable est l'objectif à atteindre. En 1987, la commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'organisation des Nations Unies (ONU), présidée par la norvégienne Gro Harlem Brundtland, définit le développement durable comme le développement qui subvient aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins [193]. Le développement durable doit être à la fois économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement tolérable (figure 5.2). Le social doit être un objectif, l'économie un moyen et l'environnement une condition. La totalité des secteurs économiques sont concernés par le développement durable : le secteur primaire qui concerne la collecte et l'exploitation de ressources naturelles (l'agriculture, la pêche, l'exploitation forestière, l'exploitation minière, etc.) ; le secteur secondaire qui implique les industries de transformation des matières premières (l'énergétique, l'industrie du bois, l'aéronautique, l'électronique, etc.) ; le secteur tertiaire regroupe les industries du service (le conseil, l'assurance, l'enseignement, le tourisme, etc.).

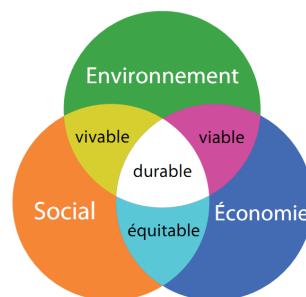


FIGURE 5.2 – Le schéma des trois piliers du développement durable présenté et diffusé par Alain Villainv (géologue, conseiller scientifique au conseil régional Nord-pas de calais) lors d'une réunion sur le développement durable à la communauté urbaine de Lille (France) en 1993.

5.3 Secteur de l'énergie

Le secteur de l'énergie est un acteur majeur du développement durable depuis les premières crises énergétiques des années 1970. En 1973, 86,7% de l'approvisionnement mondial en énergie provenait des combustibles fossiles que sont le pétrole, le charbon et le gaz (figure 5.3). À l'arrivée du premier choc pétrolier en 1973, le monde a fait l'expérience d'une pénurie de pétrole, la source d'énergie principale de son économie [5].

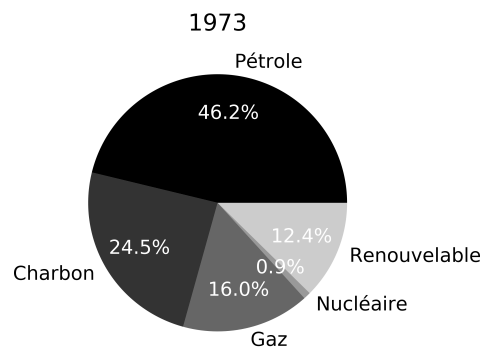


FIGURE 5.3 – L'approvisionnement mondial en énergie en 1973 [90].

Outre l'épuisement inéluctable des réserves finies de combustibles fossiles [127], l'exploitation et l'utilisation de ces combustibles émettent des gaz à effet de serre notamment du CO_2 dont le cumul depuis la révolution industrielle (figure 5.4) est à l'origine du réchauffement climatique [38].

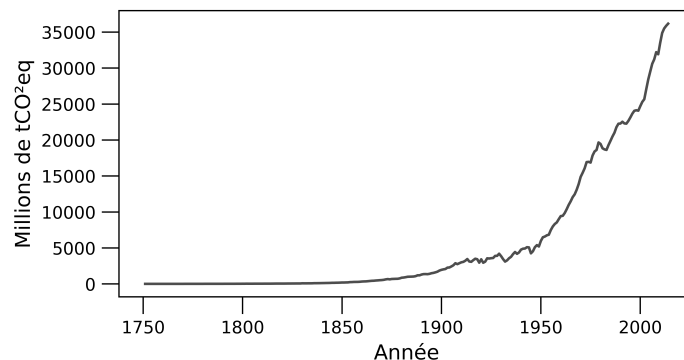


FIGURE 5.4 – Les millions de tonnes équivalent CO_2 relâchées dans l'atmosphère par la consommation de combustibles fossiles et la production de ciment entre 1751 et 2014 [173].

Depuis les chocs pétroliers de 1973 et de 1979, le secteur de l'énergie se tourne vers deux énergies alternatives à l'énergie fossile : les énergies renouvelables et les énergies nucléaires.

5.3.1 Énergies renouvelables

Les *Énergies Non Renouvelables (EnNRs)* sont des sources d'énergie primaire à stock épuisable comme le pétrole, le charbon ou le gaz. Au contraire, les *Énergies Renouvelables (EnRs)* (figure 5.5) sont des sources d'énergie primaire à flux inépuisable comme le rayonnement solaire, le vent ou la marée. Les EnRs incluent l'énergie solaire (figure 5.5a), l'énergie éolienne (figure 5.5b), l'énergie hydraulique (figure 5.5c) ou encore l'énergie de biomasse. Les énergies renouvelables sont généralement considérées comme des énergies propres mais cela est contestable notamment pour l'énergie de biomasse à l'heure actuelle [47]. Les *énergies propres ou vertes* sont des sources d'énergie primaire qui produisent une quantité faible de polluants lorsqu'elle est transformée en énergie finale puis utilisée comme telle.



(a) Une ferme photovoltaïque.



(b) Un parc éolien.

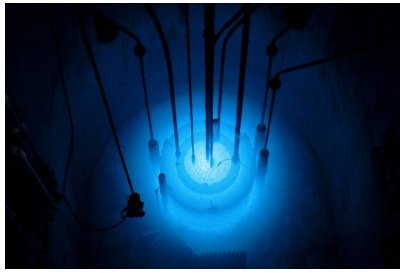


(c) Une centrale hydraulique.

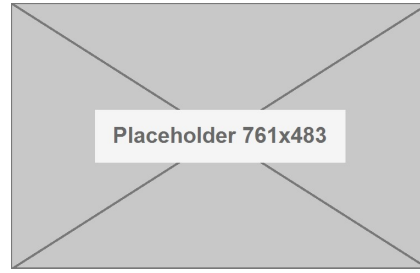
FIGURE 5.5 – Trois moyens de production d'énergie renouvelable.

5.3.2 Énergies nucléaires

Les *énergies nucléaires* (figure 5.6) incluent l'énergie de fission nucléaire (figure 5.6a) et l'énergie de fusion nucléaire (figure 5.6b). La fission nucléaire est le seul moyen de production d'énergie nucléaire civile maîtrisé à ce jour. L'énergie de fission nucléaire est non renouvelable et non propre. Elle exploite des sources d'énergie à stock épuisable comme l'uranium et le plutonium et produit des déchets radioactifs. On note cependant que cette énergie émet très peu de gaz à effet de serre. La fusion nucléaire, quant à elle, n'est pas maîtrisée à ce jour. Néanmoins, les progrès attendus avec le réacteur expérimental à fusion nucléaire par confinement magnétique ITER [56] promettent une énergie nucléaire considérablement plus efficace et propre à produire.



(a) Un réacteur à fission nucléaire.



(b) Un réacteur à fusion nucléaire¹.

FIGURE 5.6 – Deux moyens de production d'énergie nucléaire.

5.4 Transition énergétique

Aujourd'hui, les énergies renouvelables font parties du paysage énergétique mondial et forment avec l'énergie fossile et l'énergie nucléaire le mix énergétique : en 2015, l'approvisionnement mondiale en énergie était à 13,7% de l'énergie renouvelable, 4,9% de l'énergie nucléaire et à 81,4% de l'énergie fossile. La part de l'énergie renouvelable dans le mix énergétique a gagné 1,3% en 40 ans (figure 5.7).

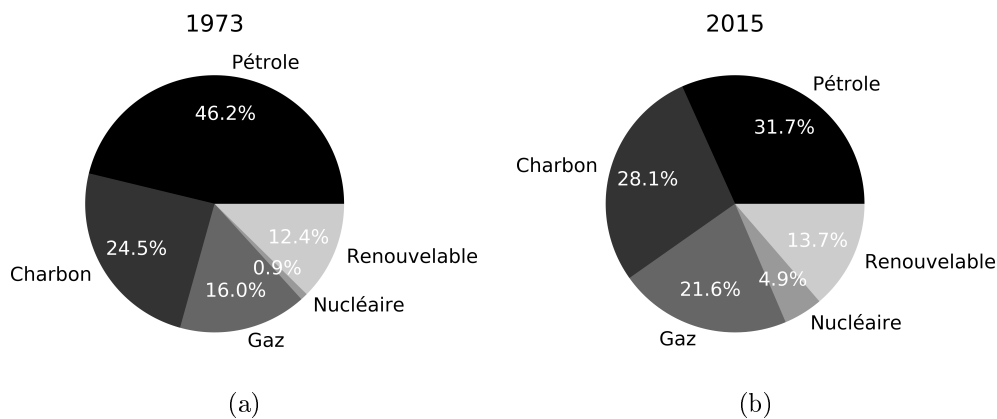


FIGURE 5.7 – L'approvisionnement mondial en énergie en 1973 et 2015 [90].

Afin d'accélérer la transition énergétique, l'Union Européenne s'est engagée en 2012 à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 40% de réduction d'ici à 2030, de 60% d'ici à 2040 et de 80% d'ici à 2050 [55]. Pour l'UE, le secteur de l'électricité présente le plus grand potentiel de réduction des émissions. Ce secteur pourrait presque totalement éliminer ses émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050. L'électricité pourrait en partie remplacer les combustibles fossiles dans les transports et les systèmes de chauffage. L'électricité sera

1. Illustration du réacteur expérimental à fusion nucléaire par confinement magnétique ITER [56]

produite à partir de sources EnR ou d'autres sources d'énergie à faibles émissions, comme les centrales nucléaires ou les centrales à combustibles fossiles équipées de technologies de captage et de stockage du carbone. Cependant, des investissements importants devront être réalisés pour changer les réseaux électriques en profondeur.

5.5 Problème de la production décentralisée et intermittente des énergies renouvelables

La lente transition énergétique est en partie la conséquence d'une difficulté à intégrer massivement les EnR aux réseaux électriques traditionnels. La production décentralisée et intermittente des EnRs en est la cause. Une production décentralisée conduit à un fonctionnement bidirectionnel des réseaux traditionnels conçus pour n'acheminer l'énergie que dans un sens. Une production intermittente peut être prise en charge par les réseaux traditionnels pour des taux de pénétration inférieurs à 10%. En revanche, lorsque le taux de pénétration dépasse cette valeur, des déséquilibres tel que des pannes de courant peuvent survenir [31]. Les limites des réseaux électriques traditionnels compromettent la feuille de route fixée par l'UE à l'horizon 2050. Il est aujourd'hui nécessaire de changer en profondeur l'immense infrastructure du réseau électrique européen (figure 5.8) qui est resté inchangé depuis plus d'un siècle.



FIGURE 5.8 – Le réseau électrique européen observé depuis l'espace par la NASA, le 2 avril 2009.

5.6 Solution des réseaux électriques intelligents

Afin de faciliter l'intégration des EnRs, les *réseaux électriques intelligents* (*SmartGrids*) émergent. D'après la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE) [30], cette nouvelle génération de réseaux électriques intègre les nouvelles technologies de l'information et de la communication pour améliorer l'observabilité, la prévisibilité, le pilotage et la flexibilité du réseau électrique afin de mieux gérer l'intermittence des énergies renouvelables (figure 5.9).

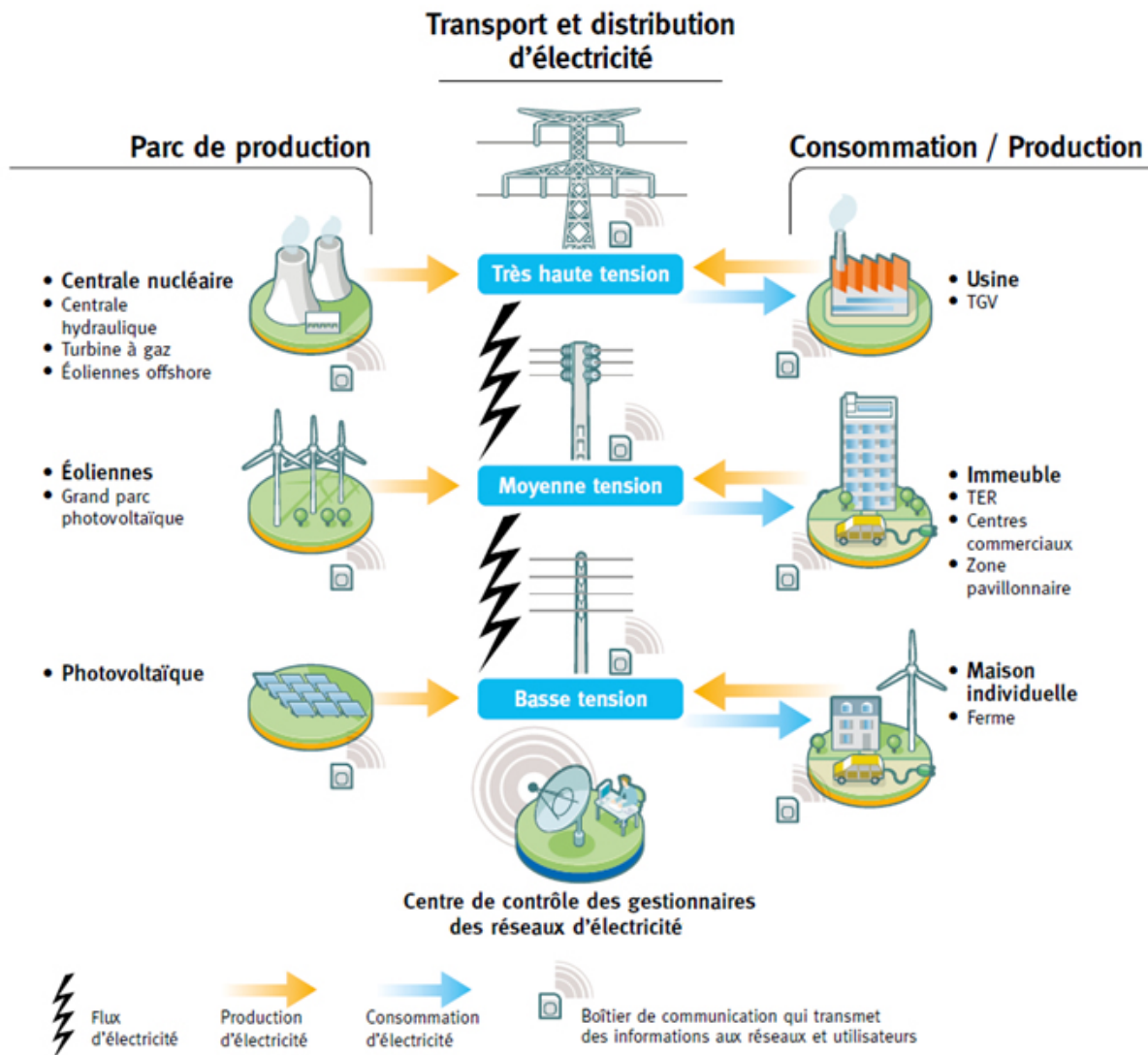


FIGURE 5.9 – L'illustration d'un réseau électrique intelligent par la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE) [30].

Les micro-réseaux électriques intelligents sont des réseaux électriques intelligents de petite taille, conçus pour fournir un approvisionnement électrique fiable et de meilleure qualité à un petit nombre de consommateurs. Ils agrègent de multiples installations de production locales et diffuses (micro-turbines, piles à combustible, petits générateurs diesel, panneaux photovoltaïques, mini-éoliennes, petites centrales hydrauliques), des installations de consommation, des installations de stockage et des outils de supervision et de gestion de la demande [32] (figure 5.10).

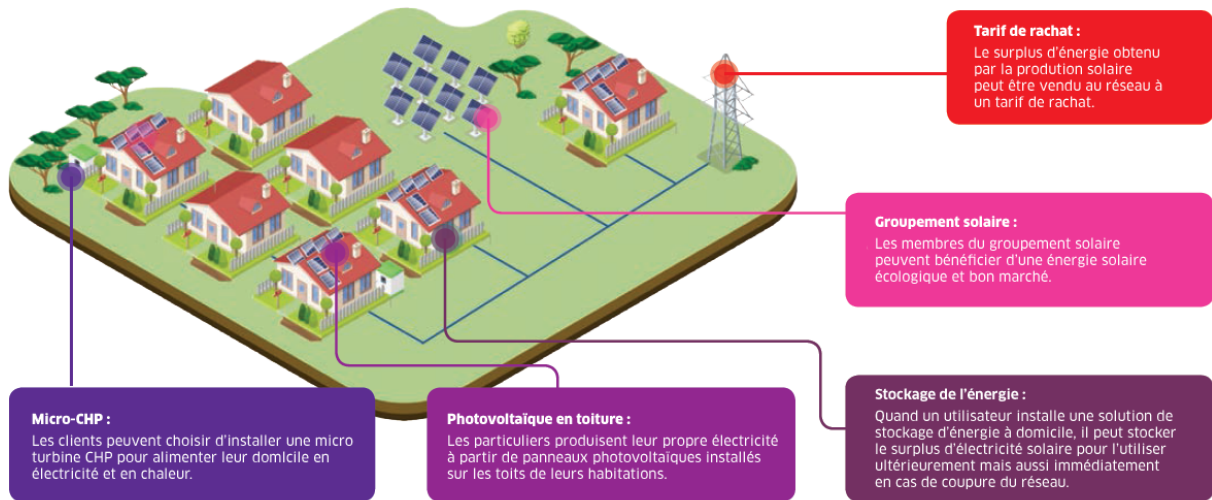


FIGURE 5.10 – L'illustration d'un micro-réseau électrique intelligent par le groupe industrielle énergétique ENGIE [50].

5.7 Verrou technologique du stockage d'énergie

Le stockage d'énergie est la pierre angulaire des (micro-)réseaux électriques intelligents. Les technologies de stockage de l'énergie telles que les batteries permettent de stocker l'excès de production EnR et de restituer cette énergie lorsque la production EnR est manquante [46] (figure 5.11).

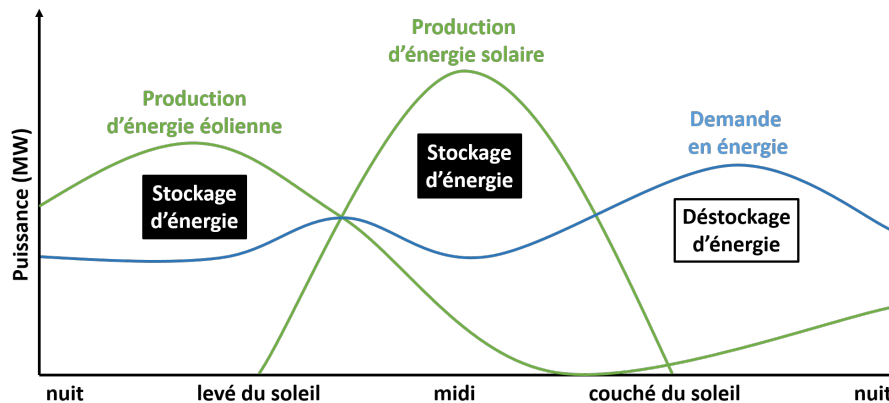


FIGURE 5.11 – L'utilisation du stockage d'énergie pour mitiger l'intermittence de la production d'énergie renouvelable.

Pour autant, les technologies actuelles de stockage de l'énergie sont économiquement et environnementalement coûteuses ce qui freine le développement des (micro-)réseaux électriques intelligents [121]. Développer des technologies de stockage d'énergie à faible coût économique et écologique reste un défi majeur pour le secteur de l'énergie.

5.8 Promouvoir efficacité, sobriété et propreté énergétique

En parallèle de ce lent changement de l'infrastructure des réseaux électriques, plusieurs entités, notamment l'association NègaWatt, appellent les citoyens à s'engager dans la transition énergétique qui ne se limite pas seulement à une transition vers les énergies renouvelables. NègaWatt est une association française dirigée par un collège de membres actifs qui rassemble une vingtaine d'experts impliqués dans des activités professionnelles liées à l'énergie. Ils proposent un scénario de transition énergétique pour la période de 2017 à 2050 sur trois axes [135] (figure 5.12) :

- *Efficacité énergétique*. Diminuer la quantité d'énergie nécessaire à la satisfaction d'un même besoin grâce à l'efficacité énergétique (isoler les bâtiments, améliorer le rendement des appareils électriques ou des véhicules, etc.).
- *Sobriété énergétique*. Prioriser les besoins essentiels dans les usages individuels et collectifs de l'énergie par des actions de sobriété énergétique (éteindre les vitrines et les bureaux inoccupés la nuit, contenir l'étalement urbain, réduire les emballages, etc.).
- *Propreté énergétique*². Privilégier les énergies propres et renouvelables pour leur faible impact sur l'environnement et leur caractère inépuisable (installer des panneaux photovoltaïques sur le toit des bâtiments, lancer le lave-vaisselle pendant un pic de production locale d'énergie renouvelable, etc.).

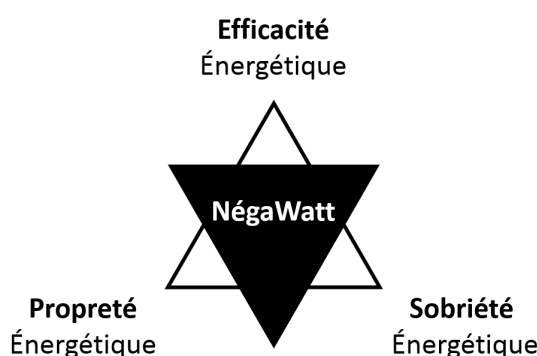


FIGURE 5.12 – Une illustration du triptyque proposé par NègaWatt [135].

2. Nous utilisons le terme «Propreté Énergétique» pour désigner le terme «Privilégier les énergies renouvelables» proposé par NègaWatt.

5.9 Systèmes interactifs pour la sobriété et propreté énergétique

L'IHM a un rôle à jouer dans le développement durable. En 2007, Blevis [15] constate que l'IHM a tendance à considérer principalement les besoins et les exigences de l'utilisateur au détriment de ceux de l'environnement. Suite à ce constat, Blevis présente alors l'IHM durable comme l'IHM qui considère dans sa conception à la fois les besoins et les exigences de l'utilisateur et ceux de l'environnement. En 2007 également, Mankoff et al. [124] prolongent cette définition de l'IHM durable en deux catégories distinctes (figure 5.13) : le développement durable *dans* la conception, qui cherche à réduire les impacts environnementaux des logiciels et des matériels et le développement durable *par* la conception, qui cherche à promouvoir les prises de décisions et les styles de vie pro-environnementaux. Nous nous intéressons au développement durable *par* la conception.

Dans le contexte de la maîtrise de l'énergie, la discipline de l'Interaction Homme-Machine a un rôle à jouer sur les trois axes du scénario Négawatt. En effet, elle peut chercher à améliorer l'efficacité énergétique de ses systèmes interactifs et également promouvoir la sobriété et la propreté énergétique au travers de ses systèmes interactifs. Dans cette thèse, nous nous intéressons à la problématique de l'utilisation des systèmes interactifs pour promouvoir la sobriété et la propreté énergétique.

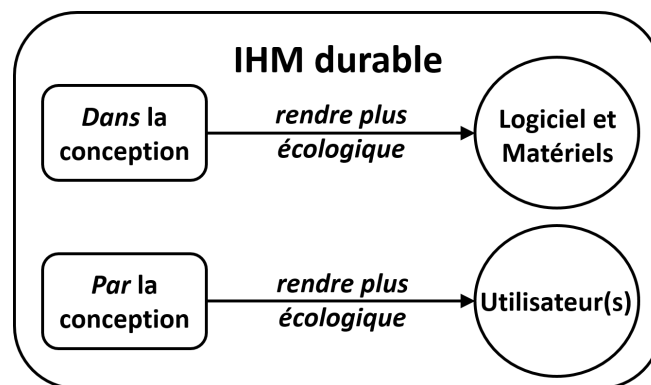


FIGURE 5.13 – Les deux catégories de l'IHM durable [124].

Chapitre 6

Domaines de recherche

Ce chapitre décrit les domaines de recherche de l'Interaction Homme-Machine qui traitent des systèmes interactifs pour la sobriété et la propreté énergétique. En 2010, Disalvo et al. [42] remarquent que les systèmes interactifs pour la sobriété et la propreté énergétique sont principalement issus de deux domaines de recherche : la *Persuasion Technologique* et la *Conscientisation Ambiante*. Outre ces deux domaines, nous avons identifié les domaines de la *Ludification*, de l'*Interaction Homme-Énergie* et, plus récemment, de l'*Eco-Interaction* (incluant *Eco-Feedback* et *Eco-Feedforward*). Nous appellerons un *Système Interactif et Persuasif (SIP)* tout système interactif issu de la *Persuasion Technologique* et de ses intersections avec les autres domaines identifiés.

6.1 Persuasion Technologique

Fogg [62, 63] définit la *Persuasion Technologique* comme la tentative de changer des attitudes ou des comportements avec des systèmes interactifs, mais qui n'utilise pas la tromperie ou la coercition (c.-à-d. action de contraindre à agir ou à ne pas agir). Dès 1998, Fogg [62, 63] définit les *Technologies Persuasives* comme des systèmes interactifs intentionnellement conçus pour aider à changer les attitudes ou les comportements (c.-à-d. «changer ce que les individus pensent et font»). Un exemple de ces SIPs est EnergyWiz [141](figure 6.1).

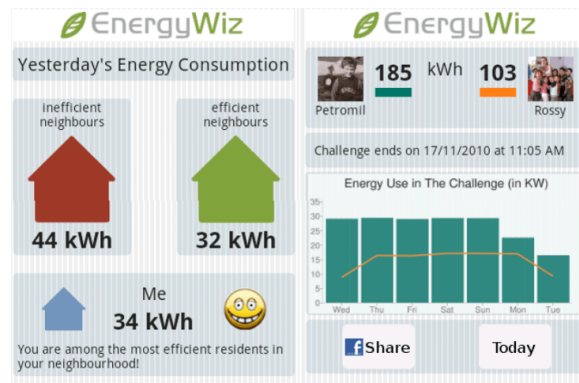


FIGURE 6.1 – EnergyWiz [141], un SIP pour la sobriété énergétique utilisant une interface graphique mobile pour informer l’habitant de la consommation d’énergie passée et présente du bâtiment.

6.2 Conscientisation Ambiante

La *Conscientisation Ambiante* peut être définie comme la capacité à être sensible à ce qui nous environne [192]. En 1996, Weiser et Brown [188] évoquent pour la première fois cette capacité sous le nom de *conscientisation périphérique* dans leur définition de la *technologie calme*. Ils définissent une technologie calme comme un système capable de voyager entre la périphérie et le centre de l’attention de l’utilisateur. Ils affirment que la technologie calme augmente la conscientisation périphérique en amenant plus de détails dans l’espace environnant de l’utilisateur et permet à ce dernier de savoir ce qu’il se passe, ce qu’il s’est passé et ce qui va se passer autour de lui. En 1998, dans la lignée des technologies calmes, Wisneski et al. [192] définissent les *Afficheurs Ambiants* comme des afficheurs capables de voyager entre la périphérie et le centre de l’attention de l’utilisateur et qui représentent calmement les changements de l’information sous forme de phénomènes perceptibles par l’homme (p. ex., forme, mouvement, son, couleur, odeur, température, lumière). Ces systèmes se concentrent sur des représentations de l’information esthétiques, plaisantes et intégrées à l’environnement et aux objets qui nous entourent [146]. Les recherches réalisées dans ce domaine sont souvent associées à la persuasion technologique. Certains articles évoquent le terme de *Persuasion Technologique Ambiante* pour décrire cette intersection et indiquent que les systèmes interactifs résultants sont capables d’exercer une influence sur les individus sans nécessiter leur attention centrale [76]. Un exemple de ces SIPs est Watt-I-See [148](figure 6.2).

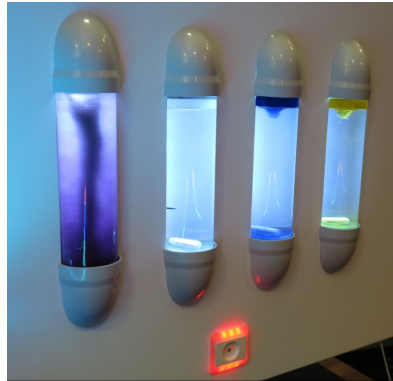


FIGURE 6.2 – Watt-I-See [148], un SIP pour la propreté énergétique utilisant un afficheur ambiant fixe sur un lieu public pour informer les citoyens du mix énergétique actuel.

6.3 Ludification

D'après les résultats de Hamari et al. [77] en 2014, la persuasion technologique semble s'associer de plus en plus à la *Ludification* (ou encore *Gamification*, qui est l'application des mécanismes de jeu à des contextes non ludiques [40]). Cette coopération semble créer une synergie qui tend à améliorer la capacité de persuasion des systèmes interactifs résultants. En 2015, Negri et Senach [134] baptisent ces systèmes interactifs comme des *Systèmes Ludo-Persuasifs (SLP)* intentionnellement conçus pour influencer les attitudes ou les comportements de manière plaisante (sans utiliser la tromperie ou la coercition). Un exemple de ces SIPs est EnergyDub [52](figure 6.3).

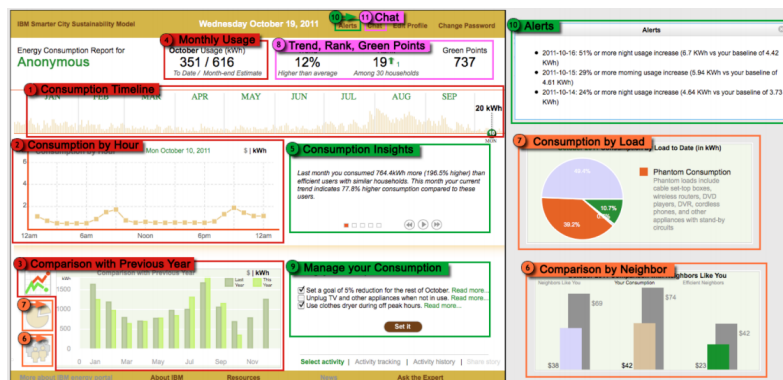


FIGURE 6.3 – EnergyDub [8], un SIP pour la sobriété énergétique utilisant une interface graphique fixe pour informer l'habitant de la consommation d'énergie passée et présente du bâtiment. EnergyDub implémente des mécanismes de jeu (points, classement, etc.).

6.4 Interaction Homme-Énergie

Dans le contexte particulier qu'est la gestion de la demande en énergie, certains travaux évoquent les phénomènes d'*intangibilité* et d'*invisibilité* liés à l'énergie qui ont pour conséquence d'éloigner les citoyens de l'énergie. En 2010 notamment, Pierce et Paulos [143] évoquent ces phénomènes et proposent un cadre de conception dédié à la matérialisation de l'énergie avec pour objectif d'enrichir les interactions Homme-Énergie et ainsi rendre l'énergie *tangible*¹ et *visible* pour rapprocher les citoyens de l'énergie. Ce cadre de conception est composé de quatre fonctions de matérialisation de l'énergie :

- collecte (générer/produire de l'énergie) ;
- possession (stocker/maintenir de l'énergie) ;
- partage (transmettre/distribuer de l'énergie) ;
- activation (utiliser/consommer de l'énergie).

Les SIPs peuvent intégrer certaines, voire la totalité de ces fonctions. Un exemple de ces SIPs est Share AWARE Light [20](figure 6.4).



FIGURE 6.4 – Share AWARE Light [20], un SIP pour la sobriété énergétique utilisant un afficheur ambiant fixe qui permet de partager de l'énergie entre habitants. Lorsque la luminosité d'une lampe de Share AWARE Light est trop augmentée, celle des autres lampes baisse.

6.5 Eco-Interaction

L'*Eco-interaction* (incluant *Eco-Feedback* et *Eco-Feedforward*) est un domaine émergent de l'IHM durable qui reconnaît les opportunités mais également les limites à utiliser la persuasion technologique. En effet, l'approche de l'IHM durable par la persuasion technologique a subi certaines critiques. En 2012, Brynjarsdóttir et al. [22] remarquent que les SIPs conçus prescrivent des comportements à adopter rarement en

1. Le terme est utilisé par les auteurs au sens du dictionnaire et n'est pas relié aux interfaces utilisateur tangibles au sens d'Ishii et Ullmer [94].

relation avec le mode de vie de l'utilisateur. Ils proposent plutôt d'utiliser les SIPs pour encourager les utilisateurs à réfléchir sur leur mode de vie pour que d'eux même ils adoptent des comportements pro-environnementaux. Brynjarsdóttir et al. [22] remarquent également que les SIPs ciblent des comportements individuels et isolés (p. ex., demander à l'individu de réduire la température du chauffage du bureau pour faire des économies d'énergie). En réalité, ces comportements sont rarement isolés mais plutôt connectés à des jeux complexes et plus larges de pratiques sociales et culturelles (p. ex., l'individu qui réduit la température du chauffage du bureau réduit potentiellement le confort de ses collègues de bureau). Globalement, les acteurs (p. ex., les chercheurs, les designers) ne devraient pas considérer les utilisateurs comme rationnels. Les comportements quotidiens viennent rarement de prises de décisions conscientes et rationnelles [22, 169]. Les citoyens ne changeront pas seulement par l'interaction avec une interface. En plus de la persuasion technologique, les systèmes interactifs issus de l'eco-interaction utilise de l'intelligence artificielle (p. ex., apprendre les habitudes des habitants) de l'automation (p. ex., baisser automatiquement le chauffage en l'absence des habitants) ou encore le contrôle à distance (p. ex., l'utilisateur démarre le lave-linge à distance à l'aide de son smartphone). Un exemple de ces SIPs est Thermostat Nest [85](figure 6.5).



FIGURE 6.5 – Thermostat Nest [85], un SIP pour la sobriété énergétique qui informe les habitants sur la consommation d'énergie passée et présente du chauffage du bâtiment. Thermostat Nest mémorise les habitudes des habitants, baisse automatiquement le chauffage en l'absence des habitants et permet un réglage à distance du thermostat à l'aide d'une application mobile.

Chapitre 7

Revue de la littérature

Ce chapitre présente une revue de la littérature des systèmes interactifs pour la propreté et la sobriété énergétique. Nous rassemblons un corpus de 67 systèmes interactifs pour la propreté et la sobriété énergétique que nous discrimons selon 5 classes, 16 critères et 73 caractéristiques. Nous identifions les tendances de conception et de mise en oeuvre des systèmes interactifs du corpus. Nous discutons de la compatibilité des différents types d'interface utilisateur pour chaque étape du modèle transthéorique du changement de comportement notamment de la place des afficheurs déployés sur les espaces collectifs ou publics.

7.1 Motivation

En 2012, Pierce et Paulos [144] réalisent un état de l'art sur les recherches en IHM en relation avec l'énergie et 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. Les auteurs soulignent que peu de travaux s'intéressent à d'autres espaces, comme le lieu de travail ou les lieux publics (cafés, parcs, écoles ou musées). En 2014, Hamari et al. réalisent un état de l'art sur la persuasion technologique [77] et un autre sur la ludification [78]. Ils extraient respectivement 52 SIPs et 24 SIPs de la littérature et 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 (accomplissement, feedback, suggestion, etc.), les effets psychologiques recherchés (engagement, motivation, conscience, etc.) et les domaines abordés (santé, écologie, etc.). En 2015, Cano et al. [24] réalisent une revue sur la persuasion technologique dédiée à la gestion de la demande en énergie. Ils extraient 10 SIPs du domaine et 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 SIPs pour la gestion de la demande en énergie diffère des revues précédentes car nous analysons la conception et la mise en œuvre des SIPs pour la sobriété et la propreté énergétique au regard de quatre composantes : le

contexte, le système (données et fonctions), l'interface et l'utilisateur.

7.2 Méthode d'identification du corpus

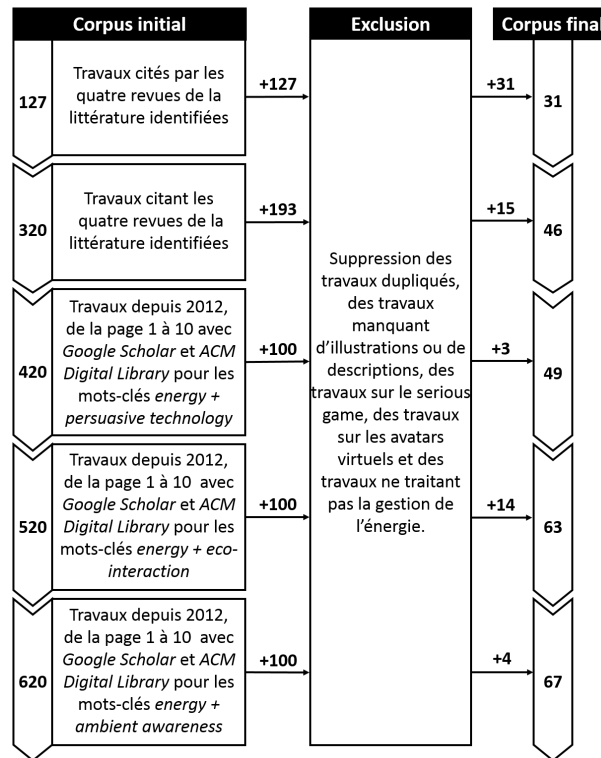


FIGURE 7.1 – Le processus d'identification du corpus.

En suivant une approche de revue systématique de la littérature [101], nous avons rassemblé un corpus de 67 SIPs pour la sobriété et la propreté énergétique. Le processus d'identification du corpus est présenté par la figure 7.1 : dans un premier temps, nous avons rassemblé les travaux citant et cités par les quatre revues de la littérature identifiées [24, 78, 77, 144]. Par la suite, nous avons utilisé *Google Scholar* et *ACM Digital Library* pour rechercher les travaux depuis 2012. Pour cela, nous avons combiné les termes *energy*, *persuasive technology*, *eco-interaction* et *ambient awareness* et parcouru les résultats de la recherche de la page 1 à la page 10. Ces recherches initiales ont rassemblé un total de 620 travaux. Parmi ces 620 travaux, nous avons conservé les travaux sur la gestion de l'énergie, supprimé les travaux dupliqués, rejeté les travaux sur le serious game et les avatars virtuels ou encore les travaux manquant de descriptions ou d'illustrations. Le corpus final comprenait 74 travaux dont sept travaux sur l'interaction homme-énergie qui n'intégraient pas un système informatique. Nous avons exclu ces derniers travaux et obtenu le corpus de 67 SIPs. Un peu moins des deux tiers des travaux (64,2% – 43/67) 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% – 24/67) 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. Le reste des travaux (4,5% – 3/67) provient de deux thèses de Master.

7.3 Critères d'analyse du corpus

En 2013, Coutaz [36] propose d'évaluer les systèmes interactifs en terme de conformité fonctionnelle (relative au *système*), conformité interactionnelle (relative à l'*interface*), conformité hédonique (relative à l'*utilisateur*) et conformité contextuelle (relative au *contexte*). Nous représentons un système interactif (persuasif) comme la composition de quatre entités interdépendantes : le *contexte*, le *système* (données et fonctions), l'*interface* et l'*utilisateur*. La figure 7.2 illustre cette composition. Pour analyser le corpus, nous avons défini 16 critères organisés en cinq classes. Chaque critère est illustré par des SIPs extraits du corpus.

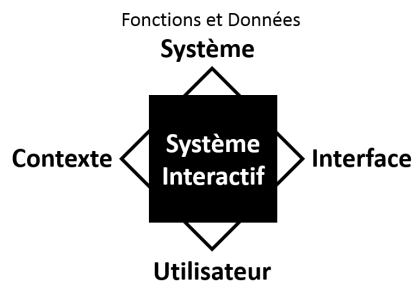


FIGURE 7.2 – Les quatre composantes d'un système interactif.

7.3.1 Contexte

Cette classe informe sur le contexte qui entoure le SIP. Nous avons défini quatre critères :

- A. La *sobriété énergétique* informe sur les stratégies de sobriété énergétique adoptées par le SIP. On distingue trois stratégies : 1) réduire ou mutualiser la consommation d'énergie (p. ex., réduire la luminosité des écrans), 2) 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 3) 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).

- B. La *propreté énergétique* informe sur les stratégies de propreté énergétique adoptées par le SIP. On distingue deux stratégies : 1) 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 2) 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).
- C. L'*espace social* informe sur l'espace social sur lequel le SIP cherche à opérer : 1) espace non spécifique, 2) espace domestique, 3) espace collectif (p. ex., lieu de travail) et espace public (p. ex., gare, métro).
- D. Le *contrôle* informe sur le contrôle des équipements par le SIP : 1) manuel (p. ex., l'utilisateur éteint la lampe manuellement lorsqu'il quitte la pièce), 2) semi-automatique (p. ex., l'utilisateur éteint la lampe à distance avec son smartphone lorsqu'il quitte la pièce) et 3) automatique (p. ex., le système domotique éteint automatiquement la lampe lorsque l'utilisateur quitte la pièce).

7.3.2 Données

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

- E. Le *type* définit la nature des données énergétiques mesurées et utilisées. Nous distinguons cinq types de données qui sont les données 1) de consommation d'énergie, 2) de production d'énergie, 3) de stockage d'énergie, 4) de distribution d'énergie et 5) d'économie d'énergie.
- F. L'*échelle temporelle* informe sur la position des données dans le temps. Nous distinguons les données 1) historiques, 2) instantanées et 3) prévisionnelles.
- G. L'*échelle spatiale* informe sur la taille des données dans l'espace. Nous distinguons les données relatives à un 1) appareil, 2) une pièce, 3) un bâtiment, 4) un voisinage, 5) une ville ou 6) un pays.

7.3.3 Fonctions

Cette classe informe sur le noyau fonctionnel des SIPs du corpus. Trois critères sont examinés :

- H. Les quatre *fonctions de matérialisation* de Pierce et Paulos [143] : 1) la collecte, 2) la possession, 3) le partage et 4) l'activation de l'énergie.
- I. Neuf *fonctions de persuasion* ont été identifiées dans le corpus et sont citées en relation avec le conditionnement opérant de Skinner [166] (c.-à-d. modèle en psychologique comportementale qui affirme que le comportement est contrôlé par ses conséquences) : 1) la prédiction (c.-à-d. projeter le comportement dans le futur pour observer ses conséquences) 2) suggestion (c.-à-d. recommander un changement

de comportement afin d'obtenir des conséquences plus souhaitables), 3) 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), 4) la simulation (c.-à-d. simuler le comportement à différents moments et endroits pour observer ses conséquences), 5) le feedback immédiat (c.-à-d. retour d'information immédiat sur les conséquences du comportement), 6) le feedback cumulé (c.-à-d. retour d'information sur les conséquences du comportement cumulées depuis une durée déterminée), 7) la comparaison temporelle (c.-à-d. comparer les conséquences du comportement à différents moments), 8) la comparaison spatiale (c.-à-d. comparer les conséquences du comportement à différents endroits), 9) la comparaison sociale (c.-à-d. comparer les conséquences du comportement avec une ou plusieurs normes sociales).

- J. Les *fonctions de ludification* se réfèrent aux mécanismes de jeu implantés dans le SIP. À partir du corpus et de l'état de l'art sur la ludification réalisé par Hamari et al. [78], nous identifions sept mécanismes de jeu différents : 1) le challenge (c.-à-d. fixer un objectif individuel ou de groupe pour une durée déterminée), 2) la compétition (c.-à-d. mettre en concurrence des individus ou des groupes sur un même objectif pendant une durée plus ou moins déterminée), 3) la collaboration (c.-à-d. permettre à deux individus ou plus de travailler ensemble pour atteindre un même objectif), 4) la progression (c.-à-d. suivre les avancements de l'individu ou du groupe vers l'objectif à atteindre), 5) l'interaction sociale (c.-à-d. permettre aux individus et aux groupes d'échanger entre eux), 6) la personnalisation (c.-à-d. s'adapter aux caractéristiques de l'individu ou du groupe), 7) l'accomplissement (c.-à-d. valoriser publiquement l'ensemble des réalisations de l'individu et du groupe) et 8) la récompense (c.-à-d. valoriser immédiatement la réalisation de l'individu et du groupe).

7.3.4 Interface

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

- K. Le *type* définit le type de l'interface utilisateur employée par le SIP. Nous dégageons trois types d'interface du corpus que sont 1) les interfaces graphiques (c.-à-d. basées pixels p. ex., smartphone, tablette, ordinateur personnel, projecteur, application web), 2) les interfaces physiques (c.-à-d. basées objets physiques p. ex., objet du quotidien revisité, objet connecté) et 3) les interfaces ambiantes (c.-à-d. basées conscientisation ambiante).
- L. La *visibilité* définit la portée de l'interface du SIP. Les interfaces employées par les SIPs du corpus sont visibles à l'échelle 1) d'un individu, 2) d'une pièce, 3) d'un bâtiment ou 4) d'une ville.

- M. L'*accessibilité* informe sur les conditions d'accès à l'interface du SIP. À partir du corpus, nous distinguons les interfaces 1) 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 2) un espace non spécifique, 3) domestique, 4) collectif ou 5) public.
- N. Le *dispositif* d'entrée/sortie informe sur le dispositif d'accueil du SIP. Nous distinguons 1) les appareils mobiles (p. ex., smartphone, tablette, PC portable), 2) les applications web, 3) les appareils de projection, 4) les objets connectés et 5) les objets du quotidien revisités.

7.3.5 Utilisateur

Cette 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 :

- O. Un utilisateur *pro-actif* doit manipuler l'interface pour accéder au noyau fonctionnel du système. Nous distinguons quatre utilisateurs différents que sont 1) l'individu, 2) le groupe, 3) la communauté et 4) la société.
- P. 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 avec l'utilisateur. Nous distinguons quatre utilisateurs différents que sont 1) l'individu, 2) le groupe, 3) la communauté et 4) la société.

7.4 Classification du corpus

Les 67 SIPs du corpus discriminés selon les 16 critères précédemment définis sont présentés par la matrice en figure 7.3. Pour explorer la matrice, nous avons développé un outil permettant de filtrer les 67 SIPs en fonction des 73 caractéristiques provenant des 16 critères organisés en cinq classes (figure 7.4). L'outil est une application Web¹ développée avec la framework Python Django.

1. <http://itame.pythonanywhere.com/Classification/>, visité le 14 octobre 2026.

7. Revue de la littérature

A. Sobriété énergétique 1. Réduire ou mutualiser 2. Décaler vers creuses 3. Stocker vers creuses B. Propreté énergétique 1. Décaler vers vertes 2. Stocker pendant vertes C. Espace social 1. Espace non spécifique 2. Espace domestique 3. Espace collectif 4. Espace public D. Contrôle 1. Manuel 2. Semi-automatique 3. Automatique	E. Type 1. Consommation d'énergie 2. Production d'énergie 3. Stockage d'énergie 4. Distribution d'énergie 5. Économie d'énergie F. Echelle temporelle 1. Historiques 2. Instantanées 3. Prévisionnelles G. Echelle spatiale 1. Appareil 2. Pièce 3. Bâtiment 5. Ville 4. Voisinage 6. Pays	H. Matérialisation 1. Activation d'énergie 2. Collection d'énergie 3. Possession d'énergie 4. Partage d'énergie I. Persuasion 1. Prédiction 2. Suggestion 3. Évaluation 4. Simulation 5. Feedback immédiat 6. Feedback cumulé 7. Comparaison temporelle 8. Comparaison spatiale 9. Comparaison sociale	J. Ludification 1. Challenge 2. Compétition 3. Collaboration 4. Progression 5. Interaction sociale 6. Personnalisation 7. Accomplissement 8. Récompense	K. Type 1. Graphique 2. Physique 3. Ambiante L. Visibilité 1. Individu 2. Pièce 3. Bâtiment 4. Ville	M. Accessibilité 1. Mobile 2. Fixe sur espace non spécifique 3. Fixe sur espace domestique 4. Fixe sur espace collectif 5. Fixe sur espace public N. Dispositif 1. Appareil mobile 2. Application web 3. Appareil de projection 4. Objet connecté 5. Objet du quotidien revisité	O. Proactivité 1. Individu 2. Famille 3. Groupe 4. Communauté 5. Société P. Passivité 1. Individu 2. Famille 3. Groupe 4. Communauté 5. Société																																						
	CONTEXTE				DONNÉES				FONCTIONS								INTERFACE								UTILISATEUR																			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P																												
	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
7,000 oaks and counting[87]																																												
Abstract Ambient[156]																																												
Agent B[34]																																												
AgentSwitch[60]																																												
Ambient Battery Level[48]																																												
ArchiExpression[119]																																												
BizWatts[72]																																												
BoE[51]																																												
Conversation WashMachine[19]																																												
Coralog[108]																																												
Customisable dashboard[59]																																												
E-point[131]																																												
eAMB[73]																																												
Eco-Aware CoffeeMaker[26]																																												
EcoFeedback[122]																																												
Ecosphere[167]																																												
eForecast[110]																																												
Energy AWARE Clock[21]																																												
Energy Local Lamp[143]																																												
Energy Orb[58]																																												
Energy Plant[20]																																												
Energy Puppet[162]																																												
Energy Tree[142]																																												
EnergyDub[52]																																												
EnergyLife[67]																																												
EnergySavings[180]																																												

FIGURE 7.3 – La matrice discriminant les 67 SIPs du corpus selon 73 caractéristiques provenant de 16 critères organisés en cinq classes : le *contexte*, le *système* (données et fonctions), l'*interface* et l'*utilisateur*. Illustration réalisée avec la bibliothèque javascript d3.js [18].

Classification of 67 Interactive Systems for Energy Management				
CONTEXT	DATA	FUNCTION	INTERFACE	USER
Energy sobriety ☐ reducing or sharing energy demand (56) ☐ shifting energy demand to off-peak load hours (3) ☐ storing energy during off-peak load hours (1)	Energy cleanliness ☐ shifting energy to peak green hours (11) ☐ storing energy during peak green hours (2)	Target ☐ any space (9) ☐ domestic space (49) ☐ collective space (6) ☐ public space (3)	Control ☐ manual (66) ☐ semi-automatic (7) ☐ automatic (3)	
UNCHECK ALL				

FIGURE 7.4 – L’outil développé permettant de filtrer les 67 SIPs en fonction des 73 caractéristiques provenant des 16 critères organisés en cinq classes.

7.5 Analyse verticale du corpus

Dans un premier temps, nous avons réalisé une analyse verticale (c.-à-d. par colonne) des SIPs du corpus en agrégeant les critères de chaque classe afin de dégager les tendances pour chacune des questions suivantes :

T1 Quels contextes entourent les SIPs ?

T2 Quelles fonctions sont implémentées par les SIPs ?

T3 Quelles données sont exploitées par les SIPs ?

T4 Quelles interfaces sont utilisées par les SIPs ?

T5 Quel utilisateurs sont ciblés par les SIPs ?

Les sous-sections suivantes décrivent les tendances observées dans chacune des classes.

7.5.1 Contexte

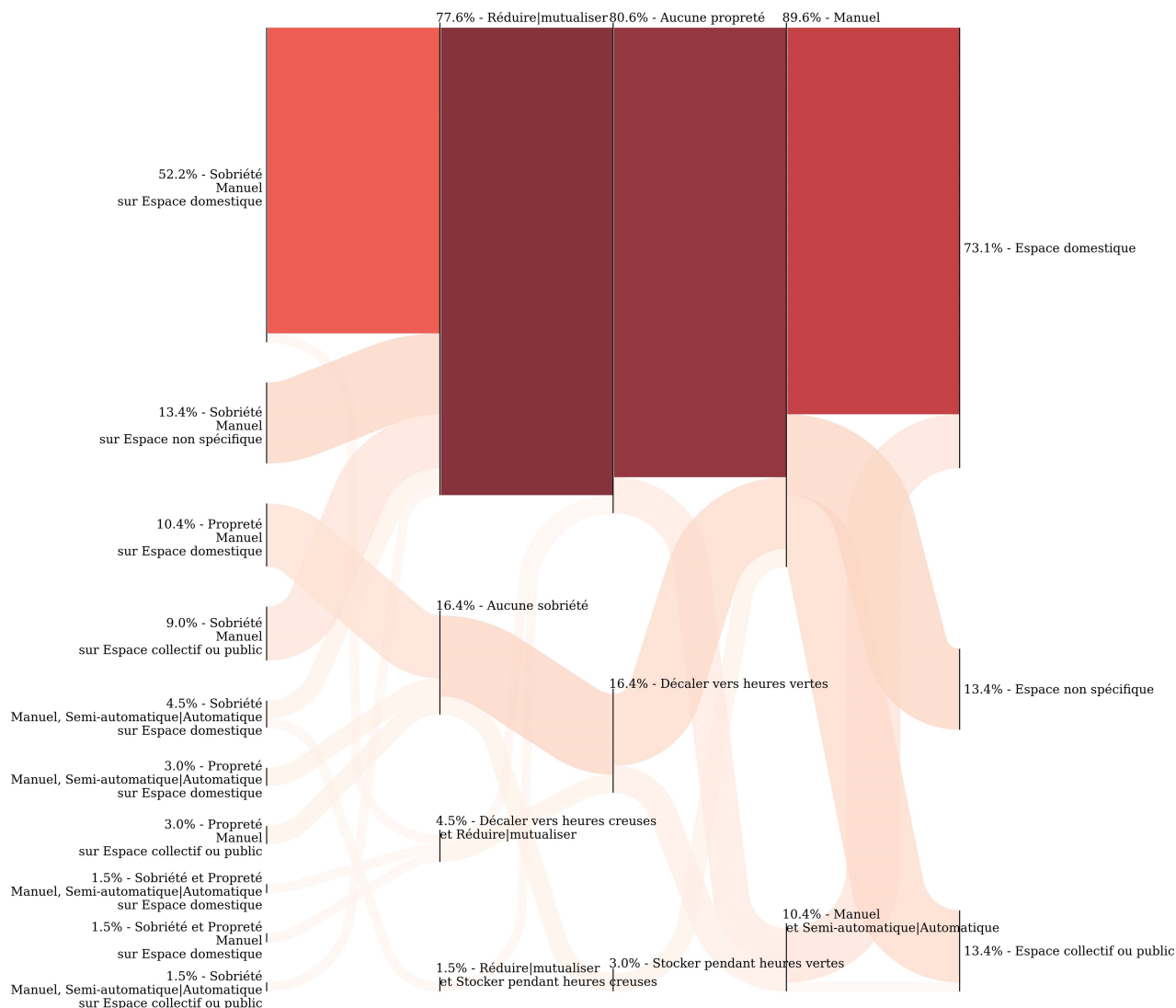


FIGURE 7.5 – Le diagramme de Sankey visualisant le flux des différents contextes qui se dégagent du corpus. Illustration réalisée avec la bibliothèque python floWeaver [18].

En réponse à **T1**, le diagramme de Sankey en figure 7.5 présente les tendances des contextes qui entourent les SIPs du corpus.

Plus des trois quarts des SIPs (76,2% – 51/67) sont conçus pour promouvoir une sobriété énergétique manuelle sur un espace domestique (52,2% – 35/67), sur un espace non spécifique (13,4% – 9/67) ou sur un espace collectif ou public (10,4% – 7/67). Aussi, quatre autres SIPs (4,5% – 4/67) ciblent une sobriété manuelle et (semi-)automatique sur un espace domestique ou sur un espace collectif ou public : 53 systèmes aident les utilisateurs à réduire ou mutualiser la consommation d'énergie, trois systèmes aident à décaler la consommation d'énergie vers les heures creuses et un autre système aide

à stocker de l'énergie pendant les heures creuses pour la consommer ou la partager ultérieurement.

Neuf SIPs (13,4% – 9/67) sont conçus pour promouvoir une propreté manuelle sur un espace domestique (10,4% – 7/67) ou sur un espace collectif ou public (3% – 2/67). Aussi, deux SIPs (3% – 2/67) ciblent une propreté manuelle et (semi-)automatique sur un espace domestique : neuf systèmes encouragent les utilisateurs à décaler la consommation d'énergie vers les heures vertes et deux systèmes aident les utilisateurs à stocker de l'énergie pendant les heures vertes pour la consommer ou la partager ultérieurement.

Enfin, un SIP (1,5% – 1/67) est conçu pour promouvoir une sobriété et une propreté manuelle sur un espace domestique et un autre SIP (1,5% – 1/67) est conçu pour promouvoir une sobriété et une propreté manuelle et (semi-)automatique sur un espace domestique : ces deux systèmes aident les utilisateurs à réduire la consommation d'énergie et aussi à décaler la consommation d'énergie vers les heures creuses et les heures vertes.

7.5.2 Fonctions

En réponse à **T2**, le diagramme de Sankey en figure 7.6 présente les tendances des fonctions implémentées par les SIPs du corpus.

Plus de la moitié des SIPs (56,7% – 38/67) offrent des fonctions de matérialisation et implémentent des fonctions de persuasion. Plus d'un tiers des SIPs (35,8% – 24/67) offrent des fonctions de matérialisation et implémentent des fonctions de persuasion et de ludification. Parmi les cinq SIPs restants, aucun n'offre de fonctions de matérialisation : quatre implémentent des fonctions de persuasion et de ludification et le dernier implémente seulement des fonctions de persuasion.

Plus de la moitié des SIPs (52,2% – 35/67) permettent l'activation et la possession d'énergie. Presque un tiers des systèmes (26,9% – 18/67) permettent seulement l'activation de l'énergie. Sept systèmes permettent l'activation et le partage d'énergie. Un système permet l'activation, la possession et le partage de l'énergie et un autre système permet la collecte, l'activation et la possession d'énergie.

Plus d'un quart des SIPs (26,9% – 18/67) implémentent au moins une fonction de feedback et d'évaluation des conséquences du comportement. Presque un tiers des SIPs (29,9% – 20/67) implémentent au moins une fonction de feedback, de comparaison et d'évaluation des conséquences du comportement. Presque un cinquième des SIPs (19,4% – 13/67) implémentent au moins une fonction de feedback, de comparaison et d'évaluation des conséquences du comportement plus une fonction de suggestion, de prévision ou de simulation des conséquences du comportement.

Plus de la moitié des SIPs (58,2% – 39/67) n'implémentent pas de fonction de ludification. Moins d'un cinquième des SIPs (14,9% – 10/67) implémentent au moins une fonction de collaboration ou d'interaction sociale. Moins d'un dixième des SIPs (9,0% – 6/67) implémentent au moins une fonction de collaboration ou d'interaction sociale plus une fonction de challenge ou de compétition et une fonction de progression, d'accomplissement ou de récompense.

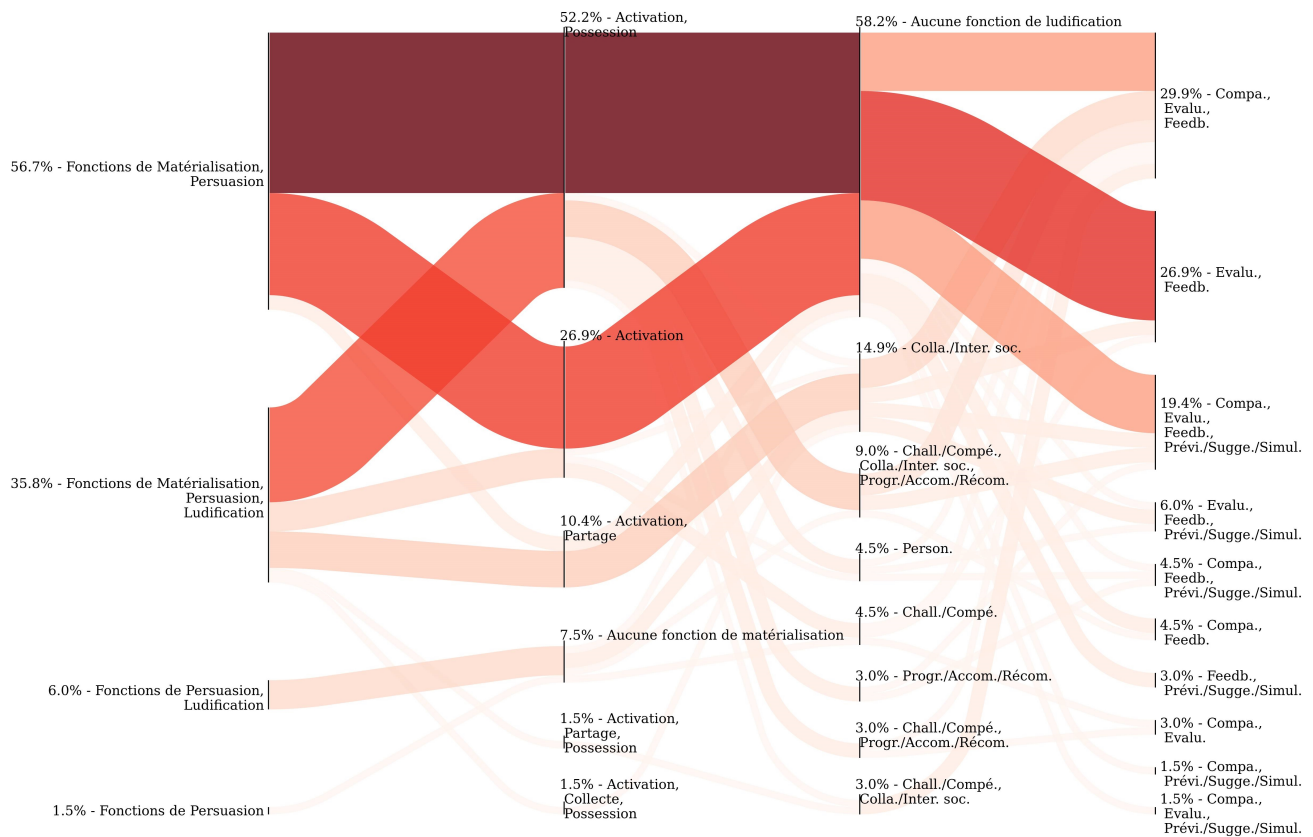


FIGURE 7.6 – Le diagramme de Sankey visualisant le flux des différents profils d'utilisateurs qui se dégagent du corpus. Illustration réalisée avec la bibliothèque python floWeaver [18].

7.5.3 Données

En réponse à **T3**, le diagramme de Sankey en figure 7.7 présente les tendances des données exploitées par les SIPs du corpus.

Plus d'un tiers des SIPs (37,3% – 25/67) exploitent des données historiques ou instantanées sur la consommation d'énergie d'un bâtiment ou d'un voisinage. Trois SIPs (4,5% – 3/67) exploitent des données prévisionnelles sur la consommation d'énergie d'un bâtiment ou d'un voisinage. En plus de la consommation d'énergie, quatre SIPs (6% – 4/67) exploitent des données historiques ou instantanées sur la production, le stockage ou la distribution d'énergie d'un bâtiment ou d'un voisinage.

Presque un cinquième des SIPs (16,4% – 11/67) utilisent des données historiques ou instantanées sur la consommation d'énergie d'un appareil ou d'une pièce. En plus de la consommation d'énergie, quatre SIPs (6% – 4/67) exploitent des données historiques ou instantanées sur la production, le stockage ou la distribution d'énergie d'un appareil ou d'une pièce.

Un peu plus d'un dixième des SIPs (10,4% – 7/67) exploitent des données historiques ou instantanées sur la consommation d'énergie d'un appareil ou d'une pièce plus celle

d'un bâtiment ou d'un voisinage. Trois SIPs (4,5% – 3/67) exploitent des données prévisionnelles sur la consommation d'énergie d'un bâtiment ou d'un voisinage.

Les SIPs restants (15% – 10/67) utilisent des données variées telles que des données historiques ou instantanées sur la consommation d'énergie d'une ville ou la production d'énergie d'un pays ou encore des données prévisionnelles sur la production d'énergie d'un bâtiment.



FIGURE 7.7 – Le diagramme de Sankey visualisant le flux des différents profils de données qui se dégagent du corpus. Illustration réalisée avec la bibliothèque python floWeaver [18].

7.5.4 Interface

En réponse à **T4**, le diagramme de Sankey en figure 7.8 présente les tendances des interfaces utilisées par les SIPs du corpus.

Presque la moitié des SIPs sont des interfaces graphiques mobiles (47,8% – 32/67) : 18 applications web et 14 appareils mobiles visibles par un unique individu.

Plus d'un tiers des SIPs sont des interfaces physiques ambiantes fixes (34,3% – 23/67) : 12 objets du quotidien revisités, sept objets connectés et quatre installations physiques fixes sur un espace non spécifique, domestique, collectif ou public visible à l'échelle d'une pièce ou d'un bâtiment.

Parmi les SIPs restant, on dénombre cinq interfaces graphiques ambiantes mobiles (7,5% – 5/67) : cinq écrans d'appareils mobiles visibles à l'échelle d'une pièce. On dénombre également quatre interfaces graphiques ambiantes fixes (6,0% – 4/67) : deux appareils de projection fixe visible à l'échelle d'une pièce, l'un sur un espace domestique

et l'autre sur un espace public, un appareil de projection fixe visible à l'échelle d'une ville sur un espace public et une installation physique visible à l'échelle d'une pièce sur un espace collectif.

Et à la marge, deux interfaces physiques ambiantes mobiles (3,0% – 2/67) visibles à l'échelle d'un pièce qui sont des objets connectés et une interface graphique physique fixe (1,5% – 1/67) sur un espace collectif visible à l'échelle d'un pièce qui est une installation physique combinant interaction tactile et tangible.

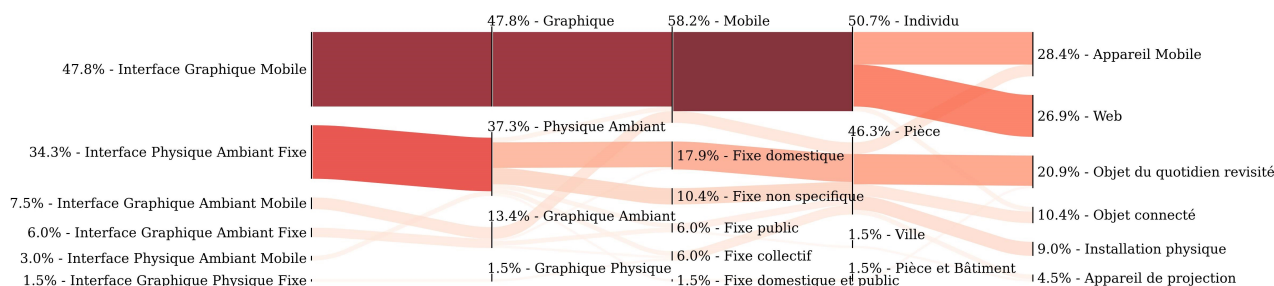


FIGURE 7.8 – Le diagramme de Sankey visualisant le flux des différents profils d'interfaces qui se dégagent du corpus. Illustration réalisée avec la bibliothèque python floWeaver [18].

7.5.5 Utilisateur

En réponse à **T5**, le diagramme de Sankey en figure 7.9 présente les tendances des utilisateurs ciblés par les SIPs du corpus.

Presque la moitié des SIPs (49,3% – 33/67) permettent aux utilisateurs d'être pro-actifs vis-à-vis du système : 28 systèmes sont manipulables par un individu et cinq systèmes sont manipulables par un individu et une communauté.

Presque un tiers des SIPs (32,8% – 22/67) permettent aux utilisateurs d'être passifs vis-à-vis du système : 26 systèmes amènent l'information à la perception de la famille ou du groupe, cinq systèmes à la perception de la société, deux systèmes à la perception de l'individu et un système à la perception de la famille et de la société.

Le reste des SIPs (17,9% – 12/67) permettent aux utilisateurs d'être pro-actifs et passifs vis-à-vis du système : huit systèmes sont manipulables par un individu et amènent l'information à la perception de la famille ou du groupe, deux sont manipulables par la famille ou le groupe et amènent l'information à la perception de la famille ou du groupe et un système est manipulable par la société et amène l'information à la perception de la société.

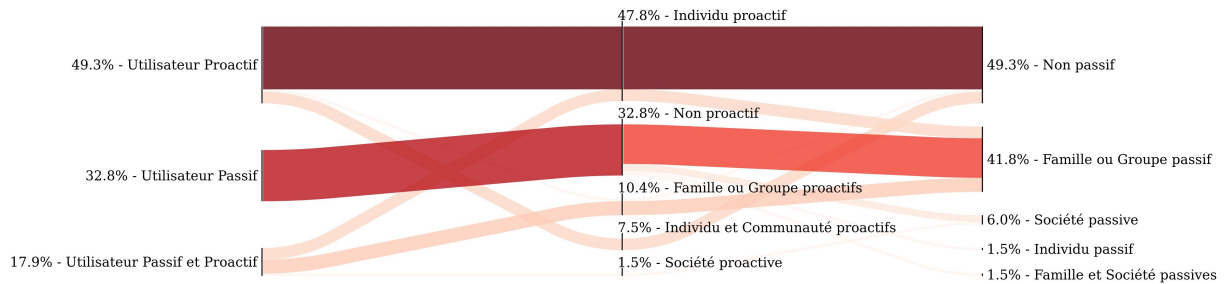


FIGURE 7.9 – Le diagramme de Sankey visualisant le flux des différents profils d'utilisateurs qui se dégagent du corpus. Illustration réalisée avec la bibliothèque python floWeaver [18].

7.6 Synthèse horizontale du corpus

L'analyse verticale (c.-à-d. par colonne) des SIPs du corpus nous a permis de dégager des tendances sur le *contexte*, le *système* (données et fonctions), l'*interface* et l'*utilisateur* des SIPs du corpus. Dans un second temps, nous avons cherché à identifier les interfaces utilisateur typiquement utilisées pour promouvoir la sobriété et la propreté énergétique. Nous avons réalisé une synthèse horizontale (c.-à-d. par ligne) des tendances des SIPs du corpus afin de répondre à la question suivante :

T6 *Quels interfaces utilisateurs sont utilisées par les SIPs ? Dans quels contextes ? Avec quel systèmes ?*

Les classes *interface* et *utilisateur* ont été fusionnées pour créer la classe *interface utilisateur* qui discrimine les interfaces utilisateur des SIPs du corpus selon si elles sont mobiles ou fixes (critère *accessibilité* de la classe *interface*) et selon si elles sont ambiantes, manipulables ou ambiantes manipulables (critère *type* de la classe *interface*, critères *proactivité* et *passivité* de la classe *utilisateur*).

En réponse à **T6**, le diagramme de Sankey en figure 7.10 présente les tendances des six profils typiques d'interface utilisateur pour promouvoir la sobriété et la propreté énergétique. Les sous-sections suivantes décrivent les tendances observées pour chaque profil typique d'interface utilisateur.

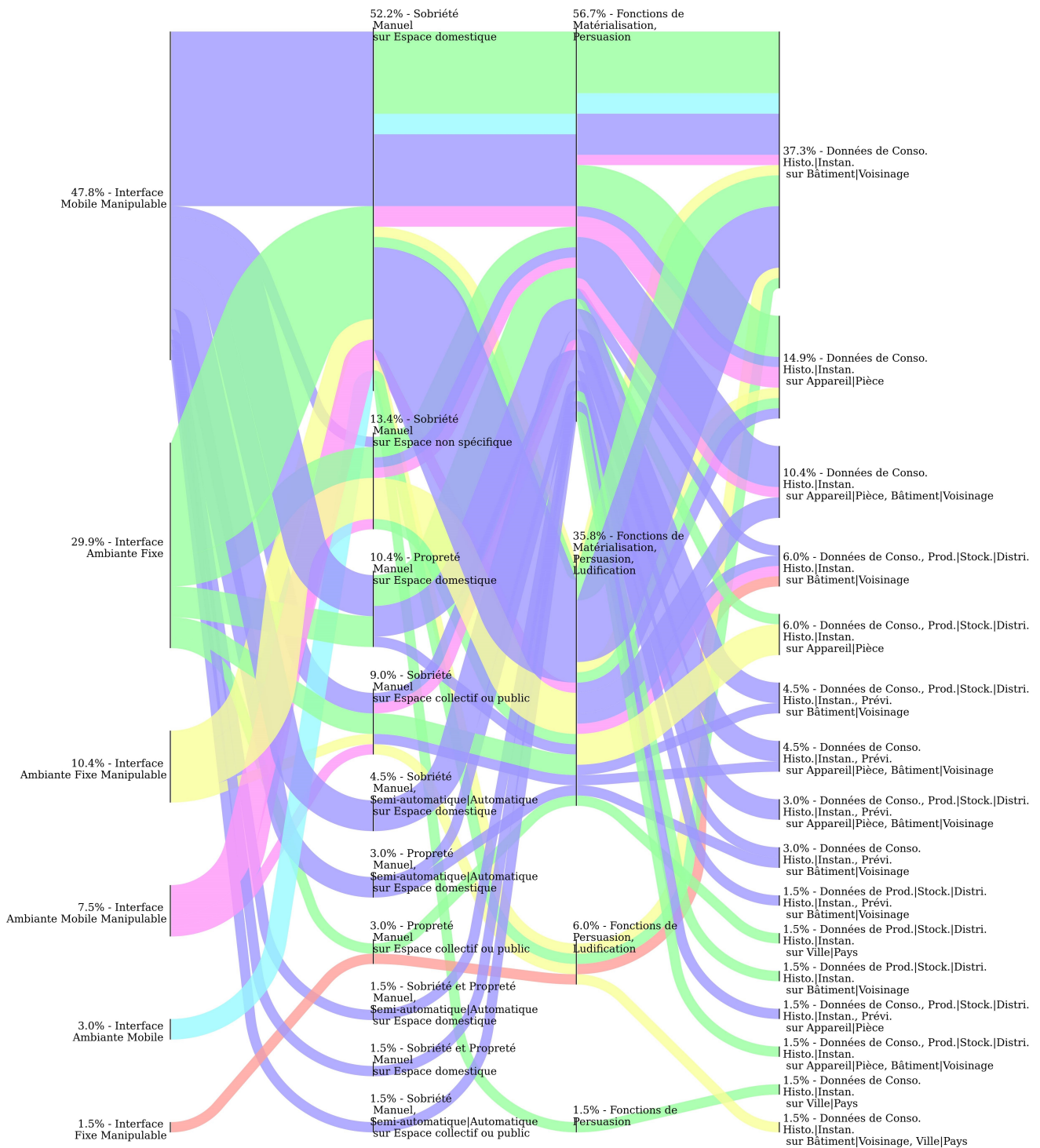


FIGURE 7.10 – Le diagramme de Sankey visualisant le flux des six profils typiques d’interface utilisateur qui se dégagent du corpus. Illustration réalisée avec la bibliothèque python floWeaver [18].

7.6.1 Interfaces manipulables mobiles

Presque la moitié des SIPs (47,7% – 32/67) utilisent des interfaces utilisateurs mobiles et manipulables (application web ou mobile). La majorité de ces interfaces utilisateurs sont employées pour promouvoir une sobriété énergétique manuelle sur un espace domestique (17/32) en utilisant des fonctions de matérialisation et des fonctions de persuasion ou de ludification (17/32) avec des données historiques ou instantanées sur la consommation d'énergie des appareils ou des pièces et du bâtiment ou du voisinage (16/32). Un exemple type de ces interfaces est l'application web, HandyFeedback [141] (figure 7.11).



FIGURE 7.11 – HandyFeedback [141]

7.6.2 Interfaces ambiantes fixes

Presque un tiers des SIPs (29,8% – 20/67) utilisent des interfaces utilisateurs fixes et ambiantes (objets connectés ou du quotidien revisités). La majorité de ces interfaces utilisateurs sont utilisées pour promouvoir une sobriété énergétique manuelle sur un espace domestique ou non spécifique (16/20) en utilisant des fonctions de matérialisation et des fonctions de persuasion (11/20) avec des données historiques ou instantanées sur la consommation d'énergie des appareils, des pièces, du bâtiment ou du voisinage (13/20). Un exemple type de ces interfaces utilisateur est l'horloge revisitée, Energy Aware Clock [21] (figure 7.12).



FIGURE 7.12 – Energy Aware Clock [21]

7.6.3 Interfaces manipulables ambiantes fixes

Moins d'un cinquième des SIPs (10,4% – 7/67) utilisent des interfaces utilisateurs fixes, ambiantes et manipulables (trois objets du quotidien revisités, deux objets connectés, deux installations physiques ou appareils de projection avec applications web/mobiles). La majorité de ces interfaces utilisateurs sont utilisées pour promouvoir une sobriété énergétique manuelle sur un espace non spécifique (4/7) en utilisant des fonctions de matérialisation, de persuasion et de ludification (4/7) avec des données historiques ou instantanées sur la consommation d'énergie ou la distribution de l'énergie des appareils ou des pièces (4/7). Un exemple type de ces interfaces utilisateur est la prise électrique revisitée, Ténéré [106] (figure 7.13).



FIGURE 7.13 – Ténéré [106]

7.6.4 Interfaces manipulables ambiantes mobiles

Cinq SIPs (7,4% – 5/67) utilisent des interfaces utilisateurs mobiles, ambiantes et manipulables (applications web ou mobiles exploitant les écrans d'appareils mobiles). La majorité de ces interfaces utilisateurs sont utilisées pour promouvoir une sobriété énergétique manuelle sur un espace domestique (3/5) en utilisant des fonctions de

matérialisation et de persuasion (3/5) avec des données historiques ou instantanées sur la consommation d'énergie des appareils ou des pièces et du bâtiment ou du voisinage (3/5). Un exemple type de ces interfaces utilisateur est l'application mobile, PowerViz [136] (figure 7.14).



FIGURE 7.14 – PowerViz [136]

7.6.5 Interfaces ambiantes mobiles

Deux SIPs (3% – 2/67) utilisent des interfaces utilisateurs mobiles et ambiantes (un bracelet connecté et une application web exploitant l'écran d'un appareil mobile). Ces interfaces utilisateurs sont employées pour promouvoir une sobriété énergétique manuelle sur un espace domestique (2/2) en utilisant des fonctions de matérialisation et de persuasion (2/2) avec des données historiques ou instantanées sur la consommation d'énergie du bâtiment ou du voisinage (16/32). Un exemple type de ces interfaces utilisateur est le bracelet connecté, Mobile ECD [200] (figure 7.15).

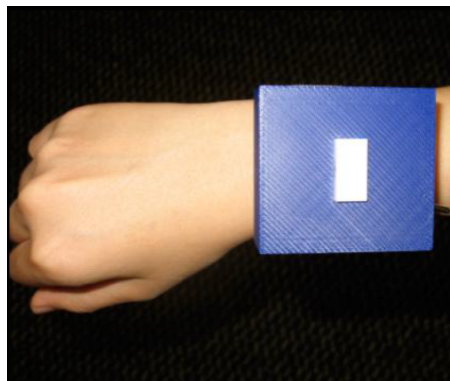


FIGURE 7.15 – Mobile ECD [200]

7.6.6 Interfaces manipulables fixes

Un seul SIP (1,5% – 1/67) utilise une interface utilisateur fixe et manipulable (une installation physique). Cette interface utilisateur est employée pour promouvoir la propreté énergétique manuelle sur un espace collectif ou public en utilisant des fonctions de matérialisation et de ludification avec des données historiques ou instantanées sur la consommation, la production, le stockage et la distribution d'énergie du bâtiment ou du voisinage. Cette interface est le kiosque connecté, StationENR [155](figure 7.16).

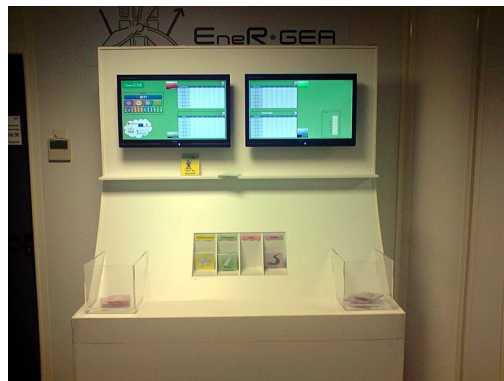


FIGURE 7.16 – StationENR [155]

7.7 Discussion sur les types d'interface pour le changement

D'après la synthèse horizontale du corpus, les SIPs du corpus emploient six interfaces utilisateur différentes pour atteindre un même objectif, promouvoir la sobriété ou la propreté énergétique. Promouvoir la sobriété ou la propreté énergétique implique de changer les valeurs, les attitudes et les comportements des citoyens. Selon Beebe et al. [12], les attitudes, croyances et valeurs sont des constructions psychologiques apprises qui motivent et influencent le comportement (c.-à-d. les actions d'un être vivant). Les attitudes sont des prédispositions à répondre à une personne, un objet ou une idée de manière favorable ou défavorable. Les croyances sont les manières dont les individus structurent leur compréhension de la réalité (p. ex., ce qui est vrai et ce qui est faux). Les valeurs sont centrales au concept du soi et peuvent être conceptualisées comme des comportements idéaux ou des préférences pour les expériences. Parmi ces constructions psychologiques, les attitudes sont les moins durables (c.-à-d. plus propices au changement) et les valeurs sont les plus durables (c.-à-d. moins propices au changement). Le modèle transthéorique du changement proposé en 1992 par Prochaska et al. [147] est une théorie qui décrit le processus du changement de comportement comme une série d'étapes. Initialement développé pour modéliser les comportements problématiques liés à l'usage de psychotropes, ce modèle permet de suivre un individu depuis le déni vis-à-vis de l'existence d'un comportement problématique jusqu'au changement de comportement et

l'installation de nouvelles habitudes. Même s'il est communément utilisé, ce modèle est parfois remis en question. Nous illustrons l'enchaînement des étapes en figure 7.17. La motivation est l'élément clé qui permet à l'individu de fournir la concentration, l'effort et l'énergie nécessaire pour progresser entre les étapes du changement.

D'après Miller et Rollnick [130], la motivation est une enquête sur le pourquoi du comportement. C'est un état interne ou une condition quelque fois décrit comme un besoin, un désir ou un souhait qui sert à activer ou dynamiser le comportement. Chaque étape du changement de comportement décrit un utilisateur avec une motivation variable et des attitudes et comportements différents. Il y a donc deux façons de concevoir des interfaces pour le changement de comportement : *concevoir une interface qui s'adapte à l'étape du changement dans laquelle se trouve l'utilisateur* ou *concevoir plusieurs interfaces pour accompagner l'utilisateur au travers des différentes étapes du changement*. Nous choisissons la dernière proposition.

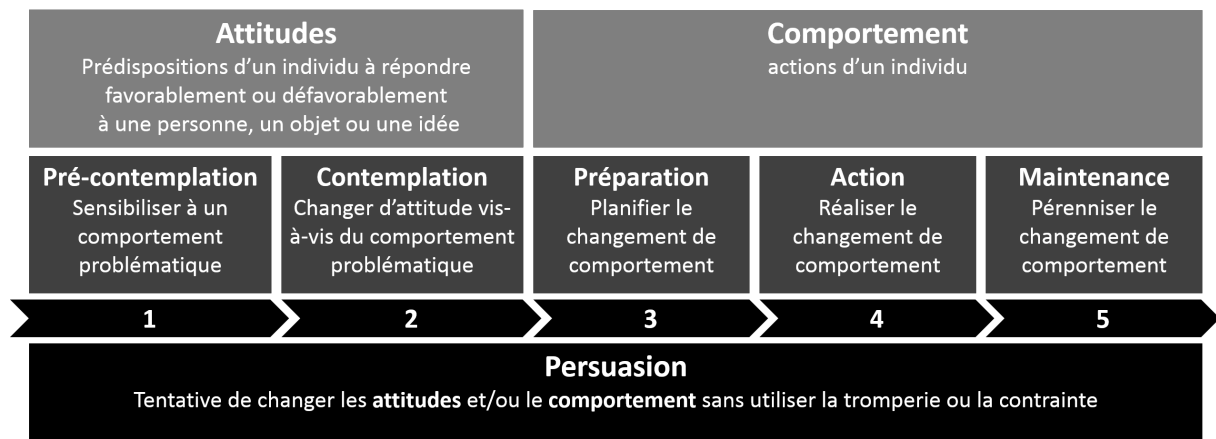


FIGURE 7.17 – Une illustration du modèle transthéorique du changement [147].

7.7.1 Interfaces fixes pour sensibiliser et changer les attitudes

Les interfaces mobiles sont inadéquates pour les étapes 1 et 2 (pre-contemplation et contemplation). Une interface mobile doit obtenir l'autorisation de l'utilisateur avant de pouvoir l'assister. L'utilisateur doit posséder l'appareil mobile (et personnel) et installer l'application (la lancer et même la configurer). Pendant la pré-contemplation (étape 1), l'utilisateur n'est pas conscient du comportement problématique et, pendant la contemplation (étape 2), l'utilisateur n'exprime aucune attitude positive vis-à-vis du comportement problématique. Obtenir l'autorisation de l'utilisateur est compromis pour ces deux premières étapes. Par contre, les interfaces fixes sont adaptées pour les étapes 1 et 2. Une tierce partie peut autoriser une interface fixe (et non-personnelle) et l'installer dans l'environnement de l'utilisateur, tel qu'un lieu public.

7.7.2 Interfaces mobiles pour planifier, réaliser et pérenniser le changement

Les interfaces fixes ne sont pas les plus satisfaisantes pour les étapes 3, 4 et 5 (préparation, action et maintenance) car elles assistent les utilisateurs seulement sur des espaces spécifiques. Pendant les étapes 3, 4 et 5, les utilisateurs planifient, réalisent et maintiennent le changement de comportement. Pendant ces étapes, le système devrait être disponible n'importe où et à n'importe quel moment. Les interfaces mobiles semblent donc plus adéquates pour ces étapes 3, 4 et 5.

7.7.3 Interfaces ambiantes pour sensibiliser, réaliser et pérenniser le changement

Les interfaces ambiantes sont adéquates pour les étapes 1, 4 et 5 (pre-contemplation, action et maintenance). Pendant l'étape 1, il faut rendre l'utilisateur conscient du comportement problématique sans lui demander trop de motivation ou d'efforts. Pendant les étapes 4 et 5, il faut rappeler à l'utilisateur les conséquences de son comportement pour éviter une rechute vers un comportement problématique. Les interfaces ambiantes amènent l'information à la portée des utilisateurs et leurs demandent peu d'effort [76].

7.7.4 Interfaces manipulables pour changer les attitudes, planifier et réaliser le changement

Pendant l'étape 2, le système doit aider l'utilisateur à peser le pour et le contre du changement de comportement [82]. Pendant l'étape 3, le système doit aider l'utilisateur à développer un plan efficace, accessible et acceptable pour changer de comportement [130]. Pendant l'étape 4, le système doit aider l'utilisateur à explorer les conséquences de son changement de comportement [198]. Ces étapes 2, 3 et 4 nécessitent un utilisateur pro-actif vis-à-vis du système (c.-à-d. l'utilisateur a besoin de manipuler des informations numériques). Les interfaces manipulables sont adéquates pour ces étapes 2, 3 et 4 (p. ex., les interfaces WIMP) car elles offrent une manipulation riche des informations numériques contrairement aux interfaces ambiantes.

7.7.5 Matrice de compatibilité théorique des types d'interface utilisateur pour les étapes de changement

En suivant le raisonnement précédemment énoncé, on obtient une matrice de compatibilité théorique de chaque type d'interface utilisateur pour chaque étape de changement de comportement (figure 7.18).

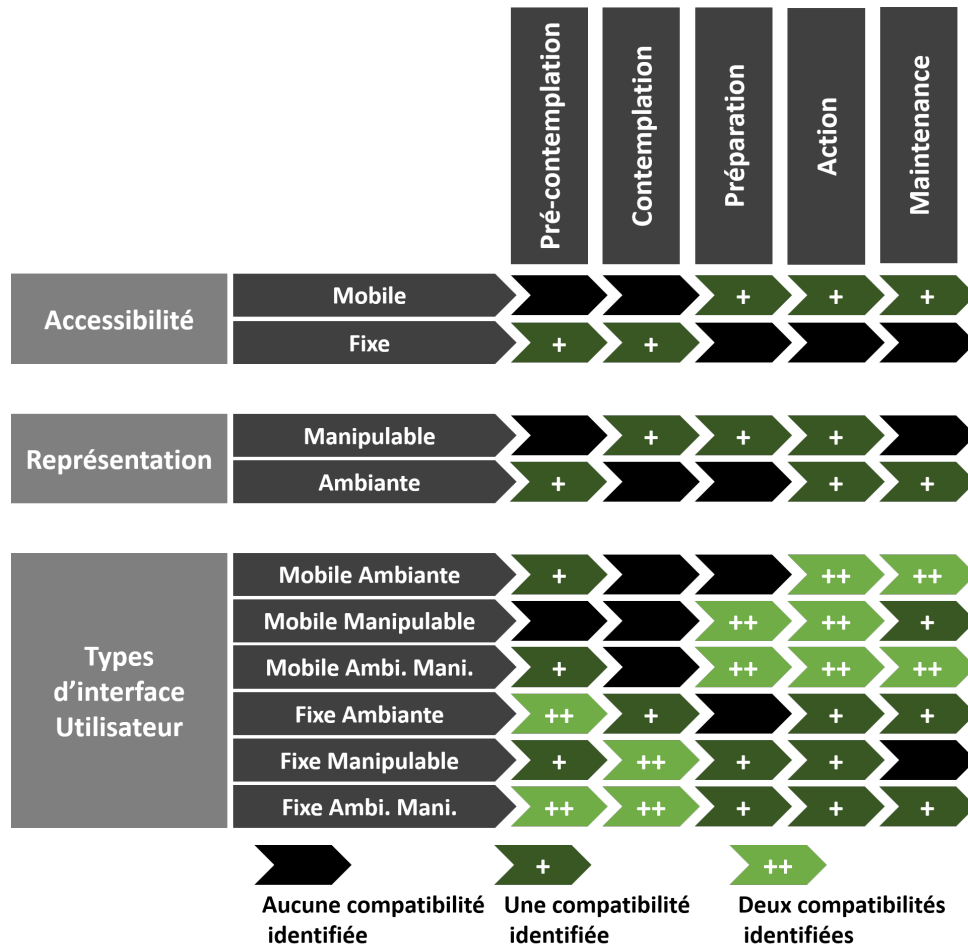


FIGURE 7.18 – La matrice de compatibilité théorique des types d'interface utilisateur pour chaque étape du modèle transthéorique du changement [147].

7.8 Afficheurs sur les espaces collectifs et publics pour le changement

Cette thèse s'intéresse à l'utilisation des afficheurs sur les espaces collectifs et publics. Les afficheurs appartiennent à la catégorie des interfaces ambiantes fixes. On distingue les interfaces graphiques ambiantes fixes comme un afficheur planaire (p. ex., un écran) et les interfaces physiques ambiantes fixes comme un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution (p. ex., CairnFORM). D'après la matrice de compatibilité théorique précédemment proposée, les interfaces ambiantes fixes sont les plus adaptées pour sensibiliser les utilisateurs non engagés à un comportement problématique (étape 1) et adaptés pour aider les utilisateurs engagés à réaliser (étape 4) et pérenniser (étape 5) un changement de comportement.

Chapitre 8

Application

Ce chapitre présente une application des afficheurs sur le lieu de travail pour promouvoir la propreté énergétique en aidant les employés à charger la batterie de leur ordinateur portable pendant les heures de pic de production locale d'énergie renouvelable. Nous définissons des consignes à donner aux employés pour effectuer la pratique avec chaque variation de production locale d'énergie renouvelable de la journée de travail. Nous validons les consignes proposées par une série de simulation avec un outil développé *ad hoc*. Les simulations révèlent que les consignes ne devraient pas être appliquées à toutes les variations. Aussi, nous donnons une estimation du potentiel de propreté énergétique des consignes proposées pour toutes les variations d'une année de travail. Pour aider les employés à appliquer les consignes *in situ*, nous proposons un histogramme à afficher au quotidien avec les afficheurs déployés sur le lieu de travail.

8.1 Promouvoir la propreté énergétique au travail

En 2012, Pierce et Paulos [144] appellent les acteurs à s'intéresser à d'autres stratégies de gestion de la demande en énergie que la sobriété énergétique telle que la propreté énergétique. Depuis 2012, nous observons un nombre croissant de systèmes interactifs conçus pour promouvoir la propreté énergétique dans notre corpus : neuf des onze SIPs pour la propreté énergétique que nous avons identifiés depuis 2005 sont apparus après 2012. L'intérêt croissant pour les (micro-)réseaux électriques intelligents depuis 2011 [183] rend les stratégies de propreté énergétique plus intéressantes aujourd'hui [165]. Aussi, même si les stratégies de sobriété énergétique et les stratégies de propreté énergétique sont complémentaires, les stratégies de propreté énergétique sont généralement plus flexibles que les stratégies de sobriété énergétique [110] : là où les stratégies de sobriété énergétique demandent plutôt aux citoyens de remplacer, voire supprimer des pratiques problématiques (p. ex., lancer moins de lessives), les stratégies de propreté énergétique demandent plutôt aux citoyens de déplacer des pratiques problématiques (p. ex., lancer une lessive pendant un pic EnR).

En 2012, Pierce et Paulos [144] appellent également les acteurs à promouvoir les stratégies de gestion de la demande en énergie sur d'autres espaces sociaux que les foyers

tels que les lieux de travail. En effet, le lieu de travail est un espace intéressant pour appliquer ces stratégies : en 2014, les transports, les industries et les services comptaient respectivement pour 33,1%, 25,3% et 13,2% de la demande globale en énergie de l'UE contre 25,4% pour les foyers [54] (figure 8.1). Depuis 2012, nous observons également un nombre croissant de systèmes interactifs conçus pour les espaces collectifs et publics dans notre corpus : sept des neuf SIPs pour les espaces collectifs et publics que nous avons identifiés depuis 2005 sont apparus après 2012. Pour ces raisons, nous avons choisi de promouvoir la propreté énergétique sur le lieu de travail.

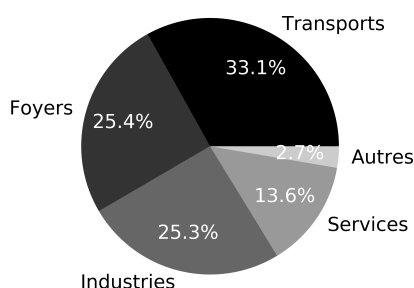


FIGURE 8.1 – La consommation d'énergie de l'UE-28 en 2015.

8.2 Décaler la charge des batteries des ordinateurs portables au travail

Appliquer une stratégie de propreté énergétique au travail telle que décaler la demande en énergie vers les heures de pic de production locale d'énergie renouvelable 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. En 2015, Kjeldskov et al. [110] mentionnent que décaler la demande en énergie dans les foyers était plus réaliste avec des équipements pouvant être séparés des routines quotidiennes tels que le lave-linge, le lave-vaisselle ou les chargeurs de batterie. En 2014, 66% des entreprises de l'UE-28 avaient équipé leurs employés de technologies de l'information et de la communication telles que des ordinateurs portables, des smartphones et d'autres appareils mobiles [53]. Les appareils mobiles tels que les ordinateurs portables peuvent être déconnectés du réseau électrique et fonctionner en autonomie à l'aide d'une batterie. Lorsque peu d'énergie renouvelable est disponible, l'employé peut déconnecter son ordinateur portable du réseau électrique pour décharger la batterie de l'ordinateur portable tout en continuant son activité professionnelle nécessitant du calcul informatique. Lorsque plus d'énergie renouvelable est disponible, l'employé peut connecter son ordinateur portable au réseau électrique pour ainsi charger la batterie de l'ordinateur portable. Nous proposons d'aider les employés à décaler la charge de la

batterie de leur ordinateur portable vers les heures de pic de production locale d'énergie renouvelable.

8.3 Identification de la pratique courante de chargement de batterie des ordinateurs portables au travail

Pour aider les employés à décaler la charge de la batterie de leur ordinateur portable, il est nécessaire d'identifier une pratique appropriée pour cet effet. Dans un premier temps, nous avons cherché à identifier la pratique de l'ordinateur portable la plus répandue 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 (figure 8.2). Nous considérons cette pratique comme la pratique par défaut.

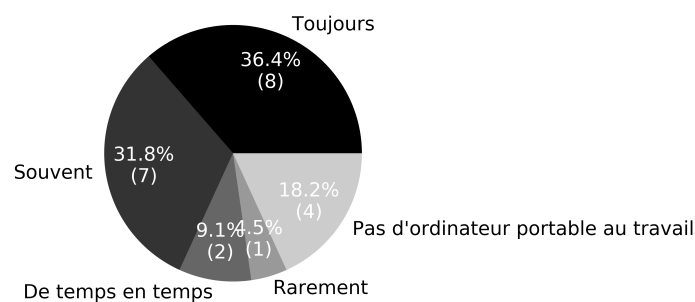


FIGURE 8.2 – L'ordinateur portable au travail branché au secteur même lorsque la batterie est complètement chargée ($N = 22$).

8.4 Simulation du décalage du chargement de batterie d'un ordinateur portable

Afin d'identifier une pratique appropriée à promouvoir, nous avons utilisé *Shifting the Energy Demand of Your Laptop* (SEDYL), un outil que nous avons développé qui permet de simuler le décalage du chargement de la batterie d'un ordinateur portable (figure 8.3). SEDYL est une application Web¹ développée avec la framework Python Django utilisant notamment les bibliothèques Javascript Everpolate, Simple Statistics et plotly. Le code

1. <http://itame.pythonanywhere.com/CairnFORM/Sedyl/>, visité le 14 octobre 2026.

source est disponible sur Github². L'outil permet de comparer une pratique donnée avec la pratique par défaut précédemment identifiée et implémente un modèle dynamique de batterie lithium-ion [181] qui considère que :

- La résistance interne de la batterie est constante pendant les cycles de (dé)charge et ne varie pas avec l'amplitude du courant.
- Les paramètres du modèle sont déduits des caractéristiques de décharge de la batterie et sont considérés comme étant les mêmes pour les caractéristiques de charge de la batterie.
- La capacité de la batterie ne change pas avec l'amplitude du courant (c.-à-d. pas d'effet Peukert).
- La température n'affecte pas le comportement du modèle.
- L'auto-décharge de la batterie est négligée.
- Les performances de la batterie ne sont pas impactées si la batterie n'est pas complètement déchargée avant d'être rechargée (c.-à-d. pas d'effet mémoire).

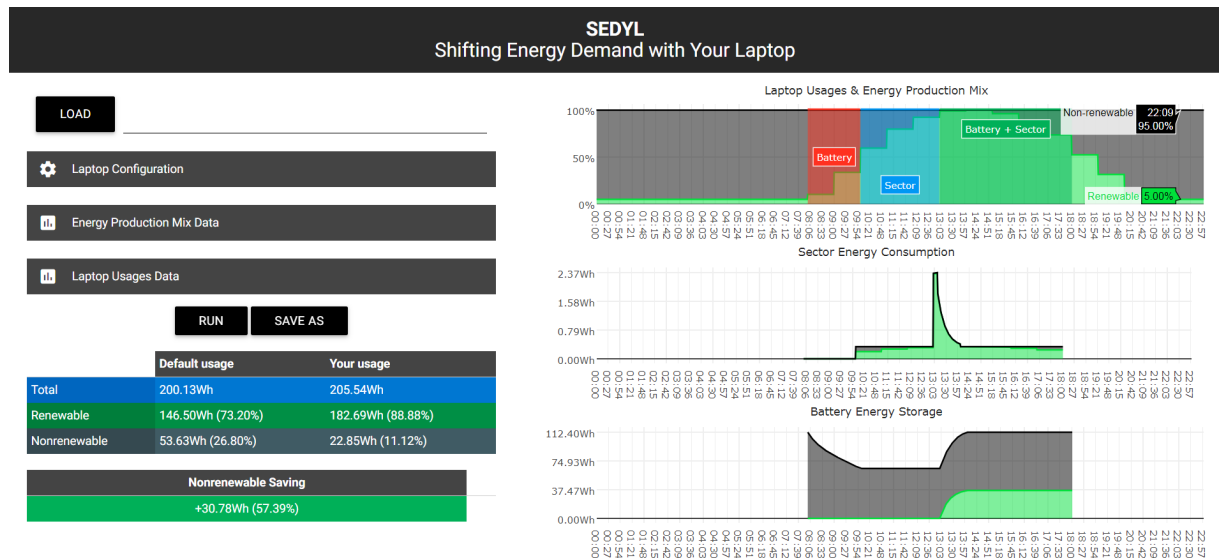


FIGURE 8.3 – SEDYL, un outil développé *ad hoc* pour simuler le décalage du chargement de la batterie d'un ordinateur portable.

8.4.1 Données en entrée

En entrée, SEDYL prend trois paramètres : le mix de la production électrique, la configuration de l'ordinateur portable et les usages de l'ordinateur portable.

Le premier paramètre entré dans SEDYL est le mix de la production électrique. Il est entré sous la forme d'une série horaire de taux EnR (soit $rate_{EnR}$ et $rate_{EnNR} =$

2. <https://github.com/maximedaniel/SEDYL>, visité le 14 octobre 2026.

$1 - rate_{EnR}$). Par défaut, la série horaire de taux EnR entrée dans SEDYL est égale à la production prévisionnelle d'énergie solaire de la journée courante de notre laboratoire (ESTIA, Bidart, France) (figure 8.4). Pour une heure donnée, nous considérons que le taux EnR est égal à la capacité moyenne de production d'énergie solaire de l'installation photovoltaïque du laboratoire pendant cette heure (p. ex., un taux EnR à 79,7% de 11h00 à 11h59 implique que l'installation photovoltaïque est à 92,4% de sa capacité moyenne de production de 11h00 à 11h59).

Energy Production Mix Data	
<HH:mm>	<float>
00:00	0.05
01:00	0.05
02:00	0.05
03:00	0.05
04:00	0.05
05:00	0.05
06:00	0.05
07:00	0.05
08:00	0.102
09:00	0.337
10:00	0.595
11:00	0.797
12:00	0.924
13:00	0.991
14:00	1.0
15:00	0.962
16:00	0.875
17:00	0.737
18:00	0.524
19:00	0.315
20:00	0.108
21:00	0.070
22:00	0.05
23:00	0.05

FIGURE 8.4 – Les données sur le mix de la production électrique en entrée de l'outil SEDYL.

Le deuxième paramètre entré dans SEDYL est la configuration de l'ordinateur portable. Il est rentré comme un ensemble de dix paramètres :

- Q_{rated} : la capacité de la batterie en Ampère-heure (par défaut, 8,8Ah).
- V_{nom} : le voltage nominal de la batterie en Volt (par défaut, 11,1V).
- A_{charge} : le courant nominal de charge de la batterie tiré au secteur en Ampère (par défaut, 8,8A).
- $A_{discharge}$: le courant nominal de décharge de la batterie tiré par l'ordinateur portable en Ampère (par défaut, 1,4185A).

- $\eta_{battery}$: l'efficacité énergétique du chargement de la batterie en pourcentage (par défaut, 90%).
- η_{supply} : l'efficacité énergétique de l'alimentation de l'ordinateur portable en pourcentage (par défaut, 80%).
- SoC_{min} : le niveau minimum de la batterie en pourcentage (par défaut, 50%).
- SoC_{max} : le niveau maximum de la batterie en pourcentage (par défaut, 100%).
- SoC_{total} : le niveau actuel de la batterie en pourcentage (par défaut, 100%).
- SoC_{EnR} : le niveau EnR actuel de la batterie en pourcentage (par défaut, 0%).

Par défaut, la configuration de l'ordinateur portable rentrée dans SEDYL est celle d'un Lenovo ThinkPad T540p équipé d'une batterie lithium-ion à 6 cellules avec $Q_{rated} = 8,8Ah$ et $V_{nom} = 11,11V$. Pour n'importe quelle batterie Li-ion, la charge se passe généralement en deux phases, une première phase avec un courant de charge limité de l'ordre de $Q_{rated}/2$ à $1Q_{rated}$. Cette phase permet une charge rapide jusqu'à environ 80% en une heure, puis une deuxième phase à tension constante et courant décroissant pour se rapprocher des 100% de charge en environ une heure à deux heures de plus. Dans notre cas, $A_{charge} = 1Q_{rated} = 8,8A$. Aucune batterie chimique ne peut obtenir 100% d'efficacité énergétique lors de la charge car il y a une dissipation d'énergie sous forme de chaleur. Nous posons $\eta_{battery} = 90\%$ [23, 186]. Aussi, lorsque l'alimentation de l'ordinateur portable converti le courant alternatif du secteur en courant continu il y a également une dissipation d'énergie sous forme de chaleur. Nous supposons que l'alimentation du Lenovo ThinkPad T540p a une efficacité énergétique d'environ $\eta_{supply} = 80\%$. Pour déterminer le courant nominal de décharge de la batterie tiré par l'ordinateur portable $A_{discharge}$, nous avons mesuré pendant 1 heure la puissance tirée au secteur par un Lenovo ThinkPad T540p sans batterie à l'aide d'une prise intelligente Nodon EnOcean connectée à un serveur FHEM sur un Raspberry Pi 3. On observe une puissance moyenne tirée au secteur d'environ 20W. On pose donc que $A_{discharge} = \frac{20W \times \eta_{supply}}{V_{nom}} = 1,44A$. SEDYL ne prend pas en compte l'impact de la profondeur de charge (c.-à-d. le pourcentage de batterie chargé) sur la durée de vie de la batterie qui s'exprime en nombre de cycles de décharge. Or, un cycle de charge complet (c.-à-d. une profondeur de charge de 100% de batterie) induit une température et un courant élevé ce qui réduit la durée de vie de la batterie alors qu'une charge partielle (p. ex., une profondeur de charge de 10% de batterie) réduit le stress et prolonge la durée de vie [23]. Outre la profondeur de décharge, l'intervalle de niveaux de charge affecte la durée de vie de la batterie [195] : des cycles de (dé)charge entre 75% et 65% offrent une durée de vie optimale à la batterie, des cycles de (dé)charge entre 85% et 25% prolongent la durée de vie de la batterie et des cycles de (dé)charge entre 100% à 25% réduisent la durée de vie de la batterie mais offrent la meilleure autonomie à l'utilisateur. Afin de ne pas réduire dramatiquement la durée de vie de la batterie de l'ordinateur portable, nous avons choisi de restreindre la batterie à des cycles de (dé)charge entre $SoC_{max} = 100\%$ et $SoC_{min} = 50\%$ dans nos simulations.

Laptop Configuration	
Q_{rated} (Ah)	V_{nom} (V)
8,8	11,1
$A_{discharge}$ (A)	A_{charge} (A)
1,44	8,8
SoC_{min} (%)	SoC_{max} (%)
50	100
SoC_{total} (%)	SoC_{ennr} (%)
100	0
$\eta_{battery}$ (%)	η_{supply} (%)
90	80

FIGURE 8.5 – La configuration de l'ordinateur portable en entrée de l'outil SEDYL.

Le dernier paramètre rentré dans SEDYL est les usages de l'ordinateur portable. Il prend la forme d'une série de périodes pouvant combiner trois usages différents de l'ordinateur portable :

- *battery + sector* : l'ordinateur consomme l'énergie du secteur nécessaire à son fonctionnement, plus l'énergie du secteur nécessaire au chargement de la batterie si elle n'est pas à 100%.
- *battery* : l'ordinateur ne consomme pas d'énergie du secteur mais consomme l'énergie de la batterie nécessaire à son fonctionnement.
- *sector* : l'ordinateur consomme l'énergie du secteur seulement nécessaire à son fonctionnement.

Par défaut (figure 8.6), les usages sont *battery* de 8h00 à 10h59, *sector* de 11h00 à 12h59 et *battery + sector* de 13h00 à 17h59.

Laptop Usages Data	
<HH:mm>, <HH:mm>, <sector battery battery_sector>	
08:00, 09:59, battery	
10:00, 12:59, sector	
13:00, 18:00, battery_sector	

FIGURE 8.6 – Les usages de l'ordinateur portable en entrée de l'outil SEDYL.

8.4.2 Données en sortie

En sortie, SEDYL calcule (figures 8.7) :

- La quantité d'énergie totale, renouvelable et non renouvelable consommée du secteur par la pratique par défaut.
- La quantité d'énergie totale, renouvelable et non renouvelable consommée du secteur par la pratique donnée.
- La quantité d'énergie non renouvelable non consommée par la pratique donnée par rapport à la pratique par défaut.

	Default usage	Your usage
Total	200.13Wh	207.51Wh
Renewable	146.50Wh (73.20%)	192.56Wh (92.80%)
Nonrenewable	53.63Wh (26.80%)	14.95Wh (7.20%)

Nonrenewable Saving
+38.69Wh (72.13%)

FIGURE 8.7 – Les données calculées par SEDYL en sortie.

En sortie, SEDYL visualise (figures 8.8) :

- Les usages de l'ordinateur portable avec le mix de la production électrique.
- L'énergie totale, renouvelable et non renouvelable consommée au secteur par l'ordinateur portable.
- L'énergie totale, renouvelable et non renouvelable stockée dans la batterie de l'ordinateur portable.

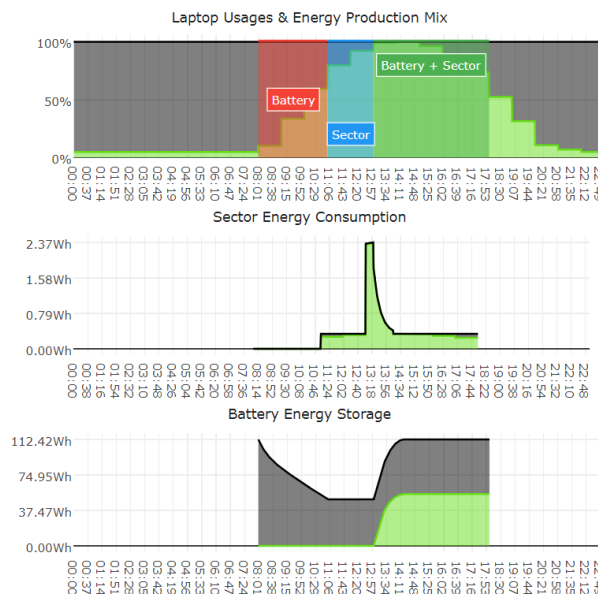


FIGURE 8.8 – Les données visualisées par SEDYL en sortie.

8.5 Exploration du décalage du chargement de batterie sur une courbe typique de production d'énergie solaire

Afin d'explorer de manière réaliste le décalage du chargement de la batterie d'un ordinateur portable avec SEDYL, nous avons cherché à identifier une courbe typique de production EnR pour une journée de travail. Pour cela, nous avons utilisé les courbes de production d'énergie solaire de notre laboratoire d'une année de travail. Sur ces courbes, nous avons appliquée *KmlShape* [68], un algorithme R de clustering basé sur le k-mean, dédié aux séries temporelles de données qui regroupe les séries en fonction de leur forme. Pour déterminer le nombre de clusters à générer, nous avons utilisé *NbCluster* [28], un algorithme R qui détermine le nombre optimal de cluster à générer à partir d'une trentaine d'indicateurs. À partir des résultats de *NbCluster*, nous avons obtenu 2 clusters avec *KmlShape* illustrés en figure 8.9. On observe que *Cluster 1* (57,47% des journées de travail) regroupe principalement des journées printanières et estivales et que *Cluster 2* (45,21% des journées de travail) regroupe principalement des journées automnales et hivernales. Pour la suite, nous avons choisi d'utiliser la trajectoire moyenne de *Cluster 1* comme courbe typique de production d'énergie solaire pour une journée de travail.

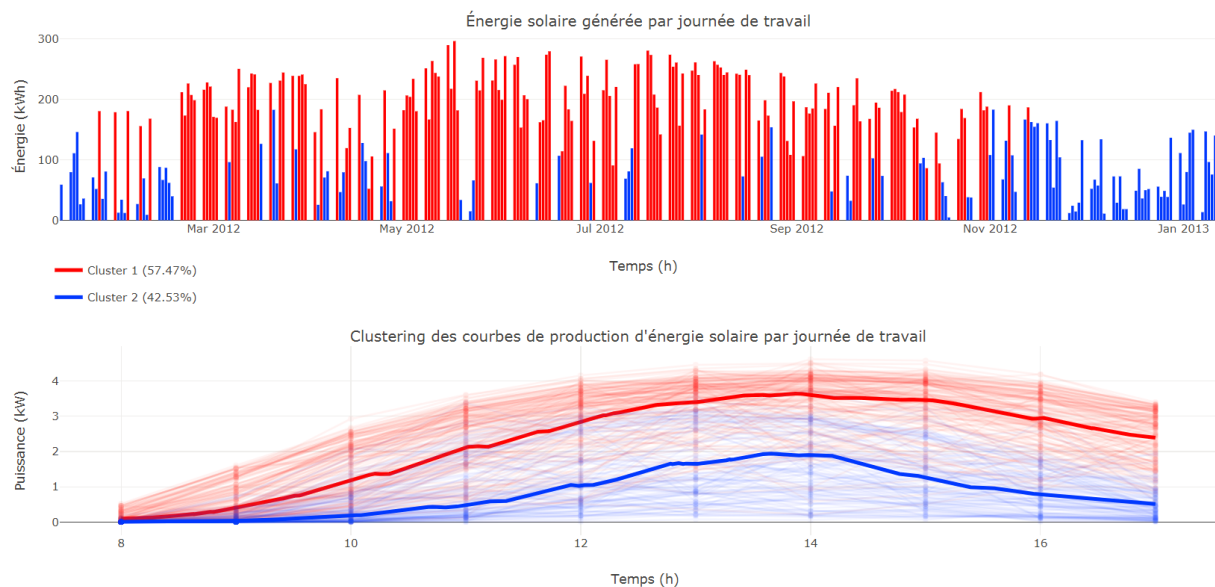


FIGURE 8.9 – Le clustering des courbes de production d'énergie solaire d'une année de travail (8h-17h, lundi-vendredi, 13 janvier 2012-12 janvier 2013, installation photovoltaïque ESTIA, Bidart, France).

8.6 Définition de consignes pour décaler le chargement de batterie d'un ordinateur portable

Une source EnR telle que l'ensoleillement fluctue avec les conditions météorologiques. En conséquence, la production EnR telle que la production d'énergie solaire n'est pas constante mais plutôt une succession de variations. Dans nos simulations avec SEDYL, nous utilisons le terme variation EnR pour décrire une période entre deux heures de creux de production EnR passant par une heure de pic de production EnR. De plus, nous distinguons deux phases dans une variation EnR : les heures ascendantes (de l'heure de creux incluse à l'heure de pic exclue) et les heures descendantes (de l'heure de pic exclue à l'heure de creux incluse). La figure 8.10 illustre les différentes composantes d'une variation EnR.

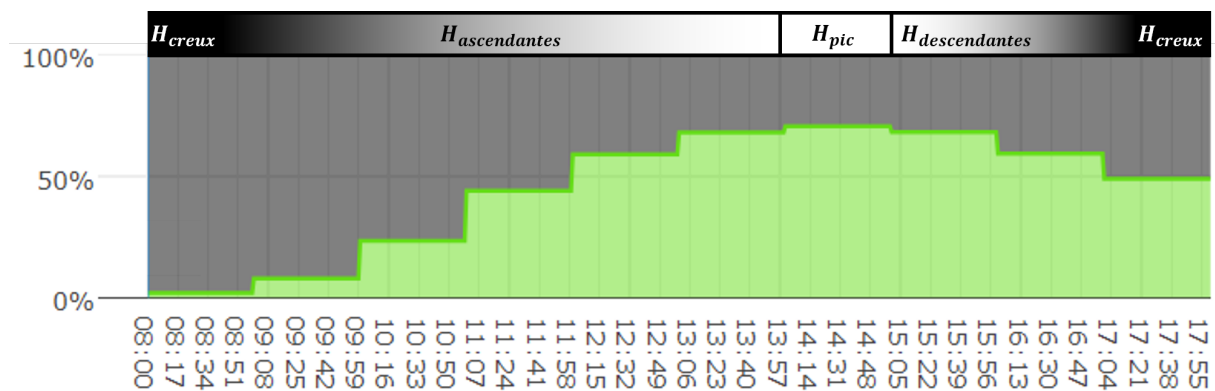


FIGURE 8.10 – Les composantes d'une variation EnR avec la courbe typique de production d'énergie solaire.

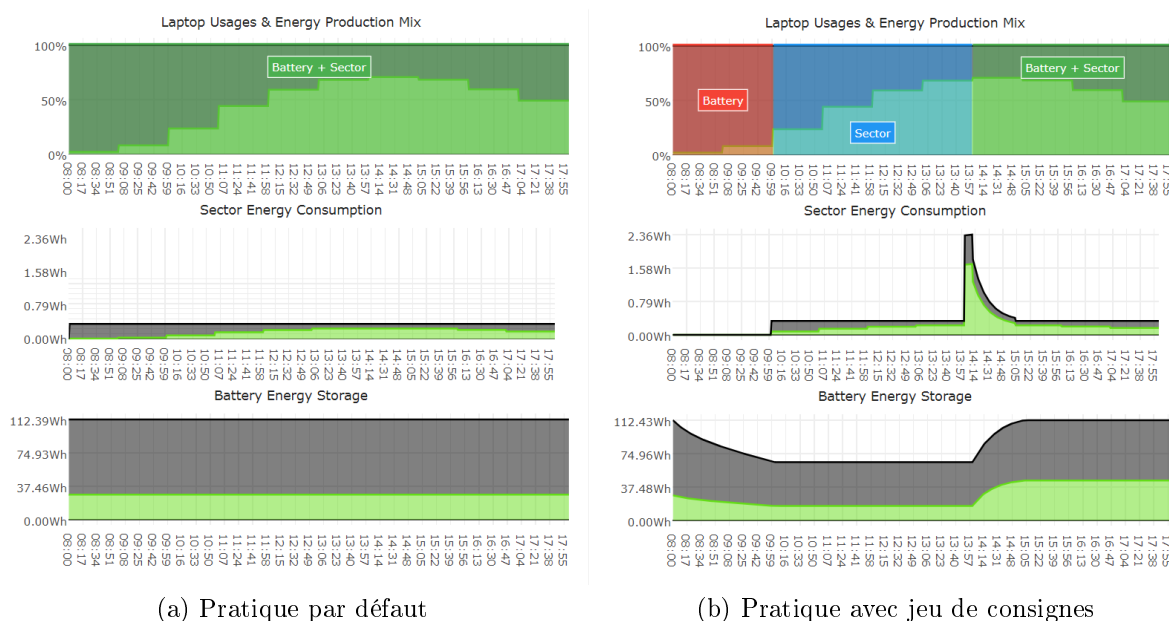
Avec notre configuration d'ordinateur portable, la batterie se décharge de 100% à 50% en 3 heures et se charge de 50% à 100% en 1 heure. Pour décaler le chargement de la batterie pour une variation EnR, nous avons empiriquement (c.-à-d. au travers d'une série de groupes de travail) défini le jeu de consignes suivant :

1. Pendant les heures ascendantes de la variation EnR, *décharger* la batterie et, si la batterie est à 50%, *enlever* la batterie.
2. Pendant l'heure de pic de la variation EnR, *charger* la batterie.
3. Pendant les heures descendantes de la variation EnR, continuer à *charger* la batterie.

On observe que l'application du jeu de consignes avec SEDYL nous a permis de consommer moins d'EnNR (figure 8.11) : -24,44Wh d'EnNR sur la journée soit 22,59% de moins que la pratique par défaut. Pendant que l'on décharge la batterie jusqu'à 50% pendant les heures ascendantes de la variation EnR, on consomme l'énergie de la batterie et on ne consomme pas l'énergie au secteur à faible taux EnR. Cependant à 10h, la batterie est à 50%. Pour éviter de charger la batterie alors que l'énergie au secteur est toujours à un faible taux EnR, on a enlevé la batterie pour consommer l'énergie au secteur seulement

8. Application

nécessaire au fonctionnement de l'ordinateur portable. Ensuite, charger la batterie jusqu'à 100% pendant le pic de la variation EnR permet de concentrer la consommation d'énergie au secteur au moment où le taux EnR est le meilleur. Enfin, continuer à charger la batterie pendant les heures descendantes de la variation EnR sert seulement à maintenir la batterie à 100% en attendant de pouvoir réappliquer la pratique.



	Default usage	Your usage
Total	197.14Wh	202.54Wh
Renewable	88.99Wh (45.14%)	118.83Wh (58.67%)
Nonrenewable	108.15Wh (54.86%)	83.72Wh (41.33%)
Nonrenewable Saving		
	+24.44Wh (22.59%)	

(c) Résultats

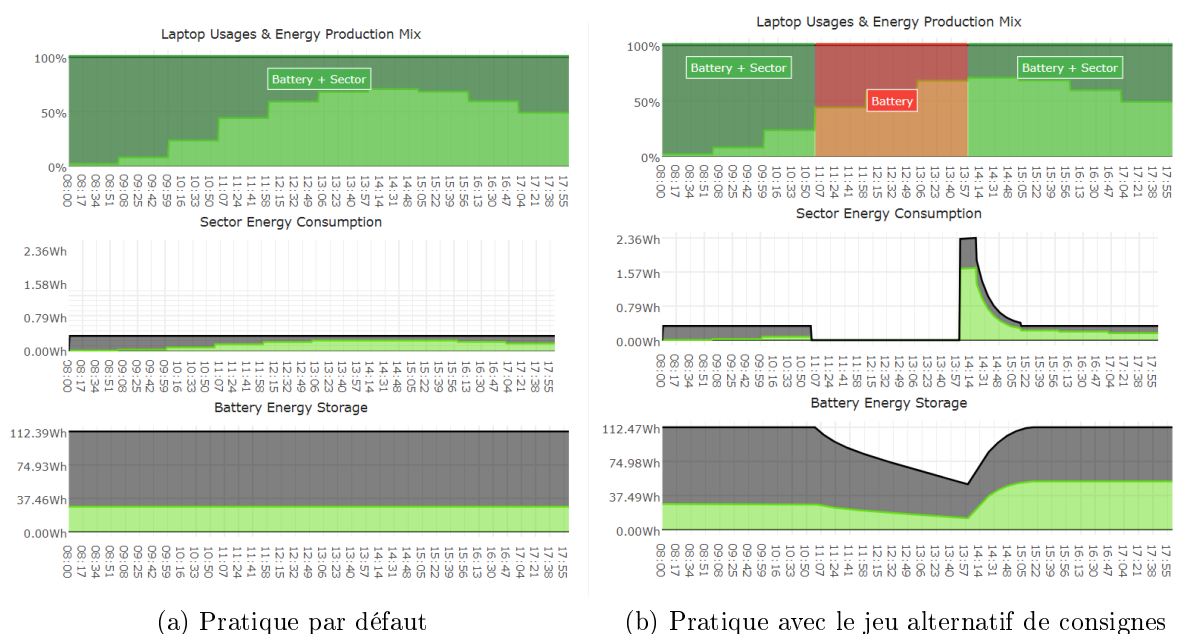
FIGURE 8.11 – L'application du jeu de consignes avec SEDYL sur la courbe typique de production d'énergie solaire.

Pour les employés qui ne souhaitent pas (p. ex., car trop contraignant) ou ne peuvent pas (p. ex., Mac Book) enlever la batterie de leur ordinateur portable, nous avons défini un jeu alternatif de consignes :

1. Pendant les heures ascendantes de la variation EnR, *décharger* la batterie à 50%.
2. Pendant l'heure de pic de la variation EnR, *charger* la batterie.
3. Pendant les heures descendantes de la variation EnR, continuer à *charger* la batterie.

8.7. Caractérisation du décalage du chargement de la batterie d'un ordinateur portable

On observe que l'application du jeu alternatif de consignes avec SEDYL nous a permis de consommer moins d'EnNR (figure 8.12) : -5,84Wh d'EnNR sur la journée soit 5,41% de moins que la pratique par défaut. En déchargeant la batterie jusqu'à 50% juste avant l'heure de pic de la variation EnR, nous avons évité de consommer l'énergie du secteur à un taux EnR moyen.



	Default usage	Your usage
Total	200.13Wh	207.51Wh
Renewable	90.39Wh (45.17%)	103.71Wh (49.98%)
Nonrenewable	109.74Wh (54.83%)	103.79Wh (50.02%)
Nonrenewable Saving		
	+5.95Wh (5.42%)	

(c) Résultats

FIGURE 8.12 – L'application du jeu alternatif de consignes avec SEDYL sur la courbe typique de production d'énergie solaire.

8.7 Caractérisation du décalage du chargement de la batterie d'un ordinateur portable

La différence entre les résultats des deux jeux de consignes avec SEDYL, nous a permis de comprendre que le taux EnR décalé par la pratique caractérise l'ampleur des économies

EnNR à réaliser. Le taux EnR décalé par la pratique est défini par :

$$\Delta EnR_{pratique} = EnR_{charge} - EnR_{decharge}$$

$$EnR_{charge} = \frac{1}{duration_{charge}} \sum_{h=start_{charge}}^{start_{charge}+duration_{charge}} EnR(h)$$

$$EnR_{decharge} = \frac{1}{duration_{decharge}} \sum_{h=start_{decharge}}^{start_{decharge}+duration_{decharge}} EnR(h)$$

Avec :

$EnR_{decharge}$: le taux EnR moyen pendant la période de décharge de la batterie.

EnR_{charge} : le taux EnR moyen pendant la période de charge de la batterie.

$start_{charge}$: l'heure de début du chargement de la batterie.

$start_{decharge}$: l'heure de début du déchargement de la batterie.

$duration_{decharge}$: la durée du déchargement de la batterie (en heures).

$duration_{charge}$: la durée du chargement de la batterie (en heures).

$EnR(h)$: le taux EnR de l'heure h .

Pour la suite, nous utilisons seulement le jeu alternatif de consignes avec SEDYL car il s'agit du jeu de consignes minimum pour appliquer la pratique. Pour $duration_{decharge} = 3h$ et $duration_{charge} = 1h$, l'application du jeu alternatif de consignes avec SEDYL sur deux courbes fictives de production d'énergie renouvelable (figure 8.13) montre que :

- $\Delta EnR_{pratique} = 0\%$: la pratique a consommé 7,31Wh d'EnNR en plus soit 3,71% de plus que la pratique par défaut. L'hypothèse n'est pas validée. Cette surconsommation d'EnNR est causée par l'efficacité énergétique de la batterie (90%) et du chargeur (80%) qui entraîne une augmentation de la consommation d'énergie totale (EnNR et EnR) du secteur lors de la charge de la batterie.
- $\Delta EnR_{pratique} = 100\%$: la pratique a consommé 53,14Wh d'EnNR de moins soit 32,41% de moins que la pratique par défaut.

Pour la configuration d'ordinateur portable que nous avons utilisé, on observe qu'appliquer le jeu alternatif de consignes permet de consommer moins d'EnNR que la pratique par défaut lorsque $\Delta EnR_{pratique} > 11.128\%$ (figure 8.14).

8.7. Caractérisation du décalage du chargement de la batterie d'un ordinateur portable

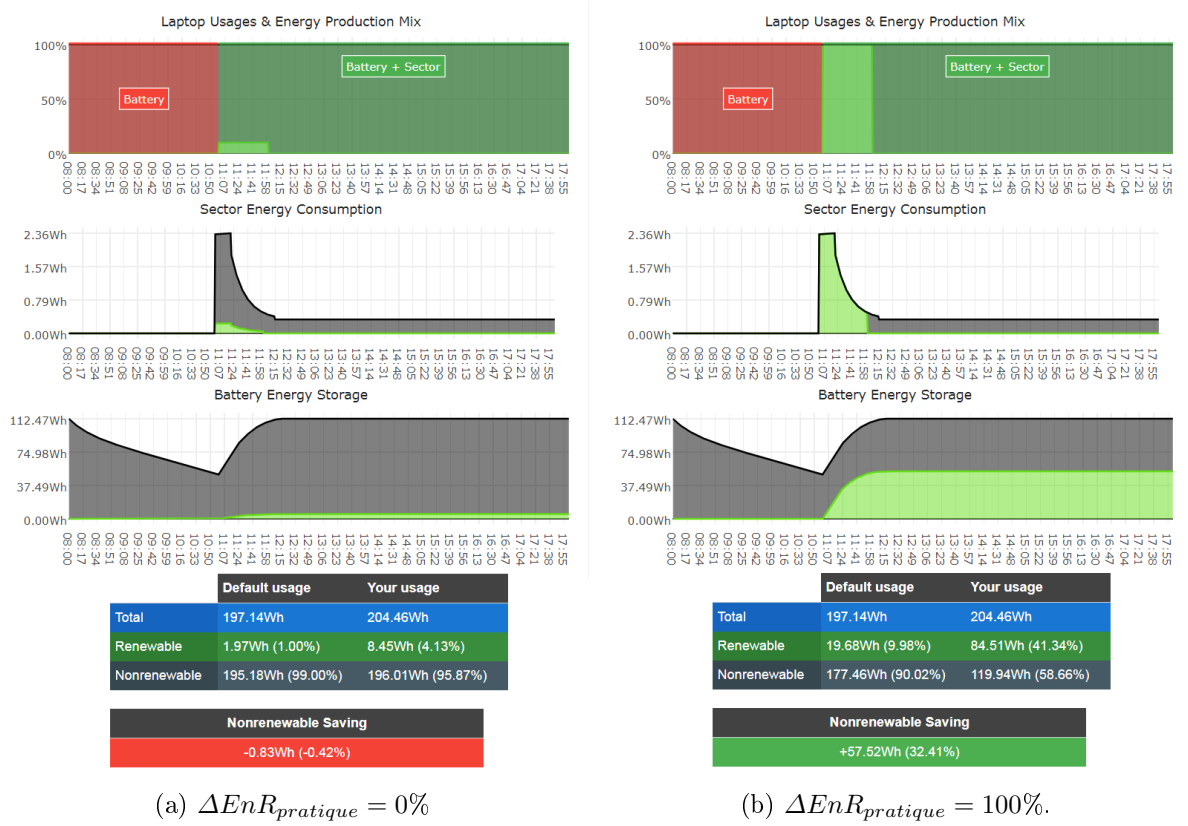


FIGURE 8.13 – L'application du jeu alternatif de consignes avec SEDYL pour deux courbes fictives de production EnR.

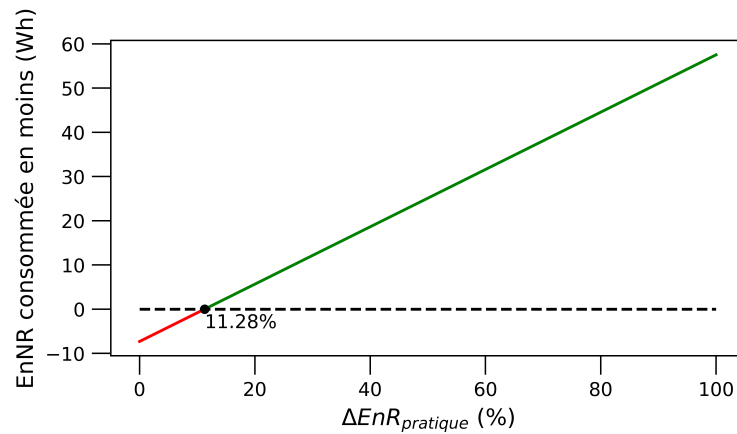


FIGURE 8.14 – L'EnNR consommée en moins que la pratique par défaut en fonction de $\Delta EnR_{pratique}$ pour $duration_{décharge} = 3h$ et $duration_{charge} = 1h$.

8.8 Restreindre le décalage du chargement de batterie à certaines variations

L'application du jeu alternatif de consignes avec SEDYL, nous montre qu'il est possible de réaliser des économies d'EnNR par rapport à la pratique par défaut. Cependant, lorsque l'efficacité énergétique de la batterie est à 90% et que celle de l'alimentation est à 80%, appliquer le jeu alternatif de consignes permet de consommer moins d'EnNR que la pratique par défaut seulement lorsque $\Delta EnR_{pratique} > 11,128\%$. Pour éviter que les employés décalent inutilement le chargement de la batterie de leur ordinateur portable, nous filtrons les variations qui ne permettent pas de consommer moins d'EnNR que la pratique par défaut avec le jeu alternatif de consignes. Nous avons fait le choix de conserver les variations qui permettent à la pratique de décaler un taux EnR supérieure à 20% ($\Delta EnR_{pratique} > 20\%$). Le taux EnR décalable par la pratique pendant une variation est défini par :

$$\Delta EnR_{variation} = \Delta EnR_{peak} - \Delta EnR_{ascending}$$

$$\Delta EnR_{peak} = \frac{1}{duration_{charge}} \sum_{h=start_{peak}}^{start_{peak}+duration_{charge}} EnR(h)$$

$$\Delta EnR_{ascending} = \frac{1}{duration_{decharge}} \sum_{t=start_{peak}-duration_{decharge}}^{start_{peak}} EnR(h)$$

Avec :

$EnR_{ascending}$: le taux EnR moyen pendant la période de décharge de la batterie avant le pic de la variation EnR.

EnR_{peak} : le taux EnR moyen pendant la période de charge de la batterie à partir du pic de la variation EnR.

$start_{peak}$: l'heure de pic de la variation EnR.

$duration_{decharge}$: la durée du déchargement de la batterie (en heures).

$duration_{charge}$: la durée du chargement de la batterie (en heures).

$EnR(h)$: le taux EnR de l'heure h .

Pour $duration_{decharge} = 3h$ et $duration_{charge} = 1h$, les variations avec $\Delta EnR_{variation} < 20\%$ représentent 28% des variations de production d'énergie solaire sur une année de travail (figure 8.15).

8.9. Exploration du décalage du chargement de batterie pour d'autres séries et formes de variation

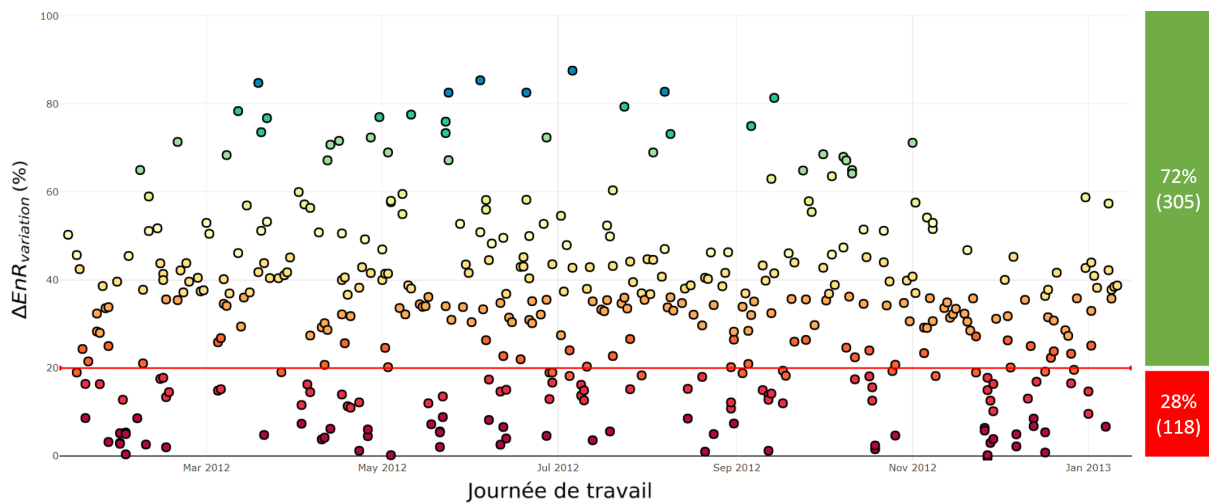


FIGURE 8.15 – Les variations de production d'énergie solaire sur une année de travail en fonction de $\Delta EnR_{variation}$ pour $duration_{decharge} = 3h$ et $duration_{charge} = 1h$ (8h-17h, lundi-vendredi, 13 janvier 2012-12 janvier 2013, installation photovoltaïque ESTIA, Bidart, France).

8.9 Exploration du décalage du chargement de batterie pour d'autres séries et formes de variation

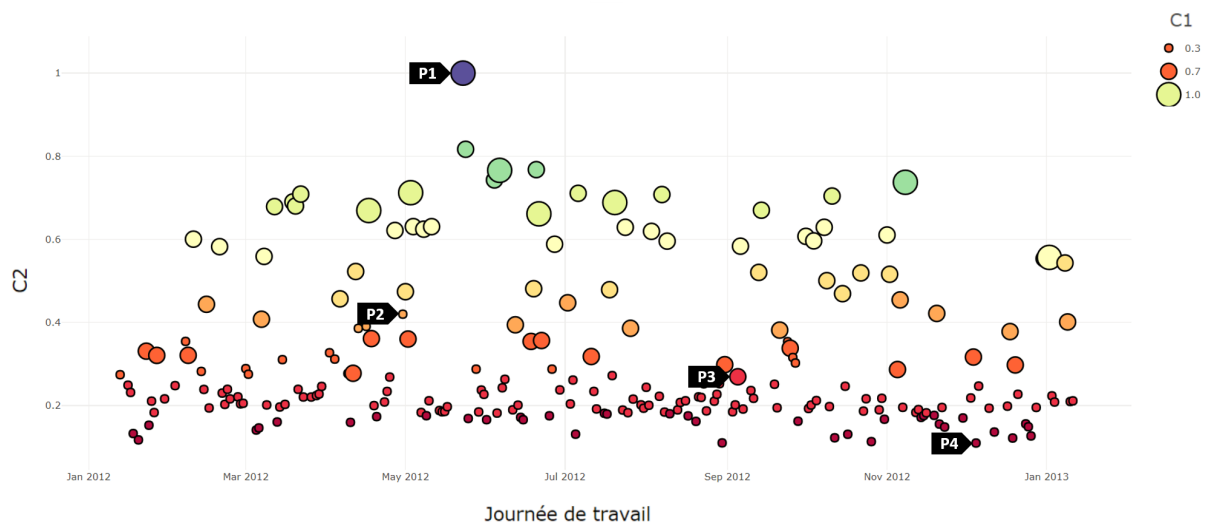


FIGURE 8.16 – Les courbes de production d'énergie solaire sur une année de travail en fonction de $C1$ et $C2$ (8h-17h, lundi-vendredi, 13 janvier 2012-12 janvier 2013, installation photovoltaïque ESTIA, Bidart, France). $P1$, $P2$, $P3$, $P4$ sont les quatre courbes aux extrémités de l'espace $(C1, C2)$.

Jusqu'à présent, nous avons appliqué le jeu alternatif de consignes sur une courbe typique de production d'énergie solaire. Cependant, cette courbe typique offre une seule variation longue et ample qui ne représente pas toutes les séries et formes de variation que les employés peuvent rencontrer pendant une journée de travail. À priori, chaque variation avec $\Delta EnR_{variation} > 20\%$ est une opportunité à saisir pour décaler un chargement de batterie et la valeur de $\Delta EnR_{variation}$ détermine l'intérêt à saisir cette opportunité. En conséquence, nous avons discriminé les courbes de production d'énergie solaire du laboratoire d'une année de travail selon deux scores normalisés :

- $C1$: le nombre de variations avec $\Delta EnR_{variation} > 20\%$ pendant la journée de travail.
- $C2$: la somme des $\Delta EnR_{variation}$ des variations avec $\Delta EnR_{variation} > 20\%$ pendant la journée de travail.

À partir de ces deux scores, nous avons extrait les quatre courbes aux extrémités de l'espace $\binom{C1}{C2}$ (figure 8.16) :

- $P1$: la courbe qui maximise $C1$ et $C2$ (23 mai 2012).
- $P2$: la courbe qui minimise $C1$ et maximise $C2$ (30 avril 2012).
- $P3$: la courbe qui maximise $C1$ et minimise $C2$ (5 septembre 2012).
- $P4$: la courbe qui minimise $C1$ et $C2$ (5 décembre 2012).

On observe que l'application du jeu alternatif de consignes sur ces courbes (figure 8.17) montre que l'on arrive toujours à consommer moins d'EnNR que la pratique par défaut.

8.9. Exploration du décalage du chargement de batterie pour d'autres séries et formes de variation

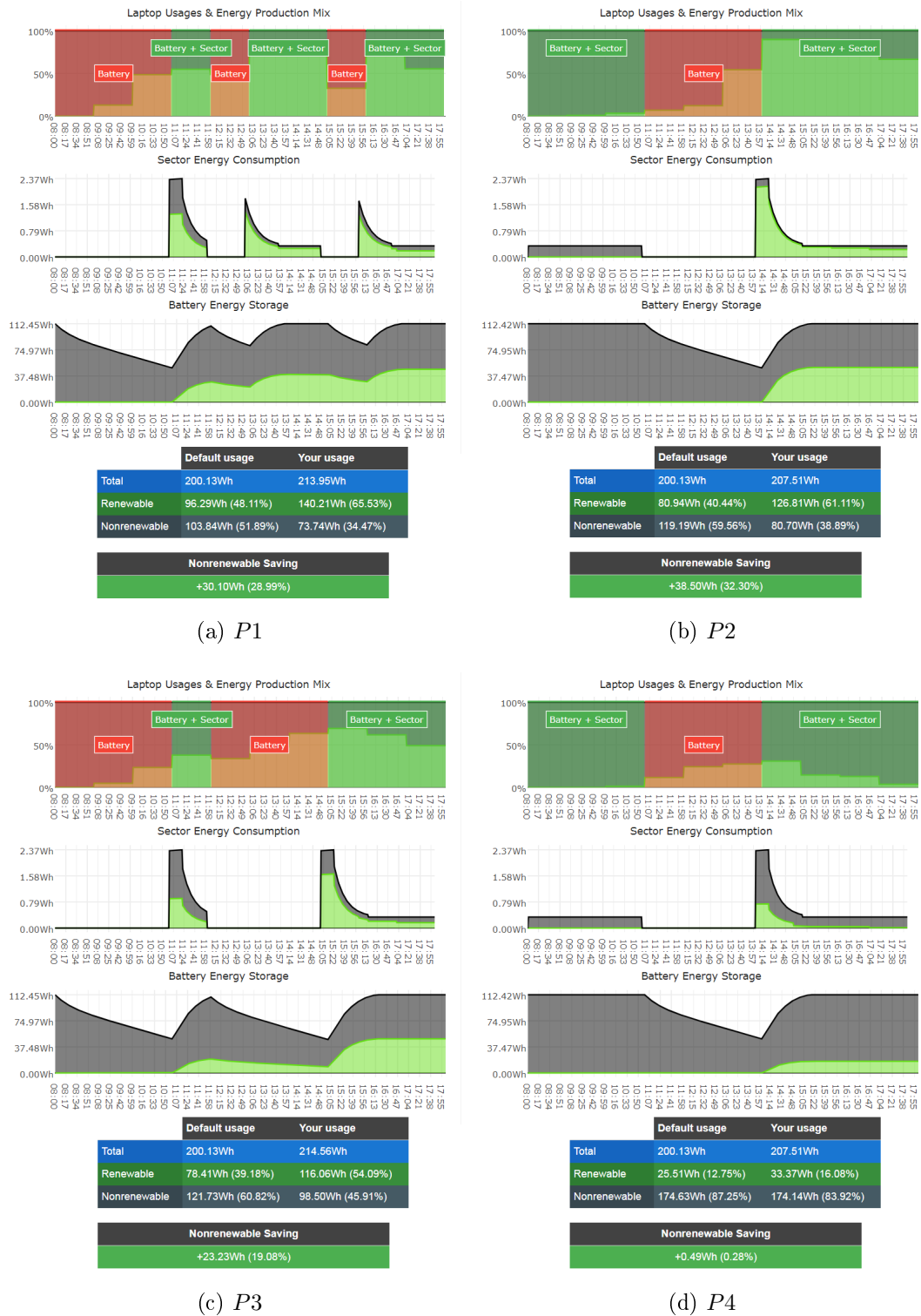


FIGURE 8.17 – L'application du jeu alternatif de consignes avec SEDYL sur les 4 courbes aux extrémités de l'espace $(C_1^{C_2})$ pour $duration_{decharge} = 3h$ et $duration_{charge} = 1h$ (8h-17h, lundi-vendredi, 13 janvier 2012-12 janvier 2013, installation photovoltaïque ESTIA, Bidart, France).

8.10 Estimation du potentiel de propreté énergétique du décalage du chargement de batterie d'un ordinateur portable au travail

Afin d'estimer le potentiel de propreté énergétique du décalage du chargement de batterie d'un ordinateur portable au travail, nous avons appliqué le jeu alternatif de consignes sur chaque courbe de production d'énergie solaire de notre laboratoire sur une année de travail. Pour $duration_{decharge} = 3h$ et $duration_{charge} = 1h$, les variations avec $\Delta EnR > 20\%$ représentent un potentiel annuel d'économie EnNR de 5202Wh (figure 8.18) soit plus de 10 jours de fonctionnement d'un Lenovo ThinkPad T540p ou encore :

- Utiliser une douche avec chauffe-eau électrique de 10,000W pendant 31 minutes.
- Garder un chauffe-eau électrique de 3000W allumé plus de 1 heure et demi.
- Cuisiner avec un four de 2000W pendant plus de 2 heures et demi.
- Lancer un lave-vaisselle de 1500W pendant plus de 3 heures et demi.
- Regarder un téléviseur plasma de 400W pendant plus de 13h.
- Garder un routeur haut débit à 10W allumé pendant plus de 21 jours.

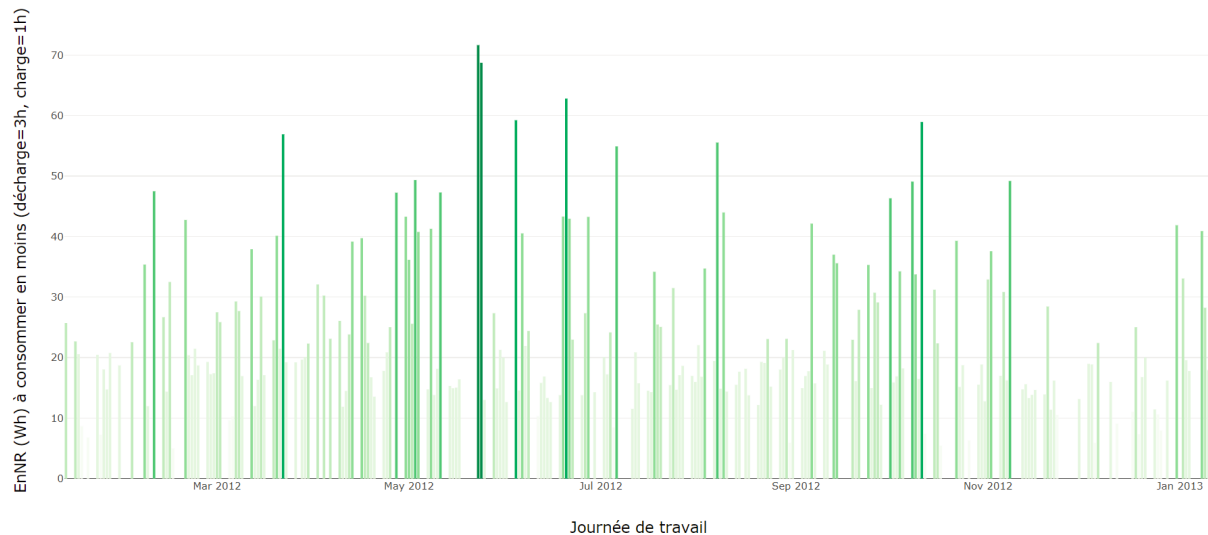


FIGURE 8.18 – L'EnNR potentielle à consommer en moins pour chaque journée de travail en appliquant le jeu alternatif de consignes avec SEDYL pour $duration_{decharge} = 3h$ et $duration_{charge} = 1h$ (8h-17h, lundi-vendredi, 13 janvier 2012-12 janvier 2013, installation photovoltaïque ESTIA, Bidart, France).

8.11 Affichage d'un histogramme sur le lieu de travail pour aider à décaler le chargement de batterie des ordinateurs portables

Pour aider les employés à appliquer les jeux de consignes *in situ*, nous proposons un histogramme vertical à afficher pour les afficheurs sur le lieu de travail (voir figure 8.19). Ledit histogramme visualise l'heure actuelle : l'heure actuelle est représentée avec CairnFORM/CairnSCREEN par l'anneau bleu/la barre bleue. Aussi, il visualise une à une les variations de production locale d'énergie renouvelable à venir pendant la journée de travail : la production locale d'énergie renouvelable de chaque heure de la variation est représentée avec CairnFORM/CairnSCREEN par la largeur des anneaux verts/les barres vertes. Plus la production locale d'énergie renouvelable sera grande pendant l'heure, plus l'anneau/la barre est large. Enfin, l'histogramme visualise la plus grande profondeur de charge réalisée par les employés pour les heures passées de la journée de travail : la plus grande profondeur de charge pour chaque heure passée est représentée avec CairnFORM/CairnSCREEN par la couleur des anneaux/barres précédents l'anneau bleu/la barre bleue. Plus la profondeur de charge était grande pendant l'heure, plus l'anneau vert/la barre verte devient blanc/blanche.

Les paragraphes suivants justifient notre choix de visualiser une à une les variations de production locale d'énergie renouvelable à venir pendant la journée de travail et de visualiser la plus grande profondeur de charge réalisée par les employés pour les heures passées de la journée de travail.



(a) CairnSCREEN *in situ*



(b) CairnFORM *in situ*

FIGURE 8.19 – L'histogramme vertical avec un afficheur planaire (a) et un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution (b) sur un lieu de travail.

Visualiser une à une les variations de production locale d'énergie renouvelable à venir pendant la journée de travail. Permettre aux utilisateurs de comparer des prévisions sur la production locale d'énergie renouvelable est une fonction communément implémentée par les systèmes interactifs pour la propreté énergétique (4 sur 10 SIPs) [34, 110, 157, 165]. Les systèmes en question permettent aux utilisateurs de comparer les prévisions de toutes les minutes de la prochaine heure [157], de toutes les heures restantes de la journée [157, 34], de toutes les heures des 12 prochaines heures [110] ou

8. Application

encore de toutes les heures des 24 prochaines heures [34]. Pour visualiser ces prévisions, les systèmes utilisent des diagrammes à frises chronologiques linéaires (figure 8.20b et 8.20d) ou circulaires (figure 8.20a et 8.20b) et des diagrammes à courbes (figure 8.20a, 8.20c et 8.20d).

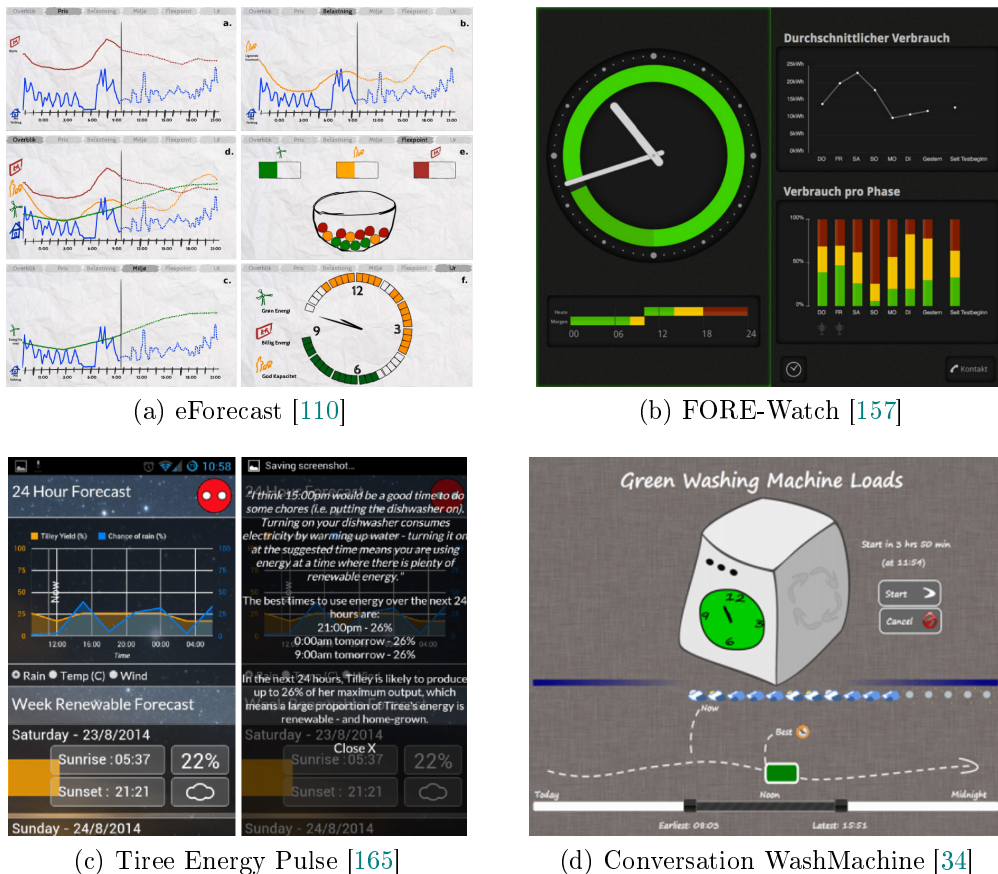


FIGURE 8.20 – Les quatre systèmes interactifs pour la propreté énergétique qui visualisent des prévisions pour permettre aux utilisateurs de les comparer et planifier leur usage en énergie en fonction de la disponibilité à venir des EnRs.

Afin d'appliquer les jeux de consignes précédemment définis, les employés devront être en mesure d'identifier l'heure de pic de chaque variation à venir pendant la journée de travail. Le diagramme à courbes et le diagramme à barres (p. ex., un histogramme) sont deux visualisations de données connues pour leur efficacité lorsqu'il s'agit de mettre en évidence une discontinuité dans une série temporelle de données [176] telle que pourrait l'être l'heure de pic d'une variation. Nous avons fait le choix d'utiliser un histogramme pour visualiser heure par heure les prévisions de la journée de travail (8h-17h). Pour permettre aux utilisateurs de mettre le jeu de consignes en pratique sur de tels histogrammes, nous avons réalisé une série de trois études pilotes et itéré sur trois versions d'histogrammes à barres verticales :

8.11. Affichage d'un histogramme sur le lieu de travail pour aider à décaler le chargement de batterie des ordinateurs portables

- *Hist1* : un histogramme à barres verticales visualisant les prévisions pour la journée de travail.
- *Hist2* : *Hist1* + un gradient de blanc à noir pour chaque heure en fonction de la distance au pic de la variation. Cela afin de permet de mettre en évidence le pic de chaque variation EnR.
- *Hist3* : *Hist2* + un fenêtrage variation par variation. Ceci afin d'isoler le pic de chaque variation.

Pour chacune de ces études pilotes, les participants disposaient d'une série de quatre histogrammes horizontaux imprimés sur feuille A4 visualisant respectivement les données des courbes de production d'énergie solaire *P1*, *P2*, *P3* et *P4* (figure 8.21). En dessous de chaque heure de l'histogramme se trouvait une case vide à cocher et les participants devaient effectuer la tâche de recherche d'information suivante [96] :

- $T_{compare}$: cochez l'heure des pics de production d'énergie renouvelable de la journée de travail.

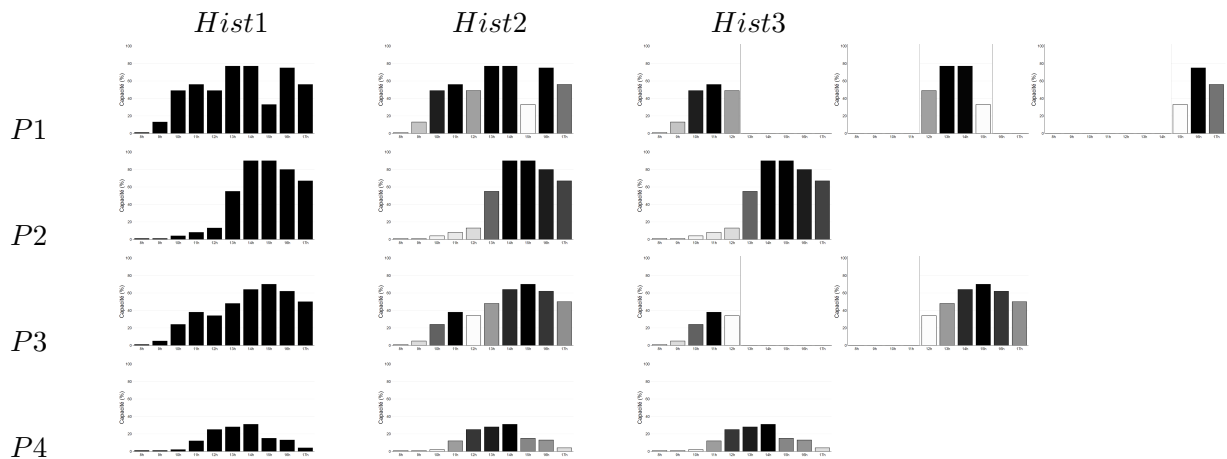


FIGURE 8.21 – Les trois versions d'histogrammes horizontaux à barres graphiques *Hist1*, *Hist2* et *Hist3* visualisant les données *P1*, *P2*, *P3* et *P4*.

En résultats des études pilotes sur les histogrammes horizontaux à barres, on observe que :

- *Pilot1* : avec *Hist1* (3 femmes, 4 hommes), la majorité des participants (5 sur 7) ont identifié un pic EnR 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 variation EnR dans une journée de travail et donc plusieurs pics EnR, comme relevé par un participant (**P2** : «*De temps en temps, il y a des pics locaux.*»).
- *Pilot2* : avec *Hist2* (3 femmes, 4 hommes), à nouveau, certains participants (3 sur 7) ont identifié un pic EnR 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 EnR 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.*»).

- *Pilot3* : avec *Hist3* (2 femmes, 5 hommes), tous les participants ont identifié tous les pics EnR.

Visualiser toutes les variations de la journée de travail (*Hist1* et *Hist2*) n'a pas permis aux participants de retrouver tous les pics alors que visualiser les variations une à une (*Hist3*) l'a permis. Nous avons fait le choix de visualiser une à une les variations à venir pendant la journée de travail.

Visualiser la plus grande profondeur de charge réalisée par les employés pour les heures passées de la journée de travail. À de multiples reprises, les systèmes du corpus ont montré que les fonctions de feedback sur les conséquences du comportement contribuent à sensibiliser les utilisateurs non engagés à un comportement problématique (p. ex., [21, 142, 108, 136, 58, 200]) et à aider les utilisateurs engagés à réaliser et pérenniser un nouveau comportement (p. ex., [111, 157, 138, 67, 52, 159]). Dans notre cas, il s'agit pour les afficheurs sur le lieu de travail de sensibiliser les employés non engagés et d'aider les employés engagés à réaliser et pérenniser une pratique de décalage du chargement de batterie des ordinateurs portables. Appliquer parfaitement les jeux de consignes que nous avons défini pour la pratique, implique de charger la batterie de 50% à 100% pendant l'heure du pic de la variation EnR, soit une profondeur de charge de 50%. Nous avons fait le choix de visualiser heure par heure la plus grande profondeur de charge réalisée par les employés pendant les heures passées de la journée de travail : plus la grande profondeur de charge pendant l'heure est proche de 50%, plus la barre verte devient blanche (figure 8.19). Visualiser la plus grande profondeur de charge réalisée par les employés plutôt que la moyenne des profondeurs de charge des employés évite de «noyer dans la masse» la bonne application du jeu de consignes par un employé.

Conclusion

Nous soutenons que la symétrie de révolution est utilisable pour informer les utilisateurs par physicalisation des données, que le changement de symétrie de révolution est utilisable pour notifier sans déranger les utilisateurs par interaction périphérique et que les afficheurs cylindriques à symétrie dynamique de révolution offrent une expérience utilisateur sur la durée supérieure aux afficheurs planaires.

Dans cette thèse, nous avons réalisé des travaux de recherche sur l'utilité et l'utilisabilité de la symétrie dynamique de révolution pour les afficheurs cylindriques à changement de forme. Ces travaux contribuent aux interfaces à changement de forme et à deux de leurs domaines d'application, la physicalisation des données et l'interaction périphérique. Nous avons également étudié un cas d'usage pour les afficheurs sur les espaces collectifs et publics, c'est-à-dire la gestion de la demande en énergie.

Interfaces à changement de forme. Nous avons imaginé RevoFORM, un concept d'afficheur cylindrique à changement de forme. RevoFORM dispose de deux types de changement de forme : l'asymétrie dynamique de révolution (p. ex., pour faire apparaître une image d'un visage en relief sur une partie de la surface cylindrique) et la symétrie dynamique de révolution (p. ex., pour passer d'une surface cylindrique à une surface conique). Nous avons présenté CairnFORM, un prototype d'afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution utilisant une pile modulaire d'anneaux extensibles illuminés. Nous avons montré que les afficheurs cylindriques à symétrie dynamique de révolution offrent une expérience utilisateur sur la durée supérieure aux afficheurs planaires : après deux mois en contexte d'usage sur un lieu de travail, nous avons observé que CairnFORM est aussi pragmatique mais plus hédonique qu'un écran plat. Cette différence de qualité hédonique sur la durée peut s'expliquer par l'aspect fascinant de la symétrie dynamique de révolution.

À l'avenir, il serait intéressant de comparer l'expérience utilisateur sur la durée avec un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution (p. ex., CairnFORM) et celle avec un type similaire d'afficheur (p. ex., un afficheur cylindrique traditionnel) et cela pour d'autres tâches en contexte d'usage (p. ex., pour observer des propriétés qui rendent les afficheurs cylindriques à symétrie dynamique de révolution supérieures aux afficheurs cylindriques traditionnels pour certaines tâches en termes de qualité hédonique ou de qualité pragmatique).

Au-delà de la symétrie dynamique de révolution uniquement en sortie du système, on pourrait étudier la symétrie dynamique de révolution à la fois comme entrée et sortie du système. Par exemple avec CairnFORM2, un prototype utilisant un servomoteur avec retour analogique par anneau (entrée et sortie) plutôt qu'un moteur pas-à-pas avec un capteur de fin de course par anneau comme CairnFORM (sortie uniquement). Avec un tel prototype, on imagine des applications utilisant la symétrie de révolution pour représenter et manipuler directement des informations numériques à 360° de manière identique. Par exemple, un CairnFORM2 à 5 anneaux déployé dans le salon d'une maison avec chaque anneau incarnant la température d'une pièce (c.-à-d. salon, cuisine, salle de bain, chambre, bureau) : une température de 19° est représentée par un anneau blanc à moitié ouvert. Plus la température est inférieure/supérieure à 19° , plus l'anneau se referme/s'ouvre et devient bleu/rouge. L'utilisateur peut tirer/appuyer sur un anneau pour l'ouvrir/le refermer et ainsi augmenter/baisser la température de la pièce associée. En l'état, CairnFORM et CairnFORM2 ne sont pas aussi génériques que les afficheurs planaires actuels (p. ex., un écran LED). Pour autant, on pourrait remplacer les LEDs des arcs des anneaux de CairnFORM par des écrans LEDs flexibles et ainsi obtenir un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution pouvant afficher autant d'informations que les afficheurs planaires actuels. Avec une telle technologie, on peut imaginer des applications où on remplacerait les multiples afficheurs planaires des espaces sociaux ouverts (p. ex., stades, aéroports, gares) par un unique afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution. Par exemple, un tel afficheur serait suspendu au milieu d'une gare. Chaque anneau de l'afficheur serait dédié à l'arrivée/départ d'un train et les informations relatives au train défileraient autour de cet anneau (p. ex., provenance/destination, heure d'arrivée/départ). Plus l'arrivée/le départ du train serait proche, plus l'anneau s'ouvrirait pour ainsi représenter une *priorité* par ordre d'arrivée/de départ des trains. Enfin, un afficheur cylindrique à symétrie dynamique de révolution pourrait exister à différentes échelles telles qu'à l'échelle d'un bureau (p. ex., 30 cm de hauteur, 10-20 cm de largeur), d'un hall (p. ex., 100 cm de hauteur, 30-60 cm de largeur), d'un rond point (p. ex., 300 cm de hauteur, 100-200 cm de largeur) ou d'un bâtiment (p. ex., comme le projet de la tour Da Vinci par David Fisher en figure 8.22).



FIGURE 8.22 – Le projet de la tour Da Vinci à Dubai (Émirats arabes unis) proposée par l'architecte David Fisher.

Physicalisation des données. Nous avons montré que la symétrie de révolution est utilisable pour informer les utilisateurs par physicalisation des données : nous observons avec un CairnFORM à 10 anneaux qu'un histogramme à anneaux physiques est plus efficace pour une tâche d'intervalle et une tâche de comparaison plutôt que pour une tâche d'ordonnancement. Avec un histogramme à anneaux physiques visualisant des variations de données ordinales avec une amplitude et une durée différente, on observe que l'utilisateur accomplit avec succès une tâche d'intervalle et une tâche de comparaison. Cependant, ce n'est pas le cas pour une tâche d'ordonnancement : plus la variation visualisée par l'histogramme est ample et longue, moins l'utilisateur a de succès pour la tâche d'ordonnancement.

À l'avenir, on pourrait étudier l'efficacité des histogrammes à anneaux physiques au-delà des variations de données ordinales afin d'étendre ces résultats. Un histogramme à anneaux physiques est la symétrie de révolution d'un histogramme à barres physiques. On pourrait chercher à comparer l'efficacité des histogrammes à anneaux physiques et celle des histogrammes à anneaux physiques pour des tâches de recherche d'information (p. ex., temps de complétion et taux de réussite des tâches) afin de montrer que l'efficacité de ces deux types d'histogrammes physiques est similaire, voire identique.

Interaction périphérique. Nous avons montré que le changement de symétrie de révolution est utilisable pour notifier sans déranger les utilisateurs par interaction périphérique : nous observons avec un CairnFORM à 1 anneau que le changement de diamètre d'un anneau avec vitesse exponentielle est perçu plus souvent et plus calmement en périphérie de l'attention plutôt qu'avec une vitesse constante ou logarithmique. Lorsque l'utilisateur effectue une tâche de mémorisation dans le champ de vision centrale au centre de l'attention, le changement de diamètre d'un anneau avec une vitesse exponentielle dans le champ de vision périphérique en périphérie de l'attention est perçu plus souvent et plus calmement qu'avec une vitesse logarithmique ou constante. Cependant, le manque de difficulté et la nature de la tâche cognitive utilisée ont potentiellement influencé ces résultats.

Il serait intéressant d'étudier d'autres tâches cognitives avec différentes difficultés pour étendre ces résultats. Aujourd'hui, l'attention périphérique de l'utilisateur est principalement estimée à l'aide de méthodes d'évaluation qualitatives avant ou après l'expérimentation (p. ex., questionnaires, entretiens). On pourrait explorer des méthodes d'évaluation quantitatives pendant l'expérimentation telle que l'estimation en temps-réel de l'attention, de la charge de travail et de la reconnaissance d'erreur par l'analyse des signaux cérébraux mesurés par électroencéphalographie [66].

Gestion de la demande en énergie. Par une revue de la littérature, nous avons dressé le paysage actuel de l'interaction homme-machine pour la gestion de la demande en énergie et nous avons identifié les tendances de conception et de mise en œuvre d'un corpus de 67 systèmes interactifs conçus pour promouvoir la sobriété énergétique (consommer moins) et la propreté énergétique (consommer mieux) discriminés selon 5 classes, 16 critères et 73 caractéristiques. À partir de cette analyse, nous discutons des différents

types d'interfaces utilisateur adaptés pour chaque étape du modèle transthéorique du changement de comportement et notamment de la place des interfaces fixes ambiantes (p. ex., les afficheurs) déployés sur les espaces collectifs et publics. Nous avons étudié un cas d'usage pour les afficheurs sur le lieu de travail concernant la propreté énergétique, c'est-à-dire aider les employés à décaler manuellement le chargement de la batterie de leur ordinateur portable vers les heures de pic de production locale d'énergie renouvelable.

À l'avenir, on pourrait chercher à optimiser cette pratique en l'automatisant à l'aide d'un utilitaire installé sur les ordinateurs portables qui réaliserait des micro-charges en fonction de la disponibilité en énergie renouvelable locale à venir. Par exemple, des beacons Bluetooth Low Energy (BLE) pourraient être installés sur les espaces collectifs et publics (p. ex., une gare) et émettre la disponibilité en énergie renouvelable locale à venir (p. ex., pour toutes les 10 minutes de l'heure à venir). Si l'ordinateur portable est branché au secteur sur un de ces espaces, l'utilitaire installé pourrait réceptionner en BLE l'information envoyée par les beacons et micro-charger la batterie en conséquence. En revanche, cet utilitaire devrait alors anticiper les besoins de mobilité de l'ordinateur portable en fonction de l'agenda de l'utilisateur.

Index

A

Afficheurs cylindriques à changement de forme	19
Afficheurs planaires	18
Attention centrale	42
Attention périphérique	42

C

CairnFORM	23
Cairns	23
CairnSCREEN	59
Champ de vision centrale	42
Champ de vision périphérique	42
Conscientisation ambiante	15

D

Décalage de la demande en énergie	116
---	-----

E

Eco-Interaction	90
Efficacité énergétique	85
Énergies non renouvelables	80
Énergies propres	80
Énergies renouvelables	80

I

Interaction Homme-Machine	9
Interaction Homme-Énergie	90
Interaction périphérique	15
Interface utilisateur	10
Interfaces utilisateur tangibles	11

Interfaces à changement de forme	13
--	----

L

Ludification	89
--------------------	----

M

Mix énergétique	81
Motivation extrinsèque	29
Motivation intrinsèque	29

P

Persuasion technologique	87
Physicalisation des données	14
Profondeur de charge	120
Propreté énergétique	85

R

Réalité augmentée	10
Réalité mixte	10
Réseaux électriques intelligents	82

S

SEDYL	117
Sobriété énergétique	85
Système interactif	9

V

Variation de production locale d'énergie renouvelable	124
Virtualité augmentée	10

Bibliographie

- [1] ACHARD, F., EVA, H. D., STIBIG, H.-J., MAYAUX, P., GALLEG0, J., RICHARDS, T., AND MALINGREAU, J.-P. Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science* 297, 5583 (2002), 999–1002.
- [2] ALAN, A. T., COSTANZA, E., RAMCHURN, S. D., FISCHER, J., RODDEN, T., AND JENNINGS, N. R. Tariff agent : Interacting with a future smart energy system at home. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 23, 4 (September 2016), 25 :1–25 :28.
- [3] AMAR, R., EAGAN, J., AND TASKO, J. Low-level components of analytic activity in information visualization. In *IEEE Symposium on Information Visualization* (Washington, DC, USA, Oct 2005), INFOVIS 2005, IEEE Computer Society, pp. 111–117.
- [4] ANGELINI, L., MUGELLINI, E., ABOU KHALED, O., COUTURE, N., VAN DEN HOVEN, E., AND BAKKER, S. Internet of tangibles : Exploring the interaction-attention continuum. In *Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction* (New York, NY, USA, 2018), TEI '18, ACM, pp. 740–743.
- [5] ANTONIN, C. Après le choc pétrolier d'octobre 1973, l'économie mondiale à l'épreuve du pétrole cher. *Revue internationale et stratégique* 91, 3 (2013), 139–149.
- [6] ARDITO, C., BUONO, P., COSTABILE, M. F., AND DESOLDA, G. Interaction with large displays : A survey. *ACM Comput. Surv.* 47, 3 (Feb. 2015), 46 :1–46 :38.
- [7] ASHMORE, P. J. Low cairns, long cists and symbol stones. In *Proceedings of the Society of Antiquaries of Scotland* (1980), vol. 110, pp. 346–55.
- [8] BACKLUND, S., GYLLENSWÄRD, M., GUSTAFSSON, A., ILSTEDT HJELM, S., MAZÉ, R., AND REDSTRÖM, J. Static! the aesthetics of energy in everyday things. In *Proceedings of the Design Research Society International Conference : Wonderground 2006* (2007), DRS '06.
- [9] BACKS, R. W., AND SELJOS, K. A. Metabolic and cardiorespiratory measures of mental effort : the effects of level of difficulty in a working memory task. *International Journal of Psychophysiology* 16, 1 (1994), 57 – 68.

- [10] BAKKER, S., AND NIEMANTSVERDRIET, K. The interaction-attention continuum : considering various levels of human attention in interaction design. *International Journal of Design* 10, 2 (8 2016), 1–14.
- [11] BAKKER, S., VAN DEN HOVEN, E., AND EGGEN, B. Design for the periphery. In *Proceedings of the Eurohaptics 2010 Symposium on Haptic and Audio-Visual stimuli : Enhancing Experiences and Interaction* (2010), pp. 71–80.
- [12] BEEBE, S. A., BEEBE, S. J., AND REDMOND, M. V. *Interpersonal communication : Relating to Others*, 6th ed. Allyn & Bacon/Pearson, Boston, MA, USA, 2011.
- [13] BEYER, G., ALT, F., MÜLLER, J., SCHMIDT, A., ISAKOVIC, K., KLOSE, S., SCHIEWE, M., AND HAULSEN, I. Audience behavior around large interactive cylindrical screens. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2011), CHI '11, ACM, pp. 1021–1030.
- [14] BLACKSHAW, M., DEVINCENZI, A., LAKATOS, D., LEITHINGER, D., AND ISHII, H. Recompose : Direct and gestural interaction with an actuated surface. In *CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2011), CHI EA '11, ACM, pp. 1237–1242.
- [15] BLEVIS, E. Sustainable interaction design : Invention & disposal, renewal & reuse. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2007), CHI '07, ACM, pp. 503–512.
- [16] BOFF, K. R., KAUFMAN, L., AND THOMAS, J. P. *Handbook of perception and human performance*, vol. 2. Wiley New York, 1986.
- [17] BOLTON, J., WANG, P., KIM, K., AND VERTEGAAL, R. Bodipod : Interacting with 3d human anatomy via a 360° cylindrical display. In *CHI '12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2012), CHI EA '12, ACM, pp. 1039–1042.
- [18] BOSTOCK, M., OGIEVETSKY, V., AND HEER, J. D3 data-driven documents. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 17, 12 (Dec. 2011), 2301–2309.
- [19] BOURGEOIS, J., VAN DER LINDEN, J., KORTUEM, G., PRICE, B. A., AND RIMMER, C. 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* (New York, NY, USA, 2014), UbiComp '14, ACM, pp. 459–470.
- [20] BROMS, L. Sustainable interactions : Studies in the design of energy awareness artefacts. Licenciante thesis. Department of Computer and Information Science, Linköping University, Sweden, April 2011.

- [21] BROMS, L., KATZEFF, C., BÅNG, M., NYBLOM, Å., HJELM, S. I., AND EHRNBERGER, K. Coffee maker patterns and the design of energy feedback artefacts. In *Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems* (New York, NY, USA, 2010), DIS '10, ACM, pp. 93–102.
- [22] BRYNJARSDÓTTIR, H., HÅKANSSON, M., PIERCE, J., BAUMER, E., DiSALVO, C., AND SENGERS, P. Sustainably unpersuaded : How persuasion narrows our vision of sustainability. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2012), CHI '12, ACM, pp. 947–956.
- [23] BUCHMANN, I. *Batteries in a Portable World : A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-engineers*. Cadex Electronics Incorporated, 2016.
- [24] CANO, G., LAURILLAU, Y., AND CALVARY, G. Persuasive technology and energy : critical analysis of the state of the art. *Journal d'Interaction Personne-Système* 4, 1 (October 2015), 48–68.
- [25] CARD, S. K., NEWELL, A., AND MORAN, T. P. *The Psychology of Human-Computer Interaction*. L. Erlbaum Associates Inc., Hillsdale, NJ, USA, 1983.
- [26] CASADO-MANSILLA, D., LOPEZ-DE-ARMENTIA, J., GARAIZAR, P., AND LÓPEZ-DE-IPÍÑA, D. 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* (New York, NY, USA, 2014), CHI EA '14, ACM, pp. 2425–2430.
- [27] CASTELLI, N., STEVENS, G., JAKOBI, T., AND SCHÖNAU, N. Beyond eco-feedback : Using room as a context to design new eco-support features at home. In *Advances and New Trends in Environmental and Energy Informatics : Selected and Extended Contributions from the 28th International Conference on Informatics for Environmental Protection*, J. Marx Gomez, M. Sonnenschein, U. Vogel, A. Winter, B. Rapp, and N. Giesen, Eds. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2016, pp. 177–195.
- [28] CHARRAD, M., GHAZZALI, N., BOITEAU, V., AND NIKNAFS, A. NbClust : An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *Journal of Statistical Software* 061, i06 (2014).
- [29] COLLEY, J. A., BEDWELL, B., CRABTREE, A., AND RODDEN, T. Exploring reactions to widespread energy monitoring. In *Proceedings of the 14th IFIP TC13 Conference on Human-Computer Interaction* (Berlin, Heidelberg, 2013), INTERACT 2013, Springer Berlin Heidelberg, pp. 91–108.
- [30] COMMISSION DE RÉGULATION DE L'ÉNERGIE (CRE). Comprendre les smartgrids. <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=comprendre-les-smart-grids>, 2018.

- [31] COMMISSION DE RÉGULATION DE L'ÉNERGIE (CRE). Intégration des EnRs. <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=integrationenr-smart-grids>, 2018.
- [32] COMMISSION DE RÉGULATION DE L'ÉNERGIE (CRE). Les microgrids. <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=microgrids>, 2018.
- [33] COSTANZA, E., BEDWELL, B., JEWELL, M. O., COLLEY, J., AND RODDEN, T. '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* (New York, NY, USA, 2016), CHI '16, ACM, pp. 4061–4072.
- [34] COSTANZA, E., FISCHER, J. E., COLLEY, J. A., RODDEN, T., RAMCHURN, S. D., AND JENNINGS, N. R. 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* (New York, NY, USA, 2014), CHI '14, ACM, pp. 813–822.
- [35] COSTANZA, E., RAMCHURN, S. D., AND JENNINGS, N. R. Understanding domestic energy consumption through interactive visualisation : A field study. In *Proceedings of the ACM Conference on Ubiquitous Computing* (New York, NY, USA, 2012), UbiComp '12, ACM, pp. 216–225.
- [36] COUTAZ, J. Essai sans prétention sur l'Interaction Homme-Machine et son évolution. *Bulletin de la Société Informatique de France*, 1 (September 2013), 15–33.
- [37] COUTURE, N., RIVIÈRE, G., AND REUTER, P. Geotui : A tangible user interface for geoscience. In *Proceedings of the 2Nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction* (New York, NY, USA, 2008), TEI '08, ACM, pp. 89–96.
- [38] CROWLEY, T. J. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science* 289, 5477 (2000), 270–277.
- [39] CUNNINGHAM, M. R. Weather, mood, and helping behavior : Quasi experiments with the sunshine samaritan. *Journal of Personality and Social Psychology* 37, 11 (1979), 1947–1956.
- [40] DETERDING, S., DIXON, D., KHALED, R., AND NACKE, L. From game design elements to gamefulness : Defining "gamification". In *Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference : Envisioning Future Media Environments* (New York, NY, USA, 2011), MindTrek '11, ACM, pp. 9–15.
- [41] DIMITRIADIS, P., AND ALEXANDER, J. Evaluating the effectiveness of physical shape-change for in-pocket mobile device notifications. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2014), CHI '14, ACM, pp. 2589–2592.

- [42] DISALVO, C., SENGERS, P., AND BRYNJARSDÓTTIR, H. Mapping the landscape of sustainable hci. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2010), CHI '10, ACM, pp. 1975–1984.
- [43] DRAGICEVIC, P., AND JANSEN, Y. List of physical visualizations. www.dataphys.org/, 2012. Retrieved December, 2017.
- [44] DUBOIS, E. *Augmented Surgery : an Augmented Reality Case Study ; User-Centred Design and Realization*. Theses, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, July 2001.
- [45] DUNLAP RILEY, E., VAN LIERE KENT, D., MERTIG ANGELA, G., AND JONES ROBERT, E. New trends in measuring environmental attitudes : Measuring endorsement of the new ecological paradigm : A revised nep scale. *Journal of Social Issues* 56, 3 (2000), 425–442.
- [46] DUNN, B., KAMATH, H., AND TARASCON, J.-M. Electrical energy storage for the grid : A battery of choices. *Science* 334, 6058 (2011), 928–935.
- [47] EDENHOFER, O., PICHES-MADRUGA, R., SOKONA, Y., SEYBOTH, K., KADNER, S., ZWICKEL, T., EICKEMEIER, P., HANSEN, G., SCHLÖMER, S., VON STECHOW, C., ET AL. *Renewable energy sources and climate change mitigation : Special report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, 2011.
- [48] ELBANHAWY, E. Y., SMITH, A. F. G., AND MOORE, J. Towards an ambient awareness interface for home battery storage system. In *Proceedings of the ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing : Adjunct* (New York, NY, USA, 2016), UbiComp '16, ACM, pp. 1608–1613.
- [49] ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA. Cairn. 11th ed., vol. IV. CUP, Cambridge, UK, 1911, p. 950.
- [50] ENGIE. Microgrids. <https://www.engie.com/activites/microgrids-energie-decentralisee/>, 2018.
- [51] ENGQUIST, E. Boel-lampan : Utveckling av en lampa för visualisering av elförbrukning i hemmet. Master's thesis, Mälardalen University, Sweden, June 2009.
- [52] ERICKSON, T., LI, M., KIM, Y., DESHPANDE, A., SAHU, S., CHAO, T., SUKAVIRIYA, P., AND NAPHADE, M. 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* (New York, NY, USA, 2013), CHI '13, ACM, pp. 1203–1212.
- [53] EUROPA. Statistiques sur la société de l'information - entreprises, 2015. Retrieved June, 2017.

- [54] EUROPA. Energy balance sheets 2014 data, 2016. Retrieved June, 2017.
- [55] EUROPEAN COMMISSION (EC). Europe 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. *Communication from the Commission* (2010).
- [56] EUROPEAN FUSION DEVELOPMENT AGREEMENT (EFDA). Iter. <https://www.iter.org/proj/inafewlines>, 2018. Dernier accès le 17 avril 2018.
- [57] EVANS, H., HANSEN, H., AND HAGEDORN, J. Artful media : Nuage vert. *IEEE MultiMedia* 16, 3 (July 2009), 13–15.
- [58] FARUQUI, A., SERGICI, S., AND SHARIF, A. The impact of informational feedback on energy consumption—a survey of the experimental evidence. *Energy* 35, 4 (April 2010), 1598–1608.
- [59] FILONIK, D., MEDLAND, R., FOTH, M., AND RITTENBRUCH, M. A customisable dashboard display for environmental performance visualisations. In *Proceedings of the 8th International Conference on Persuasive Technology* (Berlin, Heidelberg, 2013), PERSUASIVE '13, Springer Berlin Heidelberg, pp. 51–62.
- [60] 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. Recommending energy tariffs and load shifting based on smart household usage profiling. In *Proceedings of the International Conference on Intelligent User Interfaces* (New York, NY, USA, 2013), IUI '13, ACM, pp. 383–394.
- [61] FITZMAURICE, G. W., ISHII, H., AND BUXTON, W. A. S. Bricks : Laying the foundations for graspable user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 1995), CHI '95, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 442–449.
- [62] FOGG, B. J. Persuasive computers : Perspectives and research directions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 1998), CHI '98, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 225–232.
- [63] FOGG, B. J. Persuasive technology : Using computers to change what we think and do. *Ubiquity* 2002, December (Dec. 2002).
- [64] FOLLMER, S., LEITHINGER, D., OLWAL, A., HOGGE, A., AND ISHII, H. inform : Dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (New York, NY, USA, 2013), UIST '13, ACM, pp. 417–426.

- [65] FOSTER, D., LAWSON, S., BLYTHE, M., AND CAIRNS, P. Wattsup? : Motivating reductions in domestic energy consumption using social networks. In *Proceedings of the 6th Nordic Conference on Human-Computer Interaction : Extending Boundaries* (New York, NY, USA, 2010), NordiCHI '10, ACM, pp. 178–187.
- [66] FREY, J., DANIEL, M., CASTET, J., HACHET, M., AND LOTTE, F. Framework for electroencephalography-based evaluation of user experience. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2016), CHI '16, ACM, pp. 2283–2294.
- [67] GAMBERINI, L., SPAGNOLLI, A., CORRADI, N., JACUCCI, G., TUSA, G., MIKKOLA, T., ZAMBONI, L., AND HOGGAN, E. Tailoring feedback to users' actions in a persuasive game for household electricity conservation. In *Proceedings of the 8th International Conference on Persuasive Technology* (Berlin, Heidelberg, 2012), PERSUASIVE '12, Springer Berlin Heidelberg, pp. 100–111.
- [68] GENOLINI, C., ECOCHARD, R., BENGHEZAL, M., DRISS, T., ANDRIEU, S., AND SUBTIL, F. kmlshape : An efficient method to cluster longitudinal data (time-series) according to their shapes. *PloS one* 11, 6 (2016), e0150738.
- [69] GRAHAM, C. H. *Vision and visual perception*. Wiley, 1965.
- [70] GRAML, T., LOOCK, C.-M., BAERISWYL, M., AND STAAKE, T. Improving residential energy consumption at large using persuasive systems. In *European Conference on Information Systems* (2011), ECIS '11, AIS Electronic Library, pp. 1–15. Paper 184.
- [71] GRÖNVALL, E., KINCH, S., PETERSEN, M. G., AND RASMUSSEN, M. K. 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* (New York, NY, USA, 2014), CHI '14, ACM, pp. 2559–2568.
- [72] GULBINAS, R., JAIN, R. K., AND TAYLOR, J. E. Bizwatts : A modular socio-technical energy management system for empowering commercial building occupants to conserve energy. *Applied Energy* 136 (December 2014), 1076–1084.
- [73] GUNA, J., AND POGAČNIK, M. Ambient visualization of energy consumption information. *International SERIES on Information Systems and Management in Creative eMedia*, 2 (2013), 37–42.
- [74] GUSTAFSSON, A., AND GYLLENSWÄRD, M. The power-aware cord : Energy awareness through ambient information display. In *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2005), CHI EA '05, ACM, pp. 1423–1426.

- [75] GUTWIN, C., COCKBURN, A., AND COVENEY, A. 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* (New York, NY, USA, 2017), CHI '17, ACM, pp. 208–219.
- [76] HAM, J., AND MIDDEN, C. 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* (Berlin, Heidelberg, 2010), PERSUASIVE '10, Springer-Verlag, pp. 132–142.
- [77] HAMARI, J., KOIVISTO, J., AND PAKKANEN, T. Do persuasive technologies persuade? - a review of empirical studies. In *Proceedings of the 9th International Conference on Persuasive Technology* (Berlin, Heidelberg, 2014), PERSUASIVE '14, Springer-Verlag, pp. 118–136.
- [78] HAMARI, J., KOIVISTO, J., AND SARSA, H. Does gamification work? – a literature review of empirical studies on gamification. In *Proceedings of the 47th Hawaii International Conference on System Sciences* (Washington, DC, USA, Jan 2014), IEEE Computer Society, pp. 3025–3034.
- [79] HASSELQVIST, H., BOGDAN, C., AND KIS, F. Linking data to action : Designing for amateur energy management. In *Proceedings of the ACM Conference on Designing Interactive Systems* (New York, NY, USA, 2016), DIS '16, ACM, pp. 473–483.
- [80] HAUSEN, D., BORING, S., LUELING, C., RODESTOCK, S., AND BUTZ, A. Statube : Facilitating state management in instant messaging systems. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction* (New York, NY, USA, 2012), TEI '12, ACM, pp. 283–290.
- [81] HAUSEN, D., TABARD, A., VON THERMANN, A., HOLZNER, K., AND BUTZ, A. Evaluating peripheral interaction. In *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction* (New York, NY, USA, 2014), TEI '14, ACM, pp. 21–28.
- [82] HE, H. A., GREENBERG, S., AND HUANG, E. M. One size does not fit all : Applying the transtheoretical model to energy feedback technology design. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2010), CHI '10, ACM, pp. 927–936.
- [83] HEIBECK, F., TOME, B., DELLA SILVA, C., AND ISHII, H. unimorph : Fabricating thin film composites for shape-changing interfaces. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology* (New York, NY, USA, 2015), UIST '15, ACM, pp. 233–242.

- [84] HELLER, F., AND BORCHERS, J. Powersocket : Towards on-outlet power consumption visualization. In *CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2011), CHI EA '11, ACM, pp. 1981–1986.
- [85] HERNANDEZ, G., ARIAS, O., BUENTELLO, D., AND JIN, Y. Smart nest thermostat : A smart spy in your home. *Black Hat USA* (2014).
- [86] HOGAN, T. Vessels of irelands past #2, 2014. Retrieved April 5, 2018 from <http://tactiledata.net/>.
- [87] HOLMES, T. G. Eco-visualization : Combining art and technology to reduce energy consumption. In *Proceedings of the 6th ACM SIGCHI Conference on Creativity & Cognition* (New York, NY, USA, 2007), C&C '07, ACM, pp. 153–162.
- [88] HOONLOR, A., SZYMANSKI, B. K., AND ZAKI, M. J. Trends in computer science research. *Commun. ACM* 56, 10 (Oct. 2013), 74–83.
- [89] HOREV, O. ‘talking to the hand’ an exploration into shape shifting objects and morphing interfaces. Master’s thesis, Interaction Design Institute Ivrea, Italy, May 2006.
- [90] IEA. Key World Energy Statistics 2017, 2015.
- [91] ISHII, H., LAKATOS, D., BONANNI, L., AND LABRUNE, J.-B. Radical atoms : Beyond tangible bits, toward transformable materials. *interactions* 19, 1 (Jan. 2012), 38–51.
- [92] ISHII, H., RATTI, C., PIPER, B., WANG, Y., BIDERMAN, A., AND BEN-JOSEPH, E. Bringing clay and sand into digital design — continuous tangible user interfaces. *BT Technology Journal* 22, 4 (Oct 2004), 287–299.
- [93] ISHII, H., REN, S., AND FREI, P. Pinwheels : Visualizing information flow in an architectural space. In *CHI '01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2001), CHI EA '01, ACM, pp. 111–112.
- [94] ISHII, H., AND ULLMER, B. Tangible bits : Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 1997), CHI '97, ACM, pp. 234–241.
- [95] JAIN, R. K., TAYLOR, J. E., AND PESCHIERA, G. Assessing eco-feedback interface usage and design to drive energy efficiency in buildings. *Energy and Buildings* 48, 1 (May 2012), 8–17.
- [96] JANSEN, Y., DRAGICEVIC, P., AND FEKETE, J.-D. Evaluating the efficiency of physical visualizations. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2013), CHI '13, ACM, pp. 2593–2602.

-
- [97] JANSEN, Y., DRAGICEVIC, P., ISENBERG, P., ALEXANDER, J., KARNIK, A., KILDAL, J., SUBRAMANIAN, S., AND HORNBEK, K. Opportunities and challenges for data physicalization. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2015), CHI '15, ACM, pp. 3227–3236.
- [98] JANSEN, Y., KARRER, T., AND BORCHERS, J. Mudpad : Localized tactile feedback on touch surfaces. In *Adjunct Proceedings of the 23Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (New York, NY, USA, 2010), UIST '10, ACM, pp. 385–386.
- [99] JENSEN, R. H., KJELDSKOV, J., AND SKOV, M. B. Heatdial : Beyond user scheduling in eco-interaction. In *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction* (New York, NY, USA, 2016), NordiCHI '16, ACM, pp. 74 :1–74 :10.
- [100] JET PROPULSION LABORATORY / NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. "global climate change : Evidence." nasa global climate change and global warming : Vital signs of the planet. <http://climate.nasa.gov/evidence/>, 2015. Dernier accès le 17 avril 2018.
- [101] JOHNSON, D., DETERDING, S., KUHN, K.-A., STANEVA, A., STOYANOV, S., AND HIDES, L. Gamification for health and wellbeing : A systematic review of the literature. *Internet Interventions* 6 (2016), 89 – 106.
- [102] JONES, L., MCCLELLAND, J., THONGSOUKSANOU MANE, P., AND GIROUARD, A. Ambient notifications with shape changing circuits in peripheral locations. In *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces* (New York, NY, USA, 2017), ISS '17, ACM, pp. 405–408.
- [103] JÖNSSON, L., BROMS, L., AND KATZEFF, C. Watt-lite : Energy statistics made tangible. In *Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems* (New York, NY, USA, 2010), DIS '10, ACM, pp. 240–243.
- [104] JORDÀ, S., GEIGER, G., ALONSO, M., AND KALTENBRUNNER, M. The reactable : Exploring the synergy between live music performance and tabletop tangible interfaces. In *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction* (New York, NY, USA, 2007), TEI '07, ACM, pp. 139–146.
- [105] KELLER, M. C., FREDRICKSON, B. L., YBARRA, O., CÔTÉ, S., JOHNSON, K., MIKELS, J., CONWAY, A., AND WAGER, T. A warm heart and a clear head : The contingent effects of weather on mood and cognition. *Psychological Science* 16, 9 (2005), 724–731. PMID : 16137259.
- [106] KIM, J.-W., KIM, Y.-K., AND NAM, T.-J. The ténéré : Design for supporting energy conservation behaviors. In *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors*

- in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2009), CHI EA '09, ACM, pp. 2643–2646.
- [107] KIM, S., KIM, H., LEE, B., NAM, T.-J., AND LEE, W. 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* (New York, NY, USA, 2008), CHI '08, ACM, pp. 211–224.
- [108] KIM, T., HONG, H., AND MAGERKO, B. Design requirements for ambient display that supports sustainable lifestyle. In *Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems* (New York, NY, USA, 2010), DIS '10, ACM, pp. 103–112.
- [109] KINCHLA, R. A. A psychophysical model of visual-movement perception. In *Eye movements and psychological processes*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, USA, 1976, pp. 263–275.
- [110] KJELDSKOV, J., SKOV, M. B., PAAY, J., LUND, D., MADSEN, T., AND NIELSEN, M. 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* (New York, NY, USA, 2015), OzCHI '15, ACM, pp. 388–396.
- [111] KJELDSKOV, J., SKOV, M. B., PAAY, J., AND PATHMANATHAN, R. 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* (New York, NY, USA, 2012), CHI '12, ACM, pp. 2347–2356.
- [112] KOBAYASHI, K., AND YAMADA, S. Shape changing device for notification. In *Proceedings of the Adjunct Publication of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (New York, NY, USA, 2013), UIST '13 Adjunct, ACM, pp. 71–72.
- [113] LAKATODS, D. Amphorm : Form giving through gestural interaction to shape changing objects. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, June 2012.
- [114] LE GOC, M., KIM, L. H., PARSAEI, A., FEKETE, J.-D., DRAGICEVIC, P., AND FOLLMER, S. Zooids : Building blocks for swarm user interfaces. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology* (New York, NY, USA, 2016), UIST '16, ACM, pp. 97–109.
- [115] LEE, J., POST, R., AND ISHII, H. 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* (New York, NY, USA, 2011), UIST '11, ACM, pp. 327–336.

- [116] LEGARDEUR, J., MONNIER, B., AND CHOULIER, D. New projects evaluation method for the 24h of innovation®. In *ERIMA 2010* (Wiesbaden, Germany, June 2010), vol. 3, pp. 177–186, ISSN 2100–0778.
- [117] LEITHINGER, D., AND ISHII, H. Relief : A scalable actuated shape display. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction* (New York, NY, USA, 2010), TEI '10, ACM, pp. 221–222.
- [118] LIGHT, R. A. Mosquitto : server and client implementation of the MQTT protocol. *Journal of Open Source Software* 2, 13 (May 2017).
- [119] LIU, T., DING, X., LIU, P., LU, T., AND GU, N. Archiexpression : A physical eco-feedback display in an outdoor campus space of china. In *Proceedings of the Fourth International Symposium on Chinese CHI* (New York, NY, USA, 2016), ChineseCHI'16, ACM, pp. 5 :1–5 :10.
- [120] LORENZO-DEL-CASTILLO, J.-A., AND COUTURE, N. The Aircraft of the Future : Towards the Tangible Cockpit. In *HCI-Aero* (Paris, France, Sept. 2016).
- [121] LUO, X., WANG, J., DOONER, M., AND CLARKE, J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy* 137 (January 2015), 511–536.
- [122] MA, G., LIN, J., LI, N., AND ZHOU, J. Cross-cultural assessment of the effectiveness of eco-feedback in building energy conservation. *Energy and Buildings* 134 (January 2017), 329–338.
- [123] MACLNNIS, D. J., AND JAWORSKI, B. J. Information processing from advertisements : Toward an integrative framework. *Journal of Marketing* 53, 4 (1989), 1–23.
- [124] MANKOFF, J. C., BLEVIS, E., BORNING, A., FRIEDMAN, B., FUSSELL, S. R., HASBROUCK, J., WOODRUFF, A., AND SENGERS, P. Environmental sustainability and interaction. In *CHI '07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2007), CHI EA '07, ACM, pp. 2121–2124.
- [125] MASOODIAN, M., ANDRÉ, E., KUGLER, M., REINHART, F., ROGERS, B., AND SCHLIEPER, K. Usem : A ubiquitous smart energy management system for residential homes. *International Journal on Advances in Intelligent Systems* 7, 3&4 (2014), 519–532.
- [126] MCCARNEY, R., WARNER, J., ILIFFE, S., VAN HASELEN, R., GRIFFIN, M., AND FISHER, P. The hawthorne effect : a randomised, controlled trial. *BMC Medical Research Methodology* 7, 1 (Jul 2007), 30.
- [127] MCGLADE, C., AND EKINS, P. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2°C. *Nature* 517, 7533 (2015), 187.

- [128] MILENKOVIC, M., HANE BUTTE, U., HUANG, Y., PRENDERGAST, D., AND PHAM, H. Improving user comfort and office energy efficiency with poem (personal office energy monitor). In *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2013), CHI EA '13, ACM, pp. 1455–1460.
- [129] MILGRAM, P., TAKEMURA, H., UTSUMI, A., AND KISHINO, F. Augmented reality : A class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Telemanipulator and telepresence technologies* (1995), vol. 2351, International Society for Optics and Photonics, pp. 282–293.
- [130] MILLER, W., AND ROLLNICK, S. *Motivational interviewing : Preparing people for change*, 2nd ed. The Guilford Press, New York, NY, USA, 2002.
- [131] MONIGATTI, P., APPERLEY, M., AND ROGERS, B. Power and energy visualization for the micro-management of household electricity consumption. In *Proceedings of the International Conference on Advanced Visual Interfaces* (New York, NY, USA, 2010), AVI '10, ACM, pp. 325–328.
- [132] NAKAGAKI, K., FOLLMER, S., AND ISHII, H. Lineform : Actuated curve interfaces for display, interaction, and constraint. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology* (New York, NY, USA, 2015), UIST '15, ACM, pp. 333–339.
- [133] NAKAGAKI, K., VINK, L., COUNTS, J., WINDHAM, D., LEITHINGER, D., FOLLMER, S., AND ISHII, H. 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* (New York, NY, USA, 2016), CHI '16, ACM, pp. 2764–2772.
- [134] NEGRI, A.-L., AND SENACH, B. Ludo-persuasive systems for sustainable consumption. *Journal d'Interaction Personne-Système* 4, 1 (October 2015), 141–162.
- [135] NÉGAWATT. Les grandes lignes du scénario négawatt 2017-2050. https://negawatt.org/IMG/pdf/scenario-negawatt_2017-2050_brochure-12pages.pdf, 2017. Dernier accès le 17 avril 2018.
- [136] PAAY, J., KJELDSKOV, J., SKOV, M. B., LUND, D., MADSEN, T., AND NIELSEN, M. 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* (New York, NY, USA, 2014), OzCHI '14, ACM, pp. 332–341.
- [137] PARK, J., PARK, Y.-W., AND NAM, T.-J. Wrigglo : Shape-changing peripheral for interpersonal mobile communication. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2014), CHI '14, ACM, pp. 3973–3976.

- [138] PEREIRA, L., QUINTAL, F., BARRETO, M., AND NUNES, N. J. Understanding the limitations of eco-feedback : A one-year long-term study. In *Human-Computer Interaction and Knowledge Discovery in Complex, Unstructured, Big Data*, A. Holzinger and G. Pasi, Eds., vol. 7947 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 237–255.
- [139] PETERSEN, D., STEELE, J., AND WILKERSON, J. Wattbot : A residential electricity monitoring and feedback system. In *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2009), CHI EA '09, ACM, pp. 2847–2852.
- [140] PETKOV, P., GOSWAMI, S., KÖBLER, F., AND KRCMAR, H. 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* (New York, NY, USA, 2012), NordiCHI '12, ACM, pp. 587–596.
- [141] PETKOV, P., KÖBLER, F., FOTH, M., AND KRCMAR, H. 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* (New York, NY, USA, 2011), C&T '11, ACM, pp. 21–30.
- [142] PICCOLO, L. S. G., BARANAUSKAS, C., AND AZEVEDO, R. A socially inspired energy feedback technology : challenges in a developing scenario. *AI & Society* (February 2016), 1–17.
- [143] PIERCE, J., AND PAULOS, E. Materializing energy. In *Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems* (New York, NY, USA, 2010), DIS '10, ACM, pp. 113–122.
- [144] PIERCE, J., AND PAULOS, E. Beyond energy monitors : Interaction, energy, and emerging energy systems. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2012), CHI '12, ACM, pp. 665–674.
- [145] PIERCE, J., AND PAULOS, E. The local energy indicator : Designing for wind and solar energy systems in the home. In *Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference* (New York, NY, USA, 2012), DIS '12, ACM, pp. 631–634.
- [146] POUSMAN, Z., AND STASKO, J. A taxonomy of ambient information systems : Four patterns of design. In *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces* (New York, NY, USA, 2006), AVI '06, ACM, pp. 67–74.
- [147] PROCHASKA, J. O., DICLEMENTE, C. C., AND NORCROSS, J. C. In search of how people change : applications to addictive behaviors. *American Psychologist* 47, 9 (September 1992), 1102–1114.

- [148] QUINTAL, F., JORGE, C., NISI, V., AND NUNES, N. Watt-i-see : A tangible visualization of energy. In *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces* (New York, NY, USA, 2016), AVI '16, ACM, pp. 120–127.
- [149] QUINTAL, F., PEREIRA, L., NUNES, N., NISI, V., AND BARRETO, M. Wattsburning : Design and evaluation of an innovative eco-feedback system. In *Proceedings of the 14th IFIP TC13 Conference on Human-Computer Interaction* (Berlin, Heidelberg, 2013), INTERACT 2013, Springer Berlin Heidelberg, pp. 453–470.
- [150] QUINTAL, F., PEREIRA, L., NUNES, N. J., AND NISI, V. 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* (April 2015), SustainIT '15, IEEE, pp. 1–6.
- [151] RADEBOLD, A., CHOLEWICKI, J., PANJABI, M. M., AND PATEL, T. C. Muscle response pattern to sudden trunk loading in healthy individuals and in patients with chronic low back pain. *Spine* 25, 8 (2000), 947–954.
- [152] RASMUSSEN, M. K., PEDERSEN, E. W., PETERSEN, M. G., AND HORNBÆK, K. 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* (New York, NY, USA, 2012), CHI '12, ACM, pp. 735–744.
- [153] REGAN, T., SWEENEY, D., HELMES, J., VLACHOKYRIAKOS, V., LINDLEY, S., AND TAYLOR, A. Designing engaging data in communities. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2015), CHI EA '15, ACM, pp. 271–274.
- [154] REMME, U., BLES, M., AND FAHL, U. Global resources and energy trade : An overview for coal, natural gas, oil and uranium. *OPUS* (2007).
- [155] RIVIÈRE, G., AND KRECKELBERGH, S. 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* (2012), Ergo'IHM '12, pp. 63–66.
- [156] RODGERS, J., AND BARTRAM, L. Exploring ambient and artistic visualization for residential energy use feedback. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 17, 12 (December 2011), 2489–2497.
- [157] SCHRAMMEL, J., GERDENITSCH, C., WEISS, A., KLUCKNER, P. M., AND TSCHELIGI, M. 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* (Berlin, Heidelberg, 2011), AmI '11, Springer Berlin Heidelberg, pp. 157–166.

- [158] SCHREPP, M., HINDERKS, A., AND THOMASCHEWSKI, J. Design and evaluation of a short version of the user experience questionnaire (ueq-s). *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence* 4, 6 (2017), 103–108.
- [159] SCHWARTZ, T., DENEFF, S., STEVENS, G., RAMIREZ, L., AND WULF, V. 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* (New York, NY, USA, 2013), CHI '13, ACM, pp. 1193–1202.
- [160] SEAH, S. A., DRINKWATER, B. W., CARTER, T., MALKIN, R., AND SUBRAMANIAN, S. Correspondence : Dexterous ultrasonic levitation of millimeter-sized objects in air. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 61, 7 (July 2014), 1233–1236.
- [161] SHAER, O., AND HORNECKER, E. Tangible user interfaces : Past, present, and future directions. *Found. Trends Hum.-Comput. Interact.* 3, 1&2 (January 2010), 1–137.
- [162] SHERIF, A., AND DO, E. Y.-L. Energy puppet : An ambient awareness interface for home energy consumption. In *Digital Proceedings of the 7th International Workshop on Social Intelligence Design* (2008), SID '08, p. 7 pages.
- [163] SHOVE, E., AND SOUTHERTON, D. Defrosting the freezer : from novelty to convenience : a narrative of normalization. *Journal of Material Culture* 5, 3 (2000), 301–319.
- [164] SHRUBSOLE, P., LAVRYSEN, T., JANSE, M., AND WEDA, H. Flo : Raising family awareness about electricity use. In *CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2011), CHI EA '11, ACM, pp. 669–672.
- [165] SIMM, W., FERRARIO, M. A., FRIDAY, A., NEWMAN, P., FORSHAW, S., HAZAS, M., AND DIX, A. 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* (New York, NY, USA, 2015), CHI '15, ACM, pp. 1965–1974.
- [166] SKINNER, B. F. *About behaviorism*. Vintage Books, New York, NY, USA, 1976.
- [167] SNOW, S., VYAS, D., AND BRERETON, M. When an eco-feedback system joins the family. *Personal and Ubiquitous Computing* 19, 5 (August 2015), 929–940.
- [168] SOHN, M., NAM, T., AND LEE, W. Designing with unconscious human behaviors for eco-friendly interaction. In *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2009), CHI EA '09, ACM, pp. 2651–2654.

- [169] STRENGERS, Y. Designing eco-feedback systems for everyday life. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2011), CHI '11, ACM, pp. 2135–2144.
- [170] STROHMEIER, P., GOMES, A., TROIANO, G. M., MOTTELSON, A., MERRITT, T., AND ALEXANDER, J. Sharing perspectives on the design of shape-changing interfaces. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2016), CHI EA '16, ACM, pp. 3492–3499.
- [171] SUNG, J., CHRISTENSEN, H. I., AND GRINTER, R. E. Robots in the wild : Understanding long-term use. In *Proceedings of the 4th ACM/IEEE International Conference on Human Robot Interaction* (New York, NY, USA, 2009), HRI '09, ACM, pp. 45–52.
- [172] SUTHERLAND, I. E. The ultimate display. *Multimedia : From Wagner to virtual reality* (1965), 506–508.
- [173] T.A. BODEN, G. M., AND ANDRES, R. Global, regional, and national fossil-fuel CO2 emissions. *Carbon Dioxide Information Analysis Center* (2017).
- [174] TAHER, F., HARDY, J., KARNIK, A., WEICHEL, C., JANSEN, Y., HORNBAEK, K., AND ALEXANDER, J. Exploring interactions with physically dynamic bar charts. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2015), CHI '15, ACM, pp. 3237–3246.
- [175] TAKOUACHET, N., COUTURE, N., REUTER, P., JOYOT, P., RIVIERE, G., AND VERDON, N. Tangible user interfaces for physically-based deformation : design principles and first prototype. *Visual Computer Volume 28*, 6-8 (Apr. 2012), 799–808. From the issue entitled "CGI'2012 Conference".
- [176] TELEA, A. C. *Data Visualization : Principles and Practice, Second Edition*, 2nd ed. A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA, 2014.
- [177] THORPE, S., FIZE, D., AND MARLOT, C. Speed of processing in the human visual system. *Nature 381*, 6582 (1996), 520–522.
- [178] TILLEY, C. *The materiality of stone : explorations in landscape phenomenology*. Berg publishers, Oxford, UK, 2004.
- [179] TOGLER, J., HEMMERT, F., AND WETTACH, R. Living interfaces : The thrifty faucet. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction* (New York, NY, USA, 2009), TEI '09, ACM, pp. 43–44.
- [180] TRAN, Q. Promoting energy efficient behavior through energy-related feedback. In *Proceedings of the International Conference on Collaboration Technologies and Systems* (May 2014), CTS '14, IEEE, pp. 611–615.

- [181] TREMBLAY, O., AND DESSAINT, L.-A. Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications. *World Electric Vehicle Journal* 3, 1 (2009), 1–10.
- [182] TROIANO, G. M., TIAB, J., AND LIM, Y.-K. Sci-fi : Shape-changing interfaces, future interactions. In *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction* (New York, NY, USA, 2016), NordiCHI '16, ACM, pp. 45 :1–45 :10.
- [183] TUBALLA, M. L., AND ABUNDO, M. L. A review of the development of smart grid technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59 (2016), 710 – 725.
- [184] TYNAN, P. D., AND SEKULER, R. Motion processing in peripheral vision : Reaction time and perceived velocity. *Vision research* 22, 1 (1982), 61–68.
- [185] VALKANOVA, N., JORDÀ, S., TOMITSCH, M., AND VANDE MOERE, A. 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* (New York, NY, USA, 2013), CHI '13, ACM, pp. 3461–3470.
- [186] VALØEN, L. O., AND SHOESMITH, M. I. The effect of phev and hev duty cycles on battery and battery pack performance. In *PHEV 2007 Conference* (2007), pp. 4–5.
- [187] WEHREND, S., AND LEWIS, C. A problem-oriented classification of visualization techniques. In *Proceedings of the 1st Conference on Visualization '90* (Los Alamitos, CA, USA, 1990), VIS '90, IEEE Computer Society Press, pp. 139–143.
- [188] WEISER, M., AND BROWN, J. S. Designing calm technology. *PowerGrid Journal* 1, 1 (July 1996), 75–85.
- [189] WEISS, M., MATTERN, F., GRAML, T., STAAKE, T., AND FLEISCH, E. Handy feedback : Connecting smart meters with mobile phones. In *Proceedings of the 8th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia* (New York, NY, USA, 2009), MUM '09, ACM, pp. 15 :1–15 :4.
- [190] WELLNER, P., MACKAY, W., AND GOLD, R. Back to the real world. *Commun. ACM* 36, 7 (July 1993), 24–26.
- [191] WICKENS, C. D., AND MCCARLEY, J. S. *Applied attention theory*. CRC press, 2007.
- [192] WISNESKI, C., ISHII, H., DAHLEY, A., GORBET, M. G., BRAVE, S., ULLMER, B., AND YARIN, P. 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* (London, UK, 1998), CoBuild '98, Springer-Verlag, pp. 22–32.

- [193] WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. The Brundtland report : ‘Our common future’. *Medicine and War* 4, 1 (1988), 17–25.
- [194] WU, A. Tangible visualization. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction* (New York, NY, USA, 2010), TEI ’10, ACM, pp. 317–318.
- [195] XU, B., OUDALOV, A., ULBIG, A., ANDERSSON, G., AND KIRSCHEN, D. S. Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment. *IEEE Transactions on Smart Grid* 9, 2 (March 2018), 1131–1140.
- [196] YAO, L., NIYAMA, R., OU, J., FOLLMER, S., DELLA SILVA, C., AND ISHII, H. Pneu : Pneumatically actuated soft composite materials for shape changing interfaces. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (New York, NY, USA, 2013), UIST ’13, ACM, pp. 13–22.
- [197] YAO, L., OU, J., CHENG, C.-Y., STEINER, H., WANG, W., WANG, G., AND ISHII, H. biologic : Natto cells as nanoactuators for shape changing interfaces. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2015), CHI ’15, ACM, pp. 1–10.
- [198] YATES, S. M., AND ARONSON, E. A social psychological perspective on energy conservation in residential buildings. *American Psychologist* 38, 4 (April 1983), 435–444.
- [199] YUN, R., AZIZ, A., SCUPELLI, P., LASTERNAS, B., ZHANG, C., AND LOFTNESS, V. 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* (New York, NY, USA, 2015), CHI ’15, ACM, pp. 1989–1992.
- [200] YUN, T.-J. Investigating the impact of a minimalist in-home energy consumption display. In *CHI ’09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2009), CHI EA ’09, ACM, pp. 4417–4422.