Communauté
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA

COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Informatique**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Jérémy Wambecke

Thèse dirigée par **Monsieur Georges-Pierre BONNEAU**
Professeur des Universités, Université Grenoble Alpes

et co-dirigée par **Monsieur Renaud BLANCH**
Maître de Conférences, Université Grenoble Alpes

et co-dirigée par **Monsieur Romain VERGNE**
Maître de Conférences, Université Grenoble Alpes

préparée au sein du **Laboratoire Jean Kuntzmann**
et du **Laboratoire d'Informatique de Grenoble**
dans **l'École Doctorale Mathématiques, Sciences et technologies de l'information, Informatique**

Visualisation de données temporelles personnelles

Thèse soutenue publiquement le **22 Octobre 2018**,
devant le jury composé de :

Monsieur Patrick REIGNIER
Professeur des Universités, Grenoble INP, Président

Monsieur David AUBER
Professeur des Universités, Université Bordeaux I, Rapporteur

Monsieur Stéphane CONVERSY
Professeur des Universités, École Nationale de l'Aviation Civile, Rapporteur

Monsieur Georges-Pierre BONNEAU
Professeur des Universités, Université Grenoble Alpes, Directeur de thèse

Résumé

La production d'énergie, et en particulier la production d'électricité, est la principale responsable de l'émission de gaz à effet de serre au niveau mondial. Le secteur résidentiel étant le plus consommateur d'énergie, il est essentiel d'agir au niveau personnel afin de réduire ces émissions. Avec le développement de l'informatique ubiquitaire, il est désormais aisé de récolter des données de consommation d'électricité des appareils électriques d'un logement. Cette possibilité a permis le développement des technologies *eco-feedback*, dont l'objectif est de fournir aux consommateurs un retour sur leur consommation dans le but de la diminuer. Dans cette thèse nous proposons une méthode de visualisation de données temporelles personnelles basée sur une interaction *what if*, qui signifie que les utilisateurs peuvent appliquer des changements de comportement de manière virtuelle. En particulier notre méthode permet de simuler une modification de l'utilisation des appareils électriques d'un logement, puis d'évaluer visuellement l'impact de ces modifications. Cette méthode a été implémentée dans le système *Activelec*, que nous avons évalué avec des utilisateurs sur des données réelles.

Nous synthétisons les éléments de conception indispensables aux systèmes *eco-feedback* dans un état de l'art. Nous exposons également les limitations de ces technologies, la principale étant la difficulté rencontrée par les utilisateurs pour trouver des modifications de comportement pertinentes leur permettant de consommer moins d'énergie.

Nous présentons ensuite trois contributions. La première contribution est la conception d'une méthode *what if* appliquée à l'*eco-feedback* ainsi que son implémentation dans le système *Activelec*. La seconde contribution est l'évaluation de notre méthode grâce à deux expérimentations menées en laboratoire. Dans ces expérimentations nous évaluons si des participants utilisant notre méthode trouvent des modifications qui économisent de l'énergie et qui nécessitent suffisamment peu d'efforts pour être appliquées en vrai. Enfin la troisième contribution est l'évaluation *in-situ* du système *Activelec* dans des logements personnels pour une durée d'environ un mois. *Activelec* a été déployé dans trois appartements privés afin de permettre l'évaluation de notre méthode en contexte domestique réel. Dans ces trois expérimentations, les participants ont pu trouver des modifications d'utilisation des appareils qui économiseraient une quantité d'énergie significative, et qui ont été jugées faciles à appliquer en réalité.

Nous discutons également de l'application de notre méthode *what if* au delà des données de consommation électrique au domaine de la visualisation personnelle, qui est définie comme l'analyse visuelle des données personnelles. Nous présentons ainsi plusieurs applications possibles à d'autres données temporelles personnelles, par exemple concernant l'activité physique ou les transports. Cette thèse ouvre de nouvelles perspectives pour l'utilisation d'un paradigme d'interaction *what if* pour la visualisation personnelle.

Abstract

The production of energy, in particular the production of electricity, is the main responsible for the emission of greenhouse gases at world scale. The residential sector being the most energy consuming, it is essential to act at a personal scale to reduce these emissions. Thanks to the development of ubiquitous computing, it is now easy to collect data about the electricity consumption of electrical appliances of a housing. This possibility has allowed the development of *eco-feedback* technologies, whose objective is to provide to consumers a feedback about their consumption with the aim to reduce it. In this thesis we propose a personal visualization method for time-dependent data based on a *what if* interaction, which means that users can apply modifications in their behavior in a virtual way. Especially our method allows to simulate the modification of the usage of electrical appliances of a housing, and then to evaluate visually the impact of the modifications. This approach has been implemented in the *Activelec* system, which we have evaluated with users on real data.

We synthesize the essential elements of conception for *eco-feedback* systems in a state of the art. We also outline the limitations of these technologies, the main one being the difficulty faced by users to find relevant modifications in their behavior to decrease their energy consumption.

We then present three contributions. The first contribution is the development of a *what if* approach applied to *eco-feedback* as well as its implementation in the *Activelec* system. The second contribution is the evaluation of our approach with two laboratory studies. In these studies we assess if participants using our method manage to find modifications that save energy and which require a sufficiently low effort to be applied in reality. Finally the third contribution is the *in-situ* evaluation of the *Activelec* system. *Activelec* has been deployed in three private housings and used for a duration of approximately one month. This *in-situ* experiment allows to evaluate the usage of our approach in a real domestic context. In these three studies, participants managed to find modifications in the usage of appliances that would save a significant amount of energy, while being judged easy to be applied in reality.

We also discuss the application of our *what if* approach to the domain of personal visualization, beyond electricity consumption data, which is defined as the visual analysis of personal data. We hence present several potential applications to other types of time-dependent personal data, for example related to physical activity or to transportation. This thesis opens new perspectives for using a *what if* interaction paradigm for personal visualization.

Remerciements

Je remercie en premier lieu mes encadrants Georges-Pierre, Renaud et Romain pour tout ce qu'ils m'ont apporté. Ils ont fait preuve d'une grande écoute et ont toujours été disponibles pour m'aider dans cette thèse. Notre collaboration fut un réel plaisir pour moi.

Je remercie le LabEx PERSYVAL-Lab (ANR-11-LABX-0025-01), qui a financé cette thèse.

Je remercie ensuite les membres du jury : Patrick Reignier qui a présidé ce jury, ainsi que David Auber et Stéphane Conversy qui ont accepté de rapporter cette thèse. Je remercie également le jury pour les retours et questions très intéressants au cours de la soutenance.

Je dois également remercier mes collègues des deux laboratoires dans lesquels j'ai effectué cette thèse, dont un nombre important sont devenus des amis. Ils ont en effet été d'une grande aide, non seulement pour apporter des conseils mais également pour me permettre de me détendre durant les (nombreuses) pauses. Parmi ces collègues je remercie tout particulièrement celles et ceux qui ont participé aux expérimentations, et surtout à l'expérimentation in-situ qui impliquait des visites régulières chez eux.

Enfin je remercie ma famille qui m'a toujours soutenu dans mes études et grâce à laquelle j'ai pu réaliser cette thèse.

Table des matières

Introduction **15**

I État de l'art 21

1 Contexte : transition énergétique et domotique **23**

1.1 La transition énergétique, des États aux individus 24

1.2 La domotique portée par l'informatique ubiquitaire 36

2 Visualiser et interagir avec l'information **43**

2.1 Visualisation de données temporelles 44

2.2 L'approche *what if* 50

2.3 Visualisation personnelle 57

3 Visualiser la consommation d'énergie domestique **71**

3.1 Définitions et exemples de systèmes 72

3.2 Études quantitatives 75

3.3 Études comportementales 77

3.4 Études de conception 80

3.5 Systèmes interactifs 82

3.6 Conclusion 88

II Contributions **91**

4 *Activelec* : un système appliquant le *what if* à l'*eco-feedback* **93**

4.1 Une approche *what if* pour l'*eco-feedback* 95

4.2 Conception du système *Activelec* 102

4.3 Conclusion 118

5 Évaluation de l'approche *what if* et du système *Activelec* en laboratoire **119**

5.1 Étude d'utilisabilité 121

5.2 Étude avec données propres aux participants 134

5.3 Conclusion 145

6 Déploiement et évaluation du système *Activelec* dans des logements personnels **147**

6.1 Objectifs 149

6.2 Matériel 150

6.3 Protocole 151

6.4 Logements, participants et appareils 153

6.5 Résultats quantitatifs 157

6.6 Ressenti utilisateur 167

6.7 Discussion 169

III Perspectives **173**

7 Généralisation de la méthode à la visualisation personnelle **175**

7.1 Conception d'applications *what if* pour la visualisation personnelle . . . 177

7.2 Domaines d'application 181

7.3 Avantages de l'approche 188

7.4 Discussion 190

8 Autres perspectives **193**

8.1 Améliorations de la méthode 194

8.2 Améliorations du système *Activelec* 196

Conclusion **204**

Table des figures

1.1 Répartition des sources d'énergie primaires consommées pour la production d'énergie dans le monde en 1971 et 2013. 24

1.2 Évolution des émissions de CO_2 dans le monde entre 1970 et 2014. . . . 25

1.3 Évolution de la température annuelle moyenne mondiale. 26

1.4 Répartition de la consommation d'énergie primaire en France en 2014 . 27

1.5 Origine des émissions de CO_2 dues à la combustion d'énergie. 28

1.6 Consommation d'énergie finale du secteur résidentiel par source d'énergie en France en 1990 et 2013. 30

1.7 Répartition par usage des consommations d'énergie des ménages dans leur logement en France. 31

1.8 Évolution de la consommation électrique par logement et par usage en France. 32

1.9 Puissance moyenne, fréquence d'utilisation et consommation annuelle d'appareils électriques courants. 33

1.10 Courbe de charge estimée la veille et courbe de charge réelle du réseau électrique français le 13 Février 2018. 34

1.11 Exemples d'applications de la domotique. 38

1.12 Compteur électrique *Linky* et réfrigérateur connecté. 39

1.13 Exemples de dispositifs de mesure de la consommation électrique installables par les particuliers. 41

2.1 Pipeline de la visualisation d'information. 44

2.2 *Sparklines*, un exemple de visualisation de données temporelles continues. 46

2.3 *LifeLines*, un exemple de visualisation de données temporelles discrètes 46

2.4 Visualisation de données temporelles à base de spirales. 47

2.5 Visualisation de l'espérance de vie de pays en fonction du PIB par personne tirée de *Trendalyzer*. 48

2.6 Techniques étudiées par Javed *et al.* pour la visualisation de séries temporelles multiples. 49

2.7 *Ten Brighter Ideas ? An Explorable Explanation*, un exemple de document réactif. 54

2.8 Technique *what if* du système *TimeFork*. 55

2.9 Étapes dans l'utilisation des systèmes d'informatique personnelle. . . . 57

2.10 Présentation d'un utilisateur lors d'une rencontre de *Quantified selfers* 59

2.11 Le système de visualisation ambiant *InfoCanvas*. 60

2.12 Visualisation de l'activité physique tirée de *IMPACT*. 64

2.13 Visualisations de facteurs influençant le sommeil tirées de *SleepExplorer*. 65

2.14 Visualisation de la bande passante d'un logement tirée de *Kermit*. . . . 66

2.15 Visualisation des finances personnelles tirée de *Mint*. 67

3.1 Exemples de systèmes d'*eco-feedback* ambiants. 73

3.2 Visualisation de la consommation électrique d'un logement tirée du portail d'*Enedis*. 74

3.3 Visualisation de la consommation électrique d'un logement tirée de *MyElectric*. 75

3.4 Récapitulatif des gains des participants lors des études quantitatives menées selon le type de méthode *eco-feedback*. 77

3.5 Visualisation d'événements d'une maison connectée tirée de *open.DASH*. 83

3.6 Visualisation temporelle tirée de *Figure Energy*. 84

3.7 Méthode *what if* du système *Figure Energy*. 84

3.8 Visualisation de la consommation de plusieurs appareils tirée de *Demand Horizons*. 85

3.9 Capture d'écran du jeu persuasif *Power House*. 86

3.10 Captures d'écran du jeu pervasif *Power Agent*. 87

4.1 Modèle de données de notre méthode *what if*. 96

4.2 Illustration de l'association entre appareils et états par le modèle de données. 96

4.3 Exemples de modifications appliquées sur les données de deux appareils. 98

4.4 Interface du mode *appareils* du système *Activelec*. 102

4.5 Interface du mode *instances* du système *Activelec*. 103

4.6 Évolution de l'axe du temps sur quatre niveaux de zoom du système *Activelec*. 104

4.7 Algorithme de construction des diagrammes en courbes. 105

4.8 Influence de la taille du noyau gaussien sur le filtrage des données de consommation d'une télévision. 106

4.9 Affichage des données initiales en plus des données modifiées pour comparaison. 107

4.10 Critères de sélection disponibles pour la sélection des instances par critères. 108

4.11 Panneau de sélection par critères. 109

4.12 Affichage des instances sélectionnées sur la visualisation en temps réel. 110

4.13 Types de modifications disponibles sur les instances sélectionnées. . . . 111

4.14 Liste des modifications affichée en mode *instances*. 113

4.15 Algorithmes d'extraction des instances à partir des données brutes. . . 114

4.16 Outil de création et de gestion du modèle de données. 115

4.17 Architecture logicielle du système *Activelec*. 117

5.1 Évolution sur une durée de un mois de la consommation des appareils utilisés pendant la première expérimentation. 123

5.2 Description des données des appareils utilisés pour la première expérimentation. 124

5.3 Résultats quantitatifs de la première expérimentation. 127

5.4 Graphique des résultats quantitatifs normalisés de la première expérimentation. 127

5.5 Modifications les plus appliquées par les participants sur les appareils pendant la tâche de la première expérimentation. 128

5.6 Moyennes et écarts types des notes des participants au questionnaire de la première expérimentation. 130

5.7 Évolution sur une durée de cinq jours de la consommation des appareils du premier participant à la deuxième expérimentation. 135

5.8 Évolution sur une durée de six jours de la consommation des appareils du second participant à la deuxième expérimentation. 136

5.9 Description des données des appareils utilisés par le premier participant pour la seconde expérimentation. 137

5.10 Description des données des appareils utilisés par le second participant pour la seconde expérimentation. 138

5.11 Modifications appliquées par les participants sur les appareils au cours de la seconde expérimentation. 140

5.12 Résultats du questionnaire rempli par les participants à la fin de la seconde expérimentation. 142

6.1 Matériel déployé chez les participants pour la récolte des données de consommation lors de l'expérimentation *in-situ*. 150

6.2 Nombre de participants et appareils instrumentés pour chaque logement de l'expérimentation *in-situ*. 153

6.3 Description des données des appareils du logement 1 de l'expérimentation *in-situ*. 155

6.4 Description des données des appareils du logement 2 de l'expérimentation *in-situ*. 156

6.5 Description des données des appareils du logement 3 de l'expérimentation *in-situ*. 157

6.6 Statistiques d'analyse des appareils par les participants lors de l'expérimentation *in-situ*. 159

6.7 Modifications déclarées appliquées ou voulant être appliquées en vrai par les participants lors de l'expérimentation *in-situ*. 161

6.8 Exemples de modifications testées dans le système par les participants lors de l'expérimentation *in-situ*. 162

6.9 Consommation totale par jour des appareils instrumentés de chaque logement au cours de l'expérimentation *in-situ*. 165

6.10 Signes visibles de la modification appliquée dans le logement 2 sur les enceintes au cours de l'expérimentation *in-situ*. 166

7.1 Modèle de données de notre méthode *what if* généralisée. 177

7.2 Boucle d'interaction de notre méthode *what if* généralisée. 179

7.3 Pipeline de visualisation comprenant les modifications de notre méthode *what if*. 179

7.4 Prix variable selon le jour avec l'option *Tempo* de *EDF*. 182

7.5 Exemple d'application potentielle de notre méthode *what if* généralisée à des données de transport. 185

7.6 Exemple d'application de notre méthode *what if* généralisée à des données d'activité physique. 186

7.7 Exemple d'application de notre méthode *what if* généralisée à des données financières. 188

8.1 Instances de l'état *éteint* avec une aire non vide dans la visualisation du mode *instances* de *Activelec*. 197

Introduction

Dans cette introduction, nous commençons par présenter les motivations et le contexte de la thèse. Nous introduisons ensuite nos contributions, avant d'exposer le plan du document.

Motivations

Changement climatique et consommation d'énergie

Nous savons désormais que le réchauffement climatique est dû aux activités humaines, et qu'il va nuire à l'ensemble de l'écosystème terrestre [129]. En particulier la production d'électricité est une des principales responsables d'émissions de gaz à effet de serre, dépassant les transports [2]. Cette production repose encore pour la majorité sur des centrales à combustion, très émettrices de gaz à effet de serre. Le secteur résidentiel étant le principal consommateur d'énergie, chacun a son rôle à jouer pour réduire la portée du changement climatique. Afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre, nous devons donc aider les particuliers à trouver des moyens de réduire leur consommation d'énergie. Cette thèse s'inscrit dans ce contexte qui impose d'aider les particuliers à trouver des modifications dans leur comportement, leur permettant de réduire leur consommation d'électricité domestique.

Certaines initiatives ont été prises pour aider les particuliers, par exemple des campagnes médiatiques préconisant l'extinction des lumières ou des appareils en veille. Or ces conseils peuvent s'avérer inefficaces pour beaucoup de logements, car leur efficacité dépend de la consommation des appareils électriques. Grâce au développement de l'informatique ubiquitaire, et en particulier de la domotique, il est désormais possible de mesurer la consommation d'électricité d'un logement, voire celle des appareils individuels. Il est ensuite possible de fournir aux consommateurs des technologies de visualisation de leur consommation, appelées technologies *eco-feedback* [15, 21, 57, 122, 125].

Toutefois la plupart de ces visualisations sont limitées, et notamment présentent peu de moyens d'interaction à l'utilisateur [69]. Surtout, lors d'études précédemment menées sur ces technologies, la plupart des participants ont pointé la difficulté à trouver des modifications de comportement pertinentes, qui permettent d'économiser de l'énergie [15, 21, 69, 125]. Ainsi dans cette thèse notre objectif est la conception d'une visualisation interactive permettant aux utilisateurs de trouver des modifications dans l'utilisation de leurs appareils qui leur conviennent. Ces modifications auront ainsi plus de chances d'être adoptées au quotidien par les utilisateurs.

Visualisation personnelle

Cette thèse se concentre principalement sur la visualisation de la consommation d'électricité. Dans nos contributions, nous étudions l'application d'une méthode de visualisation à l'*eco-feedback*. Toutefois notre méthode se base sur l'état de l'art de la visualisation personnelle, qui est définie comme l'analyse visuelle des données personnelles dans le but de trouver des changements de comportement bénéfiques. Notre méthode pourrait ainsi s'appliquer également à d'autres applications de la visualisation personnelle, par exemple des données d'activité physique ou de finances personnelles, sans nécessiter beaucoup de modifications. Ces applications ne sont pas abouties et ne sont donc pas des contributions, mais sont discutées en tant que perspectives de cette thèse (Chapitre 7).

Contributions

Activelec, un système implémentant une approche *what if* pour l'*eco-feedback*

Notre première contribution est une approche *what if*, permettant aux utilisateurs de tester des changements de comportements virtuels et d'évaluer leur impact sur la consommation d'énergie. Ce paradigme d'interaction permet en particulier d'évaluer le compromis entre l'énergie économisée par un changement dans l'utilisation des appareils électriques, et l'effort à fournir pour appliquer cette modification au quotidien. Notre méthode se base sur un modèle de données dans lequel les appareils sont associés à des états qui évoluent au cours du temps. Le système *Activelec* implémente cette approche *what if* et est conçu en prenant en compte les règles de conception tirées de l'état de l'art en visualisation personnelle et *eco-feedback*. Ce système est basé sur deux modes d'interaction. Le premier mode est conçu pour analyser et comparer tous les appareils du logement, et en particulier permet de choisir les appareils sur lesquels se concentrer. Le second mode permet d'analyser l'utilisation d'un appareil ainsi que sa consommation, et implémente l'application de scénarios *what if*. Ce système est utilisable en pratique sur des données réelles, qui sont récoltées au préalable ou à la volée via un dispositif de mesure de consommation.

Évaluation de l'utilisabilité de la méthode *what if* et de *Activelec*

Afin d'évaluer l'utilisabilité de la méthode et du système, nous avons conduit deux expérimentations en laboratoire, qui forment la seconde contribution de cette thèse. Dans ces deux études, les participants utilisent des données réelles dans une tâche libre, avec pour

objectif la recherche de modifications économisant de l'énergie. Nous évaluons les interactions effectuées avec le système, les modifications trouvées par les participants ainsi que le ressenti utilisateur. En particulier les participants indiquent explicitement quel effort ils devraient placer dans ces modifications pour les appliquer en réalité. Pour la première expérimentation, les participants utilisent les mêmes données, qui ne viennent pas des participants. Pour la seconde expérimentation, les données proviennent des participants afin d'étudier comment ceux-ci apportent leurs propres connaissances sur leur comportement dans le processus d'interaction. Ces deux expérimentations montrent que les participants arrivent à trouver rapidement des modifications efficaces en termes d'économies d'énergie, et qui ne nécessitent que peu d'effort pour être appliquées.

Déploiement et évaluation de la méthode en contexte domestique personnel

Les expérimentation menées en laboratoire montrent que la méthode est utile pour trouver des modifications de comportement pertinents. Toutefois le contexte d'utilisation en laboratoire est différent d'un contexte domestique personnel, là où notre système *Activelec* a vocation à être utilisé. En particulier nous voulons étudier les effets d'utilisations répétées et potentiellement plus longues que durant les expérimentations en laboratoire. Enfin nous voulons aussi étudier la volonté d'application réelle des modifications trouvées grâce à notre méthode. C'est pourquoi la troisième contribution de cette thèse est une expérimentation *in situ* dans laquelle nous déployons le système dans trois logements privés. Nous étudions principalement l'interaction, les modifications appliquées et le ressenti utilisateur. En particulier nous demandons aux participants s'ils ont appliqué des modifications trouvées ou s'ils envisagent de le faire. Tous les participants ont appliqué ou ont l'intention d'appliquer dans leur logement des modifications trouvées grâce à notre méthode. Cette expérimentation montre que notre méthode est utilisable dans un contexte personnel réel. Elle permet de trouver des modifications de comportement qui économisent de l'énergie, tout en convenant aux choix personnels des utilisateurs.

Plan de la thèse

État de l'art

- Le Chapitre 1 introduit le contexte de la thèse. La première partie de ce chapitre présente les enjeux de la gestion de la consommation d'énergie, et établit le lien avec le changement climatique. La seconde partie présente l'essor de l'informatique ubiquitaire et de la domotique, qui permet la récolte de données personnelles.

- Le Chapitre 2 présente les travaux précédents liés aux contributions de cette thèse dans les domaines de la visualisation de données temporelles, des approches *what if* et de la visualisation personnelle.
- Le Chapitre 3 est dédié à l'état de l'art de la visualisation de consommation d'électricité, également appelée *eco-feedback*. Nous présentons les différents types de systèmes permettant de fournir un retour sur la consommation. Nous synthétisons les éléments de conception essentiels pour les systèmes *eco-feedback*, ainsi que les limitations à résoudre pour rendre ces systèmes plus efficaces.

Contributions

- Le Chapitre 4 présente notre méthode *what if* ainsi que le système *Activelec* qui l'implémente. La première partie de ce chapitre présente le raisonnement de conception du système. La seconde partie détaille l'implémentation du système *Activelec*.
- Le Chapitre 5 est dédié aux deux expérimentations menées en laboratoire. Ces expérimentations sont conçues pour évaluer le potentiel de notre méthode pour trouver des modifications pertinentes dans l'utilisation des appareils électriques.
- Le Chapitre 6 expose l'expérimentation *in situ* menée dans des logements privés. Nous présentons notamment le protocole de cette expérimentation ainsi que l'analyse des résultats obtenus.

Perspectives

- Le Chapitre 7 est une discussion sur la généralisation de notre méthode à la visualisation personnelle. Nous présentons les éléments de conception indispensables à notre méthode pour son application. Nous fournissons également des exemples d'application de notre méthode à des données personnelles différentes de l'énergie.
- Le Chapitre 8 expose les autres perspectives de cette thèse, notamment des améliorations possibles pour notre méthode et le système *Activelec*.

Première partie

État de l'art

Chapitre 1

Contexte : transition énergétique et domotique

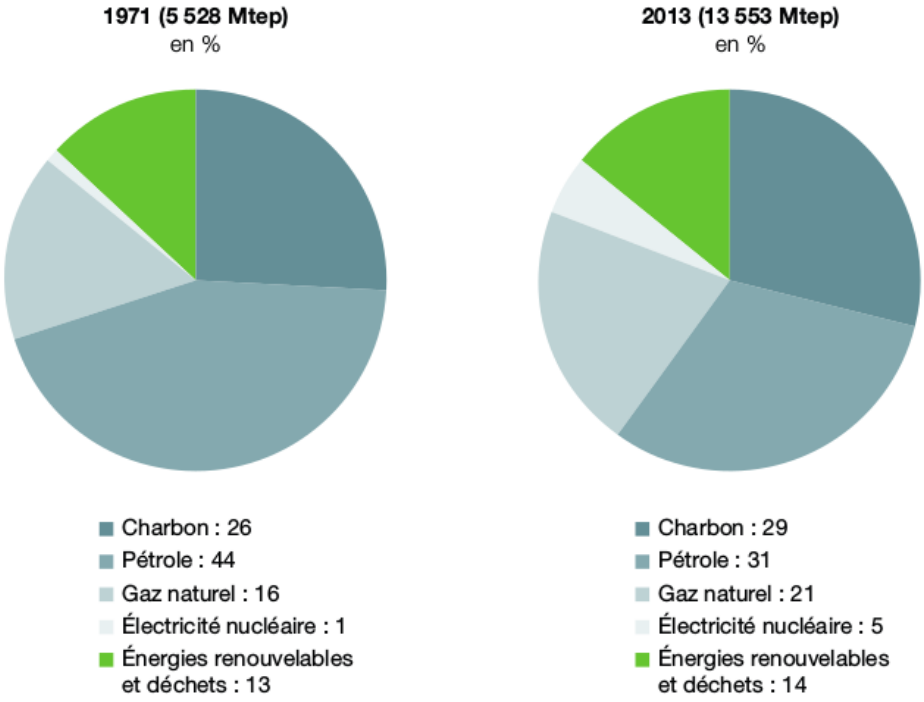


Figure 1.1 – *Répartition des sources d'énergie primaires consommées pour la production d'énergie dans le monde en 1971 et 2013. Source : I4CE[74]*

1.1 La transition énergétique, des États aux individus

Cette première section est extérieure au domaine de l'informatique car elle présente le contexte socio-économique de la thèse : la transition énergétique et la consommation d'énergie des ménages. Ce contexte est essentiel afin de saisir l'enjeu des contributions de cette thèse. Nous présentons tout d'abord la transition énergétique qui vise essentiellement à repenser production, distribution et consommation d'énergie (1.1.1). Nous expliquons également pourquoi la transition énergétique repose de manière importante sur les individus, responsables d'une des parts les plus importantes de consommation d'énergie (1.1.2). Nous exposons ensuite l'évolution des sources d'énergie domestiques (1.1.3). Nous finissons cette section avec l'énergie électrique, enjeu majeur en raison de l'augmentation de sa consommation au cours du siècle dernier et de son omniprésence dans notre société (1.1.4).

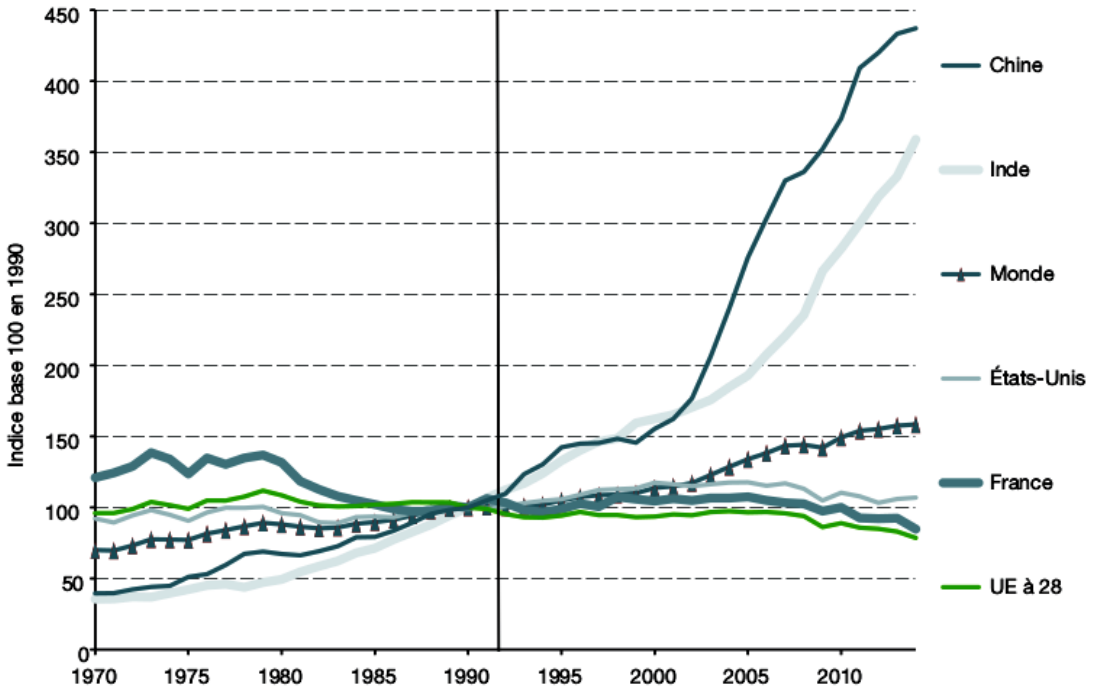


Figure 1.2 – *Évolution des émissions de CO_2 dans le monde entre 1970 et 2014. Source : I4CE[74]*

1.1.1 Des hydrocarbures à la transition énergétique

La révolution industrielle qui a débuté au 19e siècle a engendré une modification profonde des modes de production, d'acheminement et d'utilisation de l'énergie. Depuis cette période, la majorité de l'énergie produite provient en effet de la combustion d'hydrocarbures, principalement le pétrole, le charbon et le gaz. Cette tendance a peu changé depuis, comme on peut le voir sur la Figure 1.1, la part du charbon ayant même augmenté entre 1971 et 2013. De plus la quantité d'énergie primaire utilisée dans le monde a plus que doublé ; une augmentation qui est due au développement des pays émergents, à l'augmentation de la population mondiale et également à l'augmentation de la consommation d'énergie par habitant. Si les émissions de certains pays développés tendent à se stabiliser voire à diminuer, comme par exemple celles de l'union Européenne ou des États-unis, les émissions des pays émergents comme la Chine et l'Inde augmentent (Figure 1.2). Ces augmentations ne sont pas compensées par les efforts des pays développés, résultant en une augmentation des émissions mondiales de gaz à effet de serre [74].

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, en particulier du CO_2, provoque une augmentation de la température au niveau mondial

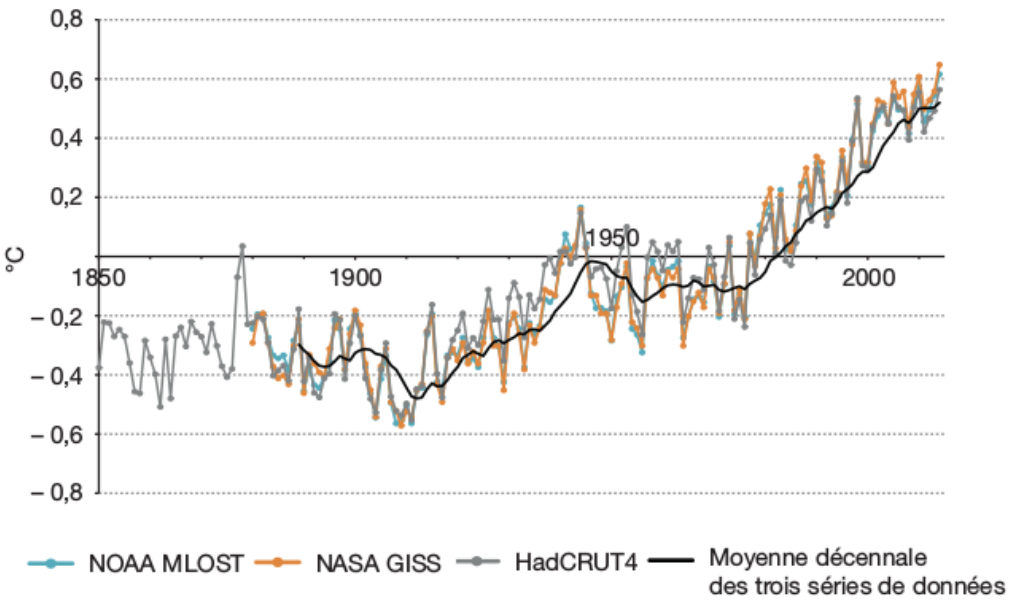


Figure 1.3 – *Évolution de la température annuelle moyenne mondiale entre 1850 et 2015 selon 3 sources de données. Source : I4CE[74]*

(Figure 1.3). En plus de menacer la biodiversité [129], cette augmentation de température causée par l'homme entraîne à plus ou moins long terme des conséquences néfastes pour les habitants : augmentation du nombre et de l'intensité des catastrophes naturelles [66], augmentation de l'intensité des sécheresses [132] ou encore diminution du rendement des cultures [74]. En plus des gaz à effet de serre, la production et l'utilisation de l'énergie conduit à l'augmentation de la concentration des particules en suspension dans l'air, qui représentent une menace directe pour la santé [75]. Ces particules proviennent en grande partie du chauffage au bois, des véhicules à combustion fossile et des centrales thermiques de production d'électricité.

Afin d'atténuer le changement climatique, des plans d'action sont mis en place à différentes échelles. Ceux-ci présentent les objectifs à atteindre à moyen et long terme, essentiellement en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les mesures de ces plans d'action portent principalement sur l'augmentation de la part d'énergie renouvelable et l'amélioration de l'efficacité énergétique, définie comme une diminution de la quantité d'énergie nécessaire pour répondre à un même service. Au niveau mondial, l'*accord de Paris* [98] rédigé pendant la COP 21 et signé par 196 pays est le premier accord universel sur le climat. Ce texte a pour principaux objectifs la limitation de la hausse de la température moyenne mondiale à 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels, ainsi que le plafonnement des émissions de gaz à effet de serre. La commission européenne a adopté le *paquet énergie climat* en 2008 [30], qui a été révisé en 2014 [33]. Ces actes législatifs comportent les objectifs suivants à l'horizon 2030 pour les pays membres de l'Union Européenne :

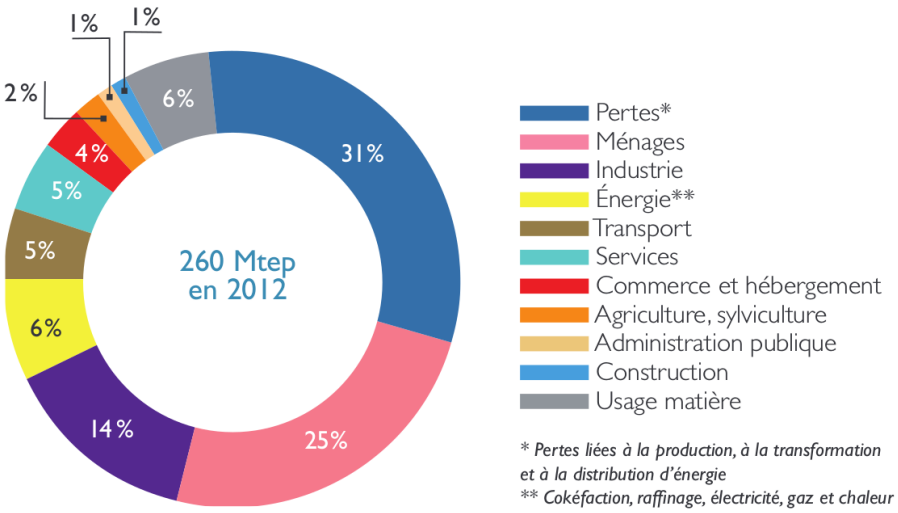


Figure 1.4 – *Répartition de la consommation d'énergie primaire par secteur en France en 2014. Les consommations des véhicules particuliers sont attribuées aux ménages. Source : Ademe[2]*

- Diminuer de 40% les émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990
- Porter la part des énergies renouvelables à 27% de la consommation finale d'énergie en 2030
- Améliorer de 27% l'efficacité énergétique

Enfin au niveau français, la *loi de transition énergétique pour la croissance verte* [91] du 17 Août 2015 définit des objectifs au niveau national :

- Diminuer de 40% les émissions de gaz à effet de serre en 2030 par rapport à 1990 (en accord avec les objectifs européens)
- Diminuer de 30% la consommation d'énergies fossiles en 2030
- Porter la part des énergies renouvelables à 32% de la consommation finale d'énergie et à 40% de la production d'électricité en 2030
- Réduire la consommation énergétique finale de 50% en 2050 par rapport à 2012
- Diminuer de 50% les déchets mis en décharge à l'horizon 2025
- Diversifier la production d'électricité et baisser à 50% la part du nucléaire à l'horizon 2025

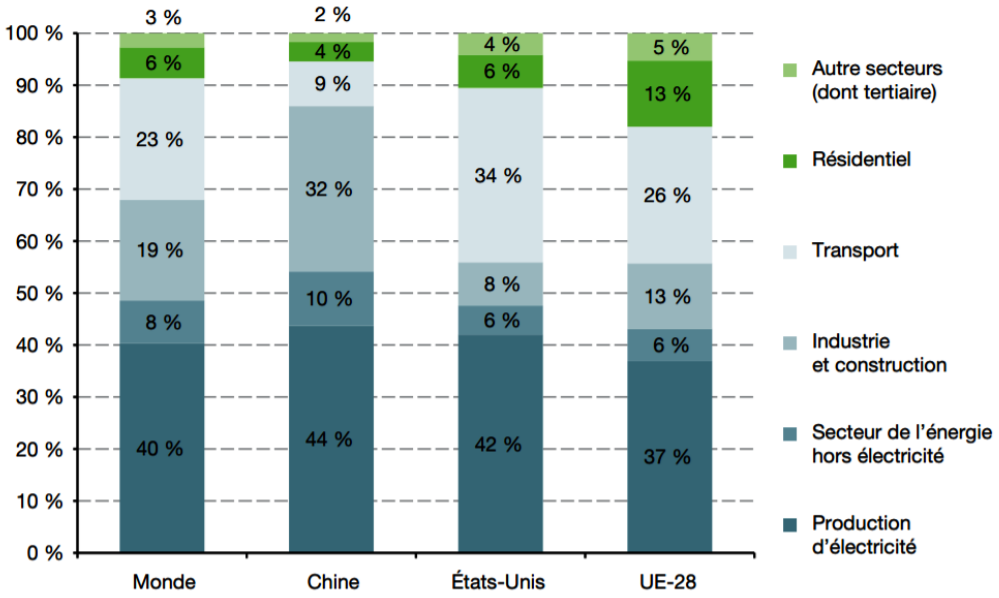


Figure 1.5 – *Origine des émissions de CO_2 dues à la combustion d'énergie par secteur parmi les principales régions émettrices en 2013. Source : Ademe[2]*

Dans l'opinion publique, les secteurs de l'industrie et des transports sont vus à juste titre comme contributeurs directs de l'émission de gaz à effet de serre. Ainsi en France 90% de personnes interrogées classent ces secteurs comme étant *assez* ou *beaucoup* contributeurs à l'effet de serre [4]. Les plans d'action précédemment évoqués comportent des mesures pour diminuer ces émissions, comme par exemple le développement de transports propres ou encore la mise en place de quotas d'émissions pour les entreprises. En revanche, ces secteurs ne sont pas les plus gros émetteurs directs de gaz à effet de serre. En France, la plus importante part d'énergie primaire est due aux pertes, provenant de la transformation et de l'acheminement de l'énergie (Figure 1.4). Cependant le second secteur le plus consommateur d'énergie primaire est celui des ménages, qui correspond donc au premier secteur socio-économique en termes de consommation d'énergie. La consommation d'un logement peut sembler dérisoire à côté de celle d'une industrie, mais le nombre très important de logements en fait le secteur le plus consommateur. Les particuliers représentent une grande réserve potentielle d'économies d'énergies et ont donc un grand pouvoir de réduction des émissions de gaz à effet de serre. De plus on peut remarquer que dans le monde et parmi les plus grandes puissances mondiales, c'est bien le secteur de la production d'électricité qui induit le plus d'émissions de gaz à effet de serre (Figure 1.5). Or seules 65% de répondants à un sondage classent les centrales de production d'électricité au gaz, au charbon et au fuel comme étant *assez* ou *beaucoup* contribuantes à l'effet de serre [4].

1.1.2 La nécessité d'une transition individuelle accompagnée

La transition énergétique, qui représente une modification structurelle de la production et de la consommation d'énergie, doit donc passer par les individus. Afin d'accompagner les habitants dans cette transition énergétique, les acteurs nationaux et régionaux proposent des mesures destinées aux particuliers, notamment en développant les énergies renouvelables et en améliorant l'efficacité énergétique. Par exemple la *loi de transition énergétique pour la croissance verte* [91] du 17 Août 2015 contient les mesures suivantes :

- Aides à l'isolation pour les particuliers et obligation d'isolation des bâtiments neufs
- Aides aux particuliers pour le remplacement de véhicules et le développement des transports propres
- Lutte contre le gaspillage, réduction des déchets et développement du recyclage
- Primes à la production d'énergie renouvelable et aides à l'autoconsommation électrique (consommer sa propre électricité renouvelable produite au niveau du logement)
- Individualisation des frais de chauffage et développement des compteurs dits "intelligents"

Ces aides seules ne sont pas suffisantes. En effet, les économies d'énergie réalisées au niveau des ménages dépendent de facteurs divers qui peuvent être limitants. A titre d'exemple, seules 16% des personnes interrogées envisagent d'investir dans les énergies renouvelables pour leur domicile en France [97]. Parmi les raisons invoquées par les réfractaires figurent en tête le coût trop élevé pour 41% des répondants et le fait d'être locataire pour 28% des répondants. Les mêmes blocages sont à noter pour les travaux de rénovation énergétique, avec cette fois 48% pour le coût des travaux et 36% pour le fait d'être locataire. Si toutefois l'isolation des logements est actuellement la mesure la plus performante en termes d'économies d'énergie [2], elle n'est pas la seule mesure envisageable pour les particuliers. Ainsi investir dans des appareils électroménagers moins consommateurs permet de diminuer la consommation électrique. L'investissement réalisé est alors moins important et le fait d'être locataire n'est pas bloquant. Mais des changements dans la vie de tous les jours des individus peuvent engendrer des économies d'énergie non négligeables. Les individus sont en effet les principaux acteurs de la consommation d'énergie via leur comportement. Il est toutefois impossible d'abandonner du jour au lendemain notre mode de vie actuel : diminuer la consommation d'énergie des ménages demande des efforts de la part des individus qui peuvent sembler difficiles à fournir au premier abord. Ainsi en France 69% de personnes interrogées sont d'accord avec le fait que pour économiser l'énergie, il faut renoncer à une partie de son confort [36].

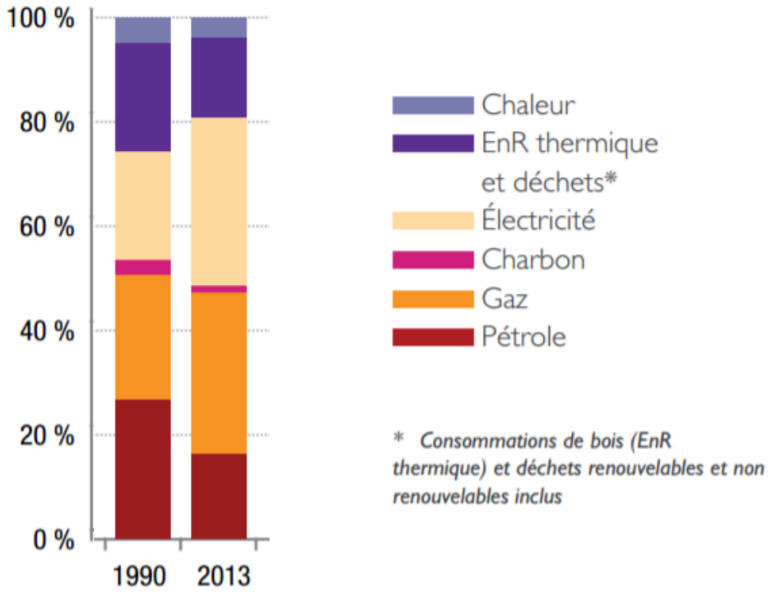


Figure 1.6 – *Consommation d'énergie finale du secteur résidentiel par source d'énergie en France en 1990 et 2013. (EnR : énergies renouvelables). Source : Ademe[2]*

Cependant plusieurs sources de motivation peuvent pousser les ménages à moins consommer. Ces motivations peuvent être liées à une récompense (motivations extrinsèques) ou peuvent venir de l'utilisateur lui-même (motivations intrinsèques) [113]. D'un côté, consommer moins d'énergie permet de diminuer la facture énergétique et induit des gains financiers non négligeables. Par exemple dégivrer son réfrigérateur permet d'économiser jusqu'à 30% de l'énergie qu'il consomme [3], ce qui peut représenter une économie d'environ 16 euros par an [51] avec un seul geste sur un seul appareil. Le gain financier est la principale motivation, extrinsèque, pour la majorité des individus. Ainsi en France un total de 81% de sondés choisissent des motivations extrinsèques comme incitation principale à la réduction de consommation d'énergie (volonté d'éviter le gaspillage, augmentation du coût de l'énergie et économie d'argent) [65]. Une autre source de motivation possible pour les particuliers est l'environnement, qui est choisie par 14% des répondants au même sondage. Ces motivations, extrinsèques ou intrinsèques, peuvent se traduire en actes permettant d'économiser au quotidien. Par exemple, 59% de français interrogés déclarent éteindre davantage les lumières et 54% déclarent baisser ou éteindre le chauffage lorsqu'ils sont absents plus de 48 heures [65]. Ces résultats indiquent qu'un changement des habitudes de la part des particuliers est possible, mais ceux-ci doivent être accompagnés dans ce changement. Pour toutes ces raisons dans cette thèse nous nous concentrons sur la consommation d'énergie des logements et les comportements individuels.

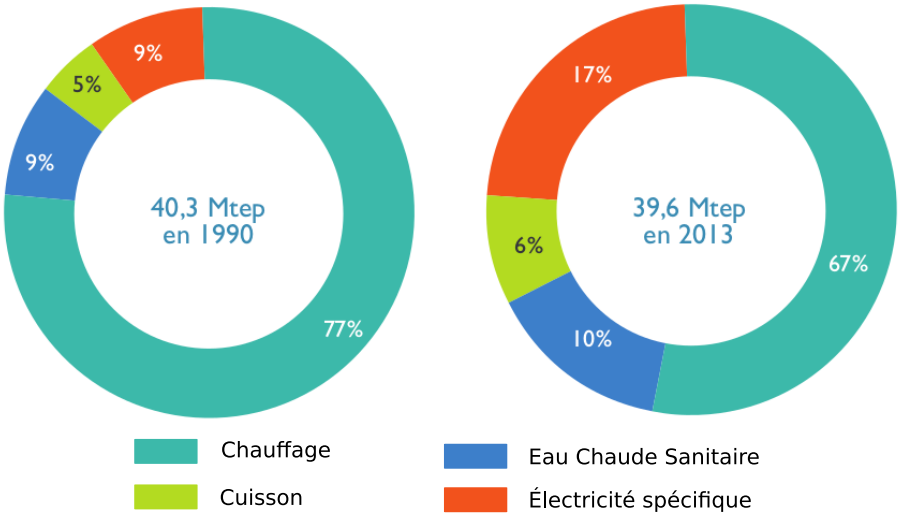


Figure 1.7 – *Répartition par usage des consommations d'énergie des ménages dans leur logement en France. Mtep : million de tonnes équivalent pétrole, énergie équivalente à celle produite par la combustion d'un million de tonnes de pétrole. Source : Ademe[2]*

1.1.3 Une consommation d'énergie domestique en évolution

Nous avons vu que les logements et leurs habitants consommaient la plus grande part d'énergie et représentaient également un grand potentiel d'économies d'énergie. Nous allons désormais étudier l'utilisation de l'énergie par les ménages ainsi que l'évolution de cette utilisation. Dans cette thèse nous nous concentrons sur les énergies du logement et excluons les énergies utilisées par les transports, qui sont parfois comptabilisées comme énergies des ménages dans les statistiques. L'habitat et les transports sont responsables à égalité des plus grandes parts d'émissions de CO_2 des ménages, avec 27% chacun en 2012, devançant par exemple l'alimentation [2].

Au cours des 30 dernières années, nos modes de vie ont considérablement évolué et cette évolution se reflète autant sur la composition des ménages que sur leur consommation d'énergie. Le nombre moyen de personnes par ménage a diminué, passant de 2.8 en 1980 à 2.2 en 2015 [2]. La proportion de logements avec une personne seule est devenue la plus importante, passant de 24% en 1982 à 34% en 2012. La diminution du nombre moyen de personnes par ménage entraîne une augmentation de consommation ; il est par exemple plus rentable de chauffer un logement occupé par plusieurs personnes que pour une seule personne. La consommation d'énergie a également évolué en termes de sources primaires utilisées (Figure 1.6). Les proportions de pétrole (dérivé en fioul) et énergies renouvelables thermiques (principalement le bois) ont diminué au profit du gaz mais surtout de l'électricité. Le charbon, très polluant, a quant à lui quasiment disparu. La première raison expliquant cette évolution est le remplacement des sources utilisées pour le chauffage. Les appareils à gaz se sont développés, le gaz

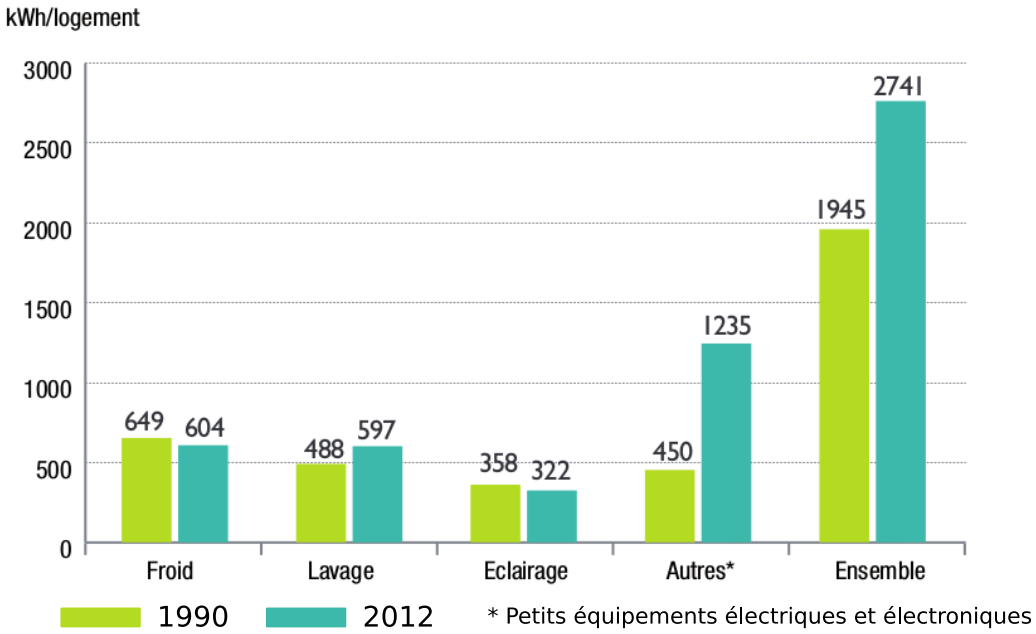


Figure 1.8 – *Évolution de la consommation électrique par logement et par usage en France. Source : Ademe[2]*

étant moins polluant et moins cher que le fioul. La part de chauffage électrique a également beaucoup augmenté, devenant la source de chauffage la plus utilisée dans les logements possédant un chauffage central individuel, le gaz étant la source majoritaire des chauffages collectifs [25].

L'évolution des sources d'énergie consommée est également due à l'évolution des usages de l'énergie, comme le montre la Figure 1.7. Si le chauffage est resté l'usage le plus consommateur d'énergie, la part d'électricité spécifique a presque doublé depuis 1990. Cette part représente l'électricité utilisée par les appareils ne fonctionnant qu'avec l'électricité, par exemple les réfrigérateurs ou les télévisions. L'augmentation de cette part d'électricité s'explique par l'expansion des appareils électroménagers dans un premier temps, puis par le développement des appareils informatiques et électroniques. La Figure 1.8 montre que les consommations d'électricité liées à la réfrigération et à l'éclairage ont légèrement diminué, notamment grâce à l'amélioration de l'efficacité des appareils. Toutefois on peut constater que la consommation imputable aux petits équipements électriques et électroniques a triplé. En plus de l'émission directe de gaz à effets de serre due à la production, l'augmentation de la consommation électrique induit également l'augmentation des émissions dues à la distribution de l'électricité comme nous allons le voir par la suite.

Appareil	Puissance moyenne	Fréquence d'utilisation	Consommation annuelle
Téléviseur LCD	100 W	3 heures / jour	110 kWh
Réfrigérateur	40 W	24 heures / jour	350 kWh
Lave-linge	2200 W	10 heures / semaine	1150 kWh
Four	2000 W	30 minutes / jour	365 kWh
Ordinateur portable	30 W	2 heures / jour	22 kWh
Chargeur de téléphone portable	5 W	1 heure / jour	2 kWh
Ampoule à incandescence	60 W	5 heures / jour	110 kWh
Ampoule basse consommation	12 W	5 heures / jour	22 kWh

Figure 1.9 – *Puissance moyenne, fréquence d'utilisation et consommation annuelle d'appareils électriques courants [51]. La fréquence d'utilisation est hypothétique, la consommation annuelle (dernière colonne) est calculée selon cette fréquence d'utilisation.*

1.1.4 Gérer la consommation électrique, un enjeu majeur

Avant d'aborder sa production et sa distribution, définissons quelques concepts liés à l'électricité. L'énergie au sens physique est une mesure de la capacité d'un système à modifier un état, à produire un mouvement ou de la chaleur. L'énergie électrique est une forme d'énergie spécifique qui est transférée et stockée (en petites quantités) grâce à l'électricité, via un mouvement de charges. Cette dernière peut être produite de différentes façons, par exemple dans des centrales thermiques à partir d'hydrocarbures (charbon, pétrole, gaz) ou dans des centrales nucléaires. Elle peut également être produite de façon renouvelable, notamment via des centrales hydroélectriques, des éoliennes ou des panneaux solaires. L'énergie électrique peut ensuite être utilisée au quotidien par les particuliers, via leurs appareils électriques. La puissance au sens physique exprime la quantité d'énergie par unité de temps fournie d'un système à un autre, c'est à dire le débit d'énergie. La puissance électrique est donc le débit d'énergie transféré entre deux systèmes électriques, typiquement d'une prise de courant à un appareil électrique. Elle est exprimée en watts, un watt étant équivalent à un joule par seconde. L'énergie électrique est quand à elle exprimée en kWh, qui correspond à la consommation d'énergie d'un appareil de puissance 1000 watts pendant une heure. La Figure 1.9 donne la puissance et la consommation annuelle d'appareils électriques courants.

Depuis les premières connections électriques, les réseaux de distribution d'électricité n'ont cessé de s'accroître en raison de l'augmentation du nombre de logements et de la consommation. Les réseaux électriques sont devenus si complexes qu'il est parfois difficile d'identifier l'origine des pannes [9]. Ainsi en 2003 une panne du réseau électrique entraîna une coupure de courant pour 55 millions de personnes aux États-Unis

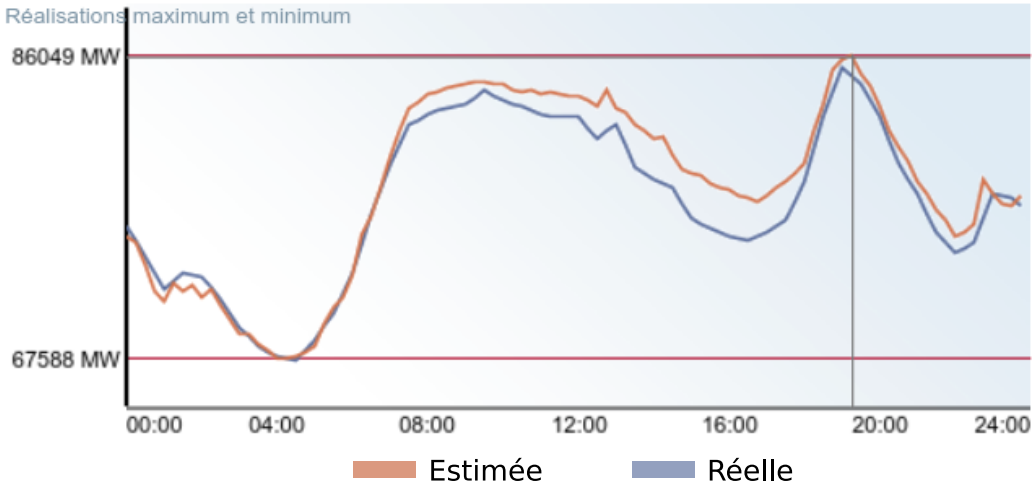


Figure 1.10 – *Courbe de charge estimée la veille (en bleu) et courbe de charge réelle (en orange) du réseau électrique français le 13 Février 2018. Source : RTE [117]*

et Canada pendant plusieurs heures [136]. Les réseaux sont souvent centralisés, avec un nombre réduit de centrales de production dont le courant est distribué au reste du territoire. Le transport de l'électricité par câble occasionne des pertes d'énergie sous forme de chaleur, appelées pertes en ligne. Ces pertes sont limitées en transportant le courant à haute tension dans les lignes électriques mais restent toutefois importantes. En France elles représentent environ 2,5% de la consommation électrique totale, soit 11,5 TWh par an [114], ce qui correspond à la production de deux réacteurs nucléaires de puissance moyenne. Ainsi pour transporter l'électricité au consommateur il faut déjà en consommer une proportion non négligeable. De plus les réseaux électriques ne comportent pas de moyens de stockage de l'énergie [116], ce qui nécessite d'ajuster en permanence la production en fonction de la demande. La demande d'énergie électrique doit donc être estimée à l'avance [115]. Les habitudes de consommation électriques produisent des pics de consommation, particulièrement le soir en hiver lorsque le chauffage est relancé dans tous les logements. La Figure 1.10 montre la courbe de charge estimée la veille et la courbe de charge réelle du réseau français le 13 Février 2018, avec un pic de consommation vers 19 heures. Ces pics de consommation augmentent la pollution car ils nécessitent l'ajout de ressources supplémentaires pour augmenter la production, qui sont principalement des centrales thermiques émettrices de gaz à effet de serre.

Afin d'améliorer la gestion du réseau et de contrer les problèmes que nous venons de citer, les réseaux électriques ont pour vocation d'être transformés en réseaux intelligents avec l'apparition des *smart grids*. Selon Siano [120], une *smart grid* est un réseau électrique qui peut délivrer l'électricité de manière contrôlée et intelligente à partir des points de génération jusqu'aux consommateurs. Grâce à des compteurs intelligents que nous présentons par la suite (1.2.3), les distributeurs d'énergie peuvent connaître la demande des consommateurs en temps réel et donc ajuster la production plus effica-

cement. Les *smart grids* permettent également d'augmenter la proportion des énergies renouvelables, qui sont difficilement incorporables dans les réseaux actuels en fonction de l'intermittence de la production. Par exemple la production de panneaux solaires varie en fonction de l'ensoleillement. Les réseaux électriques intelligents permettent aussi d'adapter le coût de l'énergie en fonction de la demande, ce qui incite les consommateurs à consommer en dehors des pics afin de réduire leur facture [47]. Enfin la gestion du réseau est améliorée puisque les points faibles et pannes sont plus facilement identifiés.

1.1.5 Discussion

Dans cette partie non relative à l'informatique, nous avons vu que la transition énergétique, nécessaire pour limiter le changement climatique, passait en grande partie par les individus. Une évolution des modes de consommation de l'énergie est nécessaire, en particulier au niveau des ménages qui représentent la plus grande part de la consommation. Des mesures sont prises au niveau des États afin d'aider les citoyens dans cette transition, mais ceux-ci doivent être accompagnés au quotidien afin d'augmenter leur motivation. La consommation électrique des logements étant au cœur de cette thèse, nous avons présenté le fonctionnement des réseaux électriques. Nous avons également entraperçu les problèmes posés par l'augmentation de la consommation électrique ainsi que l'évolution des réseaux électriques en réseaux intelligents. Cette évolution va entre autres permettre l'expansion des dispositifs de mesure de la consommation électrique, que ce soit via le gestionnaire du réseau électrique ou par les particuliers eux-mêmes, comme nous le verrons dans la prochaine section.

1.2 La domotique portée par l'informatique ubiquitaire

Cette section présente le contexte technologique de la thèse, celui de la domotique et de l'instrumentation de l'habitat pour la mesure de la consommation d'énergie. Nous commençons par définir l'informatique ubiquitaire (1.2.1), qui représente une révolution technologique mais aussi une révolution des usages de l'informatique. Nous expliquons ensuite comment cette évolution aboutit à la domotique lorsqu'elle s'applique dans les logements (1.2.2). Nous continuons en détaillant les technologies domotiques spécifiques à la mesure de la consommation d'électricité (1.2.3), qui est la technologie sous-jacente aux contributions de cette thèse. Enfin nous abordons brièvement la mesure des consommations des autres sources d'énergie domestique (1.2.4).

1.2.1 La révolution ubiquitaire

Les systèmes pervasifs, l'intelligence ambiante et l'informatique ubiquitaire sont trois termes désignant la troisième ère de l'informatique [22] qui tranche avec l'utilisation d'ordinateurs centralisés. Selon la définition de Coutaz et Crowley [35], *l'intelligence ambiante vise à offrir un espace quotidien "intelligent" d'accès à l'information ou à des services numériques permettant une utilisation adaptée, naturelle et conviviale.* Selon Calvary *et al.* [22], son but est de *fournir des espaces de services et des dispositifs fondés sur les nouvelles technologies et capables de répondre de manière adaptée en toute circonstance à la fois à des besoins individuels et à des défis sociétaux dans tous les secteurs d'activité.* Avec l'apparition des smartphones et tablettes nous avons assisté à une évolution technologique permettant l'utilisation d'applications et de services Internet de manière nomade. Au delà de ces appareils qui peuvent être considérés comme des ordinateurs mobiles, il faut également remarquer l'apparition de dispositifs qui analysent leur environnement, réagissent selon le contexte et communiquent entre eux. Par exemple les capteurs intelligents peuvent recueillir des données, les traiter et les transmettre via un réseau sans fil. Cette évolution technologique a entraîné une révolution dans l'utilisation de l'informatique, puisque désormais les utilisateurs peuvent accéder à l'information partout et tout le temps. L'utilisation de systèmes informatiques et d'internet s'est démocratisé : aux États-Unis en 2015, 78% des logements possédaient au moins un ordinateur et 77% étaient connectés à Internet [112].

Dans la définition de l'informatique ubiquitaire de Weiser [142], l'informatique n'est plus centralisée mais répartie dans une multitude d'objets entourant les utilisateurs. Par exemple, ceux-ci ont en permanence accès à des *pads* ou à des écrans muraux adaptés, permettant aux utilisateurs d'accéder à leurs données ou à leurs applications en permanence. Plus qu'une rupture technologique, c'est une rupture psychologique : les gens s'habituent aux ordinateurs et à un environnement en permanence connecté. Plutôt

que d'être utilisée uniquement par des spécialistes via un terminal, l'informatique est vue comme un outil utilisable par tout le monde, partout et à n'importe quel moment. Toujours selon Weiser, les systèmes pervasifs tirent leur pouvoir de l'interaction des appareils entre eux. Au lieu d'une intelligence artificielle centralisée, l'intelligence des ordinateurs émane de l'échange de données entre les appareils qui agissent alors en contexte. Le terme intelligence ambiante prend tout son sens puisque les appareils communiquent entre eux et avec l'utilisateur selon le contexte.

Aujourd'hui cette vision de Weiser est presque devenue une réalité. Les smartphones et tablettes peuvent être vus comme les *pads* de sa description. Les capteurs et systèmes embarqués présents dans nombre d'emplacements du quotidien rendent possible l'intelligence ambiante, en transférant des données contextuelles et en agissant sur l'environnement des utilisateurs. Cette évolution a été permise par le développement de trois domaines [18] :

- Des ordinateurs peu chers, peu consommateurs d'énergie et miniaturisés. En particulier le développement de l'électronique a permis la miniaturisation des systèmes autonomes [18].
- Des logiciels adaptés, surtout grâce aux progrès de l'interaction Homme-machine avec le développement d'interfaces multimodales [35].
- Des réseaux permettant une communication permanente entre les objets connectés : les réseaux haut débit et les réseaux sans fils, parmi eux le Wi-fi et les protocoles radio développés spécifiquement pour les objets connectés [1].

Cette nouvelle ère de l'informatique, lorsqu'elle est mise en situation dans les logements, permet le développement et l'expansion de la domotique que nous présentons par la suite. Il est important de différencier objets connectés et domotique. Les objets connectés ou *internet des objets* représentent les objets (physiques ou virtuels) reliés à un réseau et donc pouvant transmettre des données [1]. La domotique est l'utilisation de ces objets connectés dans un contexte domestique.

1.2.2 L'essor de la domotique

Cette nouvelle ère ubiquitaire de l'informatique aboutit directement à un nouveau champ d'applications lorsqu'elle est associée à l'habitat, celui de la domotique, qui désigne l'ensemble des techniques électroniques et informatiques permettant de contrôler le logement [18]. Ses principaux domaines d'applications sont la sécurité, la gestion de l'énergie, le confort et le multimédia. La domotique permet aux habitants de contrôler leur maison de n'importe quel endroit, y compris de l'extérieur. Par exemple, les thermostats intelligents permettent de chauffer les pièces de façon indépendante et selon la

(a) *Source :* Nest © **(b)** *Source :* Somfy © **(c)** *Source :* Simes ©

Figure 1.11 – *Exemples d'applications de la domotique.* **(a)** *Thermostat intelligent.* **(b)** *Contrôle d'un système de sécurité via une application smartphone.* **(c)** *Éclairage automatique d'escalier.*

présence des habitants (Figure 1.11a). Les systèmes d'alarme peuvent être contrôlés via une application sur smartphone (Figure 1.11b). Un autre attrait est l'automatisation du logement, qui permet en particulier le maintien à domicile des personnes dépendantes. Il est par exemple possible d'éclairer automatiquement un escalier grâce à des lumières associées à un capteur de présence (Figure 1.11c).

La domotique est un domaine extrêmement hétérogène du point de vue technologique, étant donné la diversité des infrastructures, des réseaux, des systèmes de contrôle ou encore des appareils. La *box domotique* est l'appareil qui permet de connecter les périphériques et de centraliser les informations et les commandes. Le contrôle des équipements peut se faire via cette *box*, via des panneaux de contrôle ou des interrupteurs répartis dans le logement et / ou via le smartphone de l'utilisateur. Plus récemment il est à noter un développement du contrôle vocal avec l'apparition d'appareils dédiés comme *Amazon Echo* [10] ou *Google Home* [63]. Nous pouvons classifier les systèmes domotiques en trois catégories selon leur flexibilité. La première est celle des systèmes complets "clés en main", par exemple *Tahoma* [121]. La configuration et l'utilisation sont alors simplifiés car les appareils sont optimisés pour fonctionner ensemble. Toutefois la compatibilité des appareils étant dans ce cas dépendante du fabricant, l'ensemble des appareils compatibles peut être limité à ceux du fabricant et à ceux d'éventuels constructeurs partenaires. La deuxième catégorie de systèmes domotiques contient des systèmes plus flexibles comme *Lifedomus* [87], permettant d'associer des appareils sans autre contrainte que celle d'être raccordés au même réseau. La configuration est moins aisée mais la flexibilité offerte permet une personnalisation totale de son installation. Enfin il est possible de concevoir soi-même sa box domotique en utilisant un ordinateur sur lequel est installé un système domotique libre comme *Jeedom* [77]. Cette solution est la moins onéreuse et la plus flexible mais nécessite des connaissances avancées en informatique.

(a) *Source :* `www.linternaute.com` ©

(b) *Source :* Samsung ©

Figure 1.12 – *Dispositifs de mesure de la consommation électrique, respectivement actuel et envisagé à l'avenir.* **(a)** *Compteur électrique* Linky. **(b)** *Réfrigérateur connecté.*

La domotique n'est pas encore très répandue dans les foyers mais elle possède un grand potentiel de développement. Ainsi selon un sondage réalisé aux États-Unis, 26% des répondants possèdent un équipement domotique et 51% envisagent d'en installer un à plus ou moins long terme [107]. Les économies d'énergie sont citées comme étant le principal intérêt à 86%, devant la sécurité à 81%. Le principal frein est le prix, cité comme inconvénient majeur par 42% des répondants, loin devant la sécurité des données avec 17%. Notons que la complexité est citée comme inconvénient par seulement 6% des répondants, ce qui montre le potentiel d'adoption de la domotique. En France, l'engouement est plus faible puisque seulement 16% des interrogés envisagent d'investir dans la domotique [36]. Dans les deux sondages, l'intérêt varie peu selon l'âge, sauf pour les plus de 80 ans où il est plus faible. Les anciennes générations sont attirées par la sécurité et la santé, alors que chez les nouvelles générations l'intérêt principal réside dans la gestion de la maison et surtout de l'énergie. Ainsi les économies d'énergie représentent le premier intérêt chez les moins de 40 ans en France (cité à 66%). En liant ces résultats avec les motivations des particuliers pour les économies d'énergie (voir 1.1.2), on remarque que la domotique peut permettre d'aider les logements dans la transition énergétique. Nous allons voir par la suite comment la domotique peut soutenir cette transition via la mesure de la consommation d'énergie.

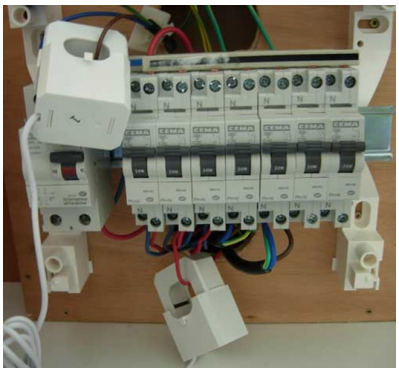
1.2.3 Mesurer la consommation électrique

Cette thèse se base essentiellement sur la visualisation de la consommation électrique des particuliers. nous présentons ici les différentes technologies permettant de mesurer la consommation électrique. Nous distinguons trois grandes familles d'appareils de mesure : les compteurs intelligents installés par les gestionnaires de réseaux électriques, les compteurs agrégés installés par les particuliers et les appareils de mesure individuels également installés par les particuliers.

Les compteurs intelligents sont un des principaux composants des *smart grids* (voir 1.1.4). Un compteur intelligent est un compteur qui mesure la consommation d'énergie et la transmet au fournisseur d'énergie via un réseau numérique [40]. Il est installé et géré par le gestionnaire du réseau électrique. Un exemple de compteur intelligent est *Linky* [48] (Figure 1.12a), en cours de déploiement en France depuis 2015. Pour le fournisseur électrique, les compteurs intelligents ont l'avantage d'éviter les déplacements pour les relevés de consommation et pour les extinctions ou allumages de compteurs en cas de déménagement. Ils profitent également aux consommateurs : ils permettent en effet d'appliquer une tarification flexible, et ainsi de réduire la facture énergétique en consommant l'électricité pendant les périodes les moins onéreuses [47, 120]. Mais surtout les consommateurs peuvent avoir accès aux données de consommation mesurées et ainsi espérer réduire leur consommation.

Le déploiement des compteurs intelligents est en progression, et avec lui le nombre de personnes pouvant potentiellement avoir accès à leur consommation d'électricité en augmentation. L'Union européenne demande aux États membres d'équiper 80% de la population en compteurs intelligents d'ici 2020 [31]. La Suède et l'Italie sont en avance puisqu'ils ont équipé l'ensemble de leurs réseaux de compteurs intelligents [32]. La Suède déclare une économie d'énergie entre 1 et 3% de la consommation totale d'électricité et un bénéfice de 1,6 milliards d'euros, dont 20% des économies pour les consommateurs. L'Italie déclare un bénéfice de 6,4 milliards d'euros, l'économie d'énergie n'est pas encore connue. En France en 2017, 5 millions de compteurs *Linky* étaient en place et 35 millions devraient être installés en 2021 [49]. Ces compteurs devraient permettre d'économiser 25% des pertes du réseau électrique français. Aux États-Unis, sur les 150 millions de consommateurs d'électricité, 71 millions de compteurs intelligents ont été installés, ce qui représente 47% des compteurs [137]. Les compteurs intelligents sont cependant source de réticences, en particulier en raison des problèmes de sécurité des données. Les données de consommation sont en effet sensibles car elles révèlent beaucoup d'informations sur la vie privée des habitants. Elles peuvent également représenter un risque pour la sécurité car elles permettent de connaître les périodes d'occupation d'un logement [81].

Une autre solution pour les habitants d'un logement est d'installer eux-mêmes un compteur agrégé. Cette solution permet aux logements non équipés d'un compteur intelligent d'obtenir leur consommation. Elle peut également permettre aux logements



(a) *Source :* Aeotec ©

(b) *Source :* Floureon ©

(c) *Source :* Fibaro ©

Figure 1.13 – *Exemples de dispositifs de mesure de la consommation électrique installables par les particuliers.* **(a)** *Pinces ampèremétriques.* **(b)** *Prise de mesure avec affichage.* **(c)** *Prises connectées.*

équipés d'obtenir des mesures plus précises que celles fournies par le gestionnaire du réseau. Enfin, elle permet aux logements auto-suffisants, c'est à dire produisant leur propre électricité, de gérer la consommation en fonction de la production d'électricité ou de l'énergie en réserve. Il est possible de mesurer la consommation d'un groupe d'appareils voire de tout le logement en branchant des pinces ampèremétriques sur le compteur électrique (Figure 1.13a). Les mesures ainsi obtenues représentent les données de consommation agrégées du groupe d'appareil mesurés. Cet appareil peut être connecté à un réseau sans fil et ainsi transmettre la consommation à un système domotique.

Il est également possible d'utiliser des prises de mesure sur lesquelles sont branchés les appareils ou les groupes d'appareils à mesurer. Cette solution est plus facile à installer que des pinces ampèremétriques, mais certains appareils ne sont pas mesurables s'ils sont branchés sur des prises inaccessibles. Par exemple les chaudières et cuisinières électriques ne sont parfois pas branchées sur une prise mais reliées directement au panneau électrique, ne permettant pas l'installation d'une prise de mesure. Ces prises permettent d'obtenir des mesures de consommation désagrégées, c'est à dire une mesure de consommation par appareil. Les prises de mesure peuvent afficher directement les données de consommation (Figure 1.13b) ou transmettre ces données si elles sont connectées à un système domotique (Figure 1.13c). Dans ce dernier cas, il peut également être possible d'éteindre et d'allumer la prise à distance, ou de programmer des horaires d'allumage et d'extinction automatiques. Enfin, on peut imaginer qu'à l'avenir les appareils transmettront eux-mêmes leur consommation d'énergie ainsi que des informations d'utilisation. Par exemple il existe déjà des réfrigérateurs connectés permettant de vérifier leur contenu et leur température à distance (Figure 1.12b).

1.2.4 Mesurer les autres ressources domestiques

La mesure des ressources domestiques différentes de l'électricité, en particulier l'eau et le gaz, est moins répandue. Les réseaux d'acheminement sont plus simples que pour l'électricité en raison de la proximité des ressources et de la possibilité de stockage, ils bénéficient donc moins des avantages des réseaux intelligents. Toutefois les gestionnaires des réseaux de gaz et d'eau installent des compteurs intelligents qui permettent les relevés de consommation à distance et surtout la détection des fuites en temps réel. Les consommateurs peuvent alors accéder à leurs données de consommation. Par exemple en France, le compteur intelligent *Gazpar* [64] est en cours de déploiement par le gestionnaire du réseau de gaz. La proportion de compteurs d'eau communicants est également en augmentation. Pour les particuliers désirant installer un dispositif de mesure de leur consommation d'eau ou de gaz, la principale solution est d'installer un compteur sur l'arrivée d'eau ou de gaz. Cette installation nécessite de faire appel à un technicien (plombier ou chauffagiste) et est donc moins abordable que la mesure de l'électricité. Cette solution peut également complexifier la distinction des différents usages, les données étant agrégées au logement entier. Par exemple pour l'eau, il peut être compliqué de différencier la consommation provenant des douches de celle provenant du lavage du linge. Toutefois il faut noter l'apparition récente d'appareils permettant de mesurer la quantité d'eau consommée spécifiquement pour la douche, tels que *Hydrao* [73] ou *Amphiro* [12].

1.2.5 Discussion

Nous avons vu que la domotique est apparue dans les logements grâce à la révolution ubiquitaire. Si son utilisation n'est pas encore très répandue, les sondages [36, 107] ainsi que les innovations des objets connectés indiquent qu'elle devrait se démocratiser à l'avenir. La domotique, combinée avec les compteurs intelligents, devrait ainsi permettre à la majorité de la population d'avoir accès à leurs données de consommation électrique. Les individus auraient donc les moyens d'économiser de l'énergie en connaissant mieux leurs habitudes de consommation. Toutefois ce lien n'est pas trivial : concevoir une visualisation de consommation d'énergie qui permette aux utilisateurs de diminuer leur consommation est un problème réel qui est abordé dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Visualiser et interagir avec l'information

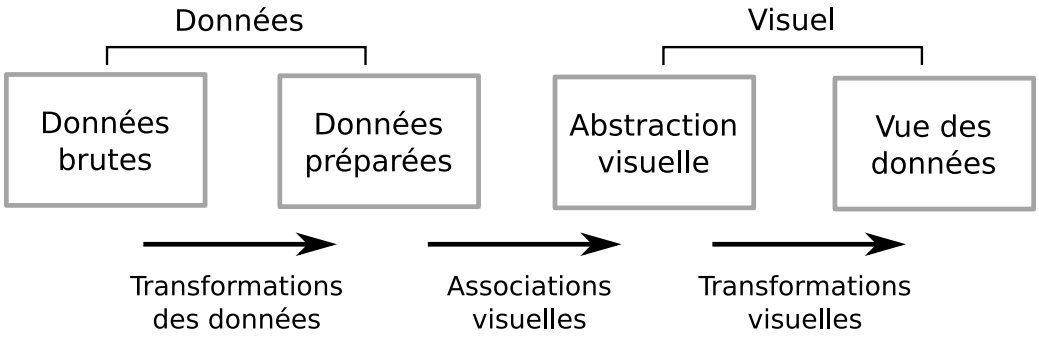


Figure 2.1 – *Pipeline de la visualisation d'information [27], comprenant les étapes allant des données brutes jusqu'à la représentation visuelle. Les données sont d'abord traitées avant d'être visualisées, puis sont associées à des variables visuelles avant d'être affichées sous forme de visualisation.*

2.1 Visualisation de données temporelles

La visualisation de données temporelles est inhérente à la visualisation personnelle et à la visualisation de consommation d'énergie. Comme nous le présentons dans les sections suivantes, les données personnelles sont en effet majoritairement temporelles par nature car elles décrivent l'évolution du comportement d'un individu au cours du temps. Toutefois nous nous contentons d'une brève présentation de la visualisation de données temporelles dans cette section. Les contributions de cette thèse ne sont en effet pas axées sur la visualisation d'information en soi, mais sur son application à la consommation d'énergie. Nous définissions tout d'abord la visualisation de données temporelles (2.1.1). Nous fournissons ensuite des exemples de visualisations temporelles (2.1.2), avant d'évoquer le cas de la visualisation de séries temporelles multiples (2.1.3).

2.1.1 Définitions

Card *et al.* [23] définissent la visualisation d'information comme l'utilisation de représentations visuelles interactives basées sur l'informatique, afin d'amplifier la cognition. A la différence de la visualisation scientifique, les données concernées par la visualisation d'information n'ont pas de représentation spatiale inhérente. Le pipeline de la visualisation d'information de Chi et Riedl [27] décrit les différentes étapes permettant la visualisation à partir des données brutes jusqu'aux représentations visuelles (Figure 2.1). Les données brutes sont tout d'abord transformées avant d'être visualisées. Puis une association visuelle est réalisée, dans laquelle les données sont associées à des primitives géométriques, par exemple points ou lignes, et des variables visuelles. Ces variables sont par exemple la position ou la couleur des primitives géométriques choisies. Enfin des transformations visuelles sont effectuées afin d'obtenir une image qui représente les données sélectionnées.

Dans le domaine de la visualisation d'information, nous nous intéressons particulièrement aux données temporelles. Les données personnelles telles que la consommation d'énergie qui nous intéressent dans cette thèse sont en effet de nature temporelle. Aigner *et al.* [8] caractérisent les données temporelles selon une vision continue ou discrète. Dans la vision continue, le temps est un espace observable et les données lui sont liées. En d'autres termes, les données considérées sont des séries temporelles constituées de couples $(temps, valeur)$ qui décrivent l'évolution d'une entité au cours du temps. Dans la vision discrète, les données sont des entités qui possèdent certains attributs, par exemple des événements de calendrier dont les attributs sont les dates de début et de fin. Dans cette même vision Aigner *et al.* distinguent deux types de données : les événements et les états, dont les définitions sont dépendantes. Les événements sont en effet définis comme des changements d'état, et les états comme les étapes continues entre les événements.

Afin de caractériser une visualisation, Munzner [94] propose trois questions principales :

- *Quoi* : Quelles données sont visualisées ?
- *Pourquoi* : Quelles sont les tâches à effectuer pour l'utilisateur ? Par exemple, recherche du début d'un événement particulier.
- *Comment* : Quelles associations visuelles sont utilisées ?

Ces questions montrent l'importance de la prise en compte des utilisateurs, des tâches et des données pour la conception d'une visualisation et de ses interactions. Il n'existe pas de visualisation qui soit efficace pour tous les usages. L'efficacité d'une visualisation dépend du contexte dans lequel elle est appliquée, qui est défini par les utilisateurs, les tâches et les données.

2.1.2 Exemples de visualisations

Dans cette partie nous présentons plusieurs exemples de visualisations qui montrent la diversité des représentations visuelles selon le type de données et les tâches à accomplir. Ces exemples ainsi que beaucoup d'autres peuvent être retrouvés dans l'état de l'art des visualisations de données temporelles de Tominski *et al.* [130].

Tufte [134] a présenté les *Sparklines* (Figure 2.2), un exemple de visualisation de données continues. L'objectif de cette visualisation n'est pas d'accomplir une tâche particulière (telle que la recherche d'une valeur) mais plutôt de fournir un aperçu rapide de l'évolution de plusieurs séries temporelles. Sa particularité est de nécessiter très peu de place, ainsi un grand nombre de séries temporelles peuvent être visualisées dans un

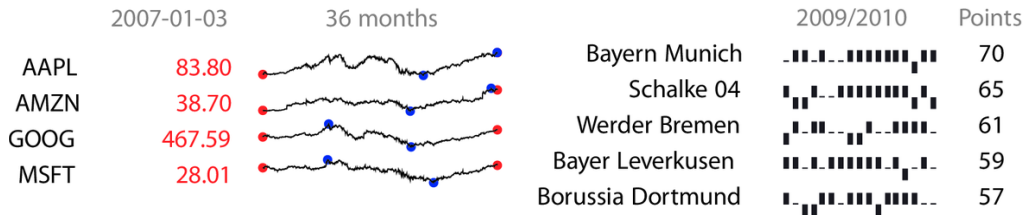


Figure 2.2 – Sparklines *de Tufte [134], un exemple de visualisation de données temporelles continues. Les* Sparklines *permettent de donner un aperçu de l'évolution d'un ensemble de variables en utilisant un espace réduit. Sur cet exemple nous pouvons voir l'évolution du prix d'actions en bourse (à gauche) ainsi que les derniers résultats d'équipes de football (à droite).*

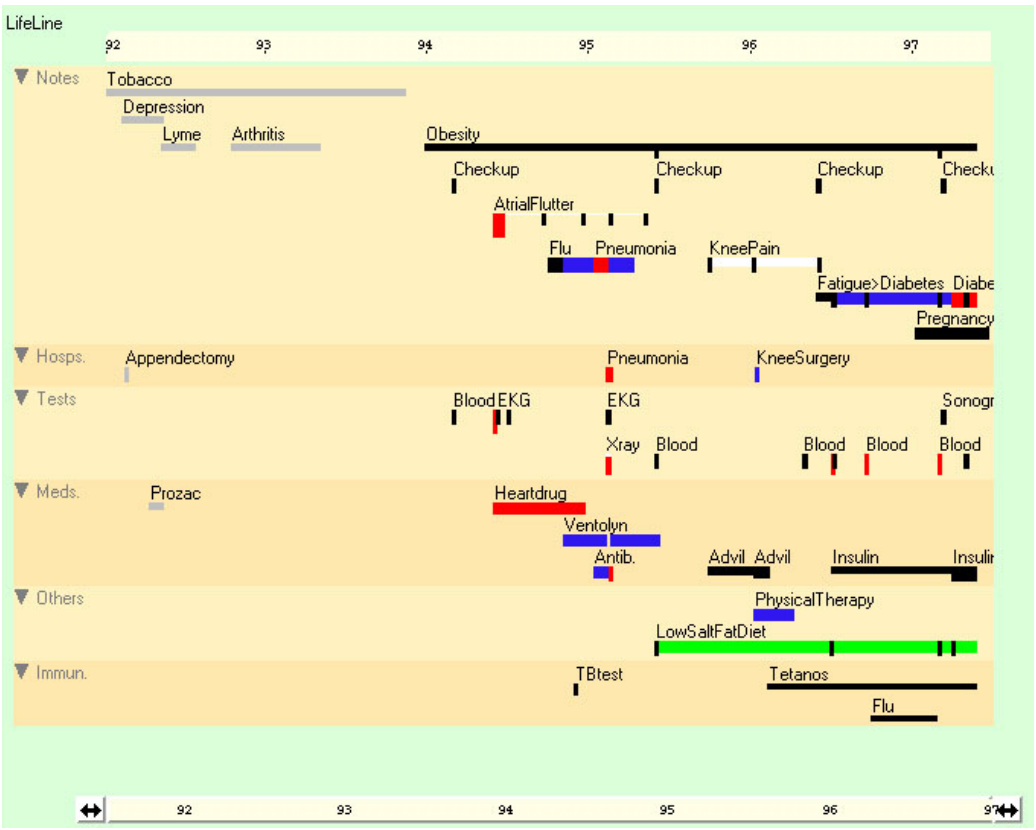
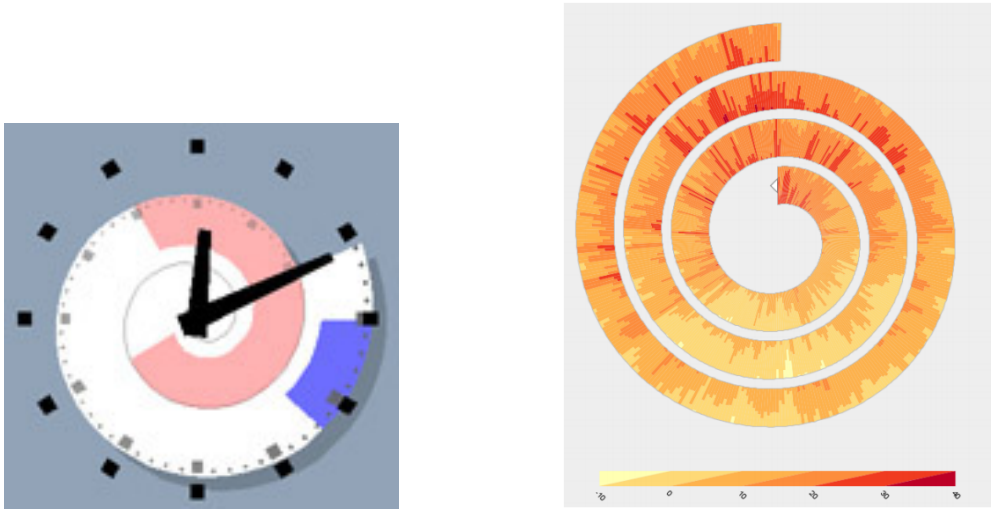


Figure 2.3 – LifeLines *de Plaisant et al. [103], un exemple de visualisation de données temporelles discrètes. Les* LifeLines *permettent de visualiser les événements associés à un patient dans le contexte de la santé. Cette visualisation est une extension des* Timelines *[133] qui permettent la visualisation d'événements.*



(a) **(b)**

Figure 2.4 – *Visualisation de données temporelles à base de spirales :* **(a)** SpiraClock *[43], une visualisation des prochains événements prévus de l'utilisateur. Les zones bleues et rouges représentent les prochains événements prévus.* **(b)** *Visualisation interactive de Tominski et Schumann [131] représentant la température d'une ville au cours du temps.*

espace réduit. Cette visualisation peut également est incorporée dans du texte et ainsi présenter l'évolution d'une série temporelle plus efficacement qu'avec une description textuelle.

Plaisant *et al.* [103] ont présenté les *LifeLines* (Figure 2.3), un exemple de visualisation de données temporelles discrètes. Les données visualisées ici sont en effet des événements ayant lieu à un moment précis, et qui sont associés à une certaine durée. Les *LifeLines* sont une adaptation des *TimeLines* [133], qui permettent la visualisation d'intervalles de temps, au domaine médical. Les *LifeLines* permettent de visualiser des événements d'un patient au cours du temps, tels que les examens réalisés ou les traitements reçus.

Au lieu d'utiliser une représentation linéaire du temps, certains travaux proposent l'utilisation d'une représentation en spirale. C'est par exemple le cas de *SpiraClock* de Dragicevic et Huot [43] (Figure 2.4a), qui permet de visualiser les événements à venir sur une horloge sans avoir à interrompre son activité. Les événements futurs ou passés sont associés à des zones colorées sur l'horloge. La visualisation se lit de l'extérieur vers l'intérieur, les événements se trouvant à l'extérieur précédant les autres. L'aiguille des minutes représente le moment présent. De manière similaire Tominski et Schumann [131] ont développé une visualisation spirale interactive (Figure 2.4b). Celle-ci utilise une échelle de couleurs à deux tons [118]. Cette visualisation propose des interactions dédiées à la visualisation spirale : il est possible d'explorer les données en

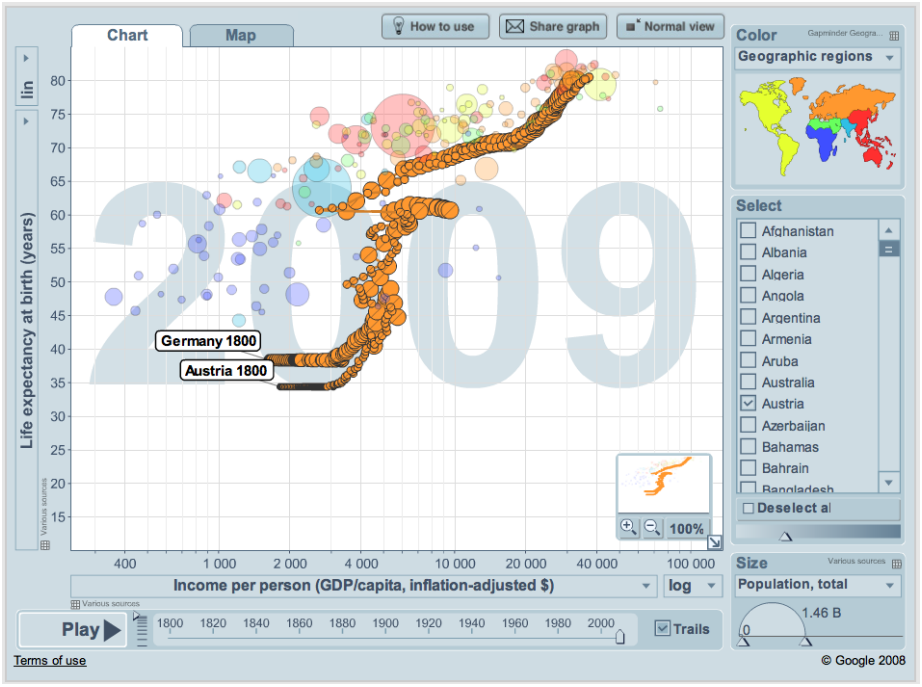


Figure 2.5 – Trendalyzer *de* Gapminder *[60]. Cet outil de visualisation est basé sur des nuages de points animés. Cette visualisation montre l'espérance de vie de pays en fonction du PIB par personne, l'animation permet de faire défiler les années.*

navigant dans le temps et de modifier l'affichage de la spirale, par exemple en modifiant son nombre de cycles. L'utilisation de spirales permet une meilleure analyse des données cycliques, car les événements récurrents sont alors mieux identifiés. Par exemple sur la Figure 2.4b représentant la température d'une ville, il est facile d'identifier les périodes d'été où d'avantage de rouge est présent.

Gapminder [60] est à l'origine de *Trendalyzer* (Figure 2.5), un outil de visualisation basé sur des nuages de points animés. Sa particularité est l'utilisation de l'animation pour représenter le temps. Robertson *et al.* [111] ont étudié l'efficacité de l'interaction pour la présentation et l'analyse de données, en se basant sur trois visualisations élaborées avec *Trendalyzer*. Leurs résultats montrent que l'animation est la méthode la plus rapide pour la présentation et qu'elle est appréciée par les participants. Toutefois ces résultats montrent également que c'est la méthode la moins efficace pour l'analyse de données, et qu'elle mène à beaucoup d'erreurs de la part des participants lors de la présentation.

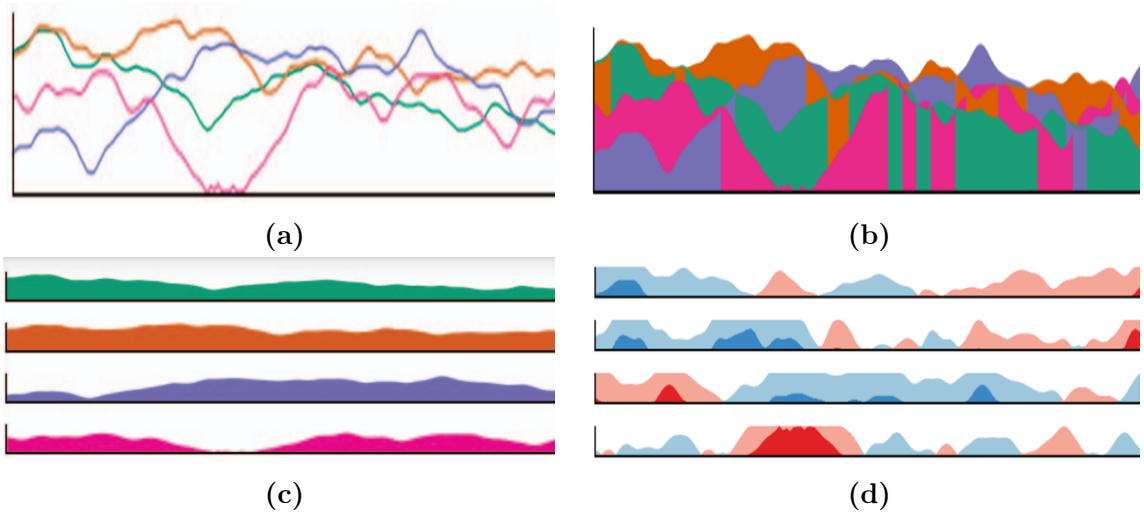


Figure 2.6 – *Techniques étudiées par Javed et al. [76] pour la visualisation de séries temporelles multiples.* **(a)** *Graphiques en courbe (*Simple Line Graphs*).* **(b)** Braided Graphs. **(c)** Small Multiples. **(d)** Horizon Graphs.

2.1.3 Visualisation de séries temporelles multiples

Javed *et al.* [76] ont comparé l'efficacité de différentes techniques permettant de visualiser et de comparer plusieurs séries temporelles. Cette étude est importante dans le contexte de cette thèse car nous utilisons une visualisation de consommation d'électricité où les consommations de plusieurs appareils sont visualisées (voir 4.2.2). Les auteurs comparent quatre types de visualisations, qui sont visibles sur la Figure 2.6. Les *Simple Line Graphs* (Figure 2.6a) et *Braided Graphs* (Figure 2.6b) affichent les séries temporelles sur le même graphique, tandis que les *Small Multiples* (Figure 2.6c) et *Horizon Graphs* (Figure 2.6d) utilisent plusieurs graphiques de tailles réduites les uns en dessous des autres. Les visualisations sont étudiées sur trois tâches de discrimination entre les séries temporelles : recherche d'un maximum local, détermination de la pente maximum et recherche d'un maximum dispersé (maximum en deux points différents de deux séries temporelles). Les résultats montrent que les techniques dans lesquelles les séries temporelles sont présentées sur le même graphique (*Simple Line Graphs* et *Braided Graphs*) sont plus performantes pour des tâches de recherche locales (ici maximum). Toutefois les techniques qui séparent les séries temporelles (*Small Multiples* et *Horizon Graphs*) obtiennent de meilleurs résultats que les autres pour les tâches de comparaison dispersée, c'est à dire la comparaison de points à des endroits différents sur les séries temporelles. Il est à noter que les participants sont tous habitués à la lecture de graphiques, et sont tous étudiants dans l'enseignement supérieur. Les résultats sont donc difficilement généralisables à l'ensemble des utilisateurs.

2.2 L'approche *what if*

Dans cette section nous présentons l'approche *what if* ainsi que des travaux précédents portant sur ce domaine. Nos contributions dans cette thèse sont principalement basées sur l'approche *what if*. En premier lieu nous définissions ce type d'approche, synthétisée depuis les travaux de ce domaine (2.2.1). Puis nous présentons les approches *what if* qui ne sont pas basées sur une visualisation, mais sur des méthodes textuelles telles que des langages de programmation (2.2.2). Enfin nous présentons les travaux dans lesquels la visualisation est utilisée pour la définition de scénarios *what if* et l'évaluation du résultat de ces scénarios (2.2.3).

2.2.1 Définition

Golfarelli *et al.* [61] définissent l'approche *what if* comme l'analyse du comportement d'un système complexe sous certaines hypothèses, qui sont appelées *scénarios*. L'analyse *what if* permet d'étudier l'influence d'un ensemble de variables indépendantes sur un ensemble de variables dépendantes. Ces dernières constituent les données sur lesquelles le résultat d'un scénario appliqué est analysé. Cette analyse utilise comme référence un modèle donné de simulation, qui permet d'appliquer des scénarios sur ces variables et d'en évaluer le résultat. Nous proposons ici notre propre définition basée sur les travaux de l'état de l'art présentés par la suite.

Le but de l'approche *what if* est d'analyser un système dont l'état est mesurable. Cette approche est temporelle : l'état du système évolue en effet au cours du temps selon des facteurs internes ou externes. L'approche *what if* possède un intérêt majeur lorsque l'évolution de l'état du système est complexe. Les différents facteurs menant à un état du système peuvent ne pas être mesurables ou influencer le système de manière complexe, si bien que leur influence n'est pas aisément compréhensible. Le but de l'approche *what if* est alors l'utilisation d'une méthode de simulation permettant d'appliquer des scénarios. Ces scénarios permettent de paramétrer les facteurs qui influencent le système, et également de mesurer l'état simulé du système lorsque ces facteurs s'appliquent. Cette méthode de simulation est très souvent une simplification de la réalité. Par exemple Golfarelli *et al.* [61] discutent de l'application de l'analyse *what if* au domaine des activités d'une entreprise. Le système considéré est alors l'entreprise elle-même, et son état mesurable peut par exemple être les bénéfices de l'entreprise. Les facteurs influençant ces bénéfices sont nombreux et complexes. Dans ce cas, le modèle de simulation est alors simplifié et les facteurs pris en compte sont les décisions prises par les membres de l'entreprise, par exemple les stratégies commerciales.

L'objectif général de l'utilisation d'une méthode *what if* est l'analyse du système et du processus menant à son état observable. Un objectif plus spécifique peut être l'analyse de l'influence des différents facteurs sur cet état. Un autre objectif est la

recherche d'un certain ensemble de facteurs et de leurs paramètres qui conduisent à un résultat souhaité. Pour cela, l'utilisateur peut modifier les paramètres des facteurs qui influencent le système et ainsi explorer l'ensemble des paramètres possibles. L'analyse *what if* est donc un problème inverse par rapport à une simulation classique. Le but est en effet l'analyse des valeurs des paramètres qui influencent le résultat, et non celle du résultat. En particulier Golfarelli *et al.* [61] insistent sur la différence entre l'analyse *what if* et la prévision (*forecasting*). Si la prévision permet d'extrapoler des données au futur, l'analyse *what if* nécessite la simulation de phénomènes complexes qui ne peuvent pas être obtenus par une simple projection des données passées.

L'approche *what if* a deux avantages principaux par rapport à une optimisation réalisée par calcul. Premièrement, l'utilisateur apporte ses connaissances et peut donc ajuster les paramètres de manière éclairée. Deuxièmement, l'utilisateur apprend le comportement du système en modifiant les paramètres. En effet selon la théorie du constructivisme, le fait d'agir sur un environnement inconnu en évaluant les conséquences des actions entraîne un apprentissage [99, 124]. Cette interaction permet également à l'utilisateur de se forger un modèle mental [95]. Cet apprentissage du comportement du système permet l'obtention d'une solution qui convient à l'utilisateur, et celle-ci est progressivement évaluée. L'apprentissage peut également être l'objectif en soi d'une approche *what if*, par exemple dans le cas de méthodes d'enseignement.

2.2.2 Méthodes *what if* textuelles

Nous présentons dans un premier temps des exemples de méthodes *what if* textuelles, qui ne sont pas basées sur la visualisation. Contrairement à nos contributions, ces approches sont principalement basées sur l'élaboration de la simulation permettant l'application de scénarios de type *what if*. Nous nous contentons donc de donner quelques exemples d'applications et ne couvrons pas toutes les approches.

Comme nous l'avons évoqué précédemment Golfarelli *et al.* [61] appliquent l'analyse *what if* aux activités d'une entreprise. Leur contribution est la définition d'une approche pour la conception d'applications *what if* dans le contexte de l'informatique décisionnelle. Dans ce contexte les données analysées sont multidimensionnelles et de nature temporelle. Selon les auteurs les applications *what if* doivent fournir des classes de scénarios applicables sur les données. Elles doivent également permettre la définition de scénarios sur mesure par les utilisateurs, par exemple en utilisant un langage dédié. Cette approche propose un modèle de *what if* générique pour l'informatique décisionnelle au détriment de la facilité d'utilisation. Les utilisateurs doivent en effet eux-mêmes définir leurs scénarios et donc avoir une bonne connaissance du domaine et en particulier des modèles utilisés. Toutefois cette approche se concentre sur la réalisation de la simulation du système tandis que nos contributions sont axées sur la visualisation et l'interaction, et non sur la simulation.

Dans le même contexte l'analyse *what if* du logiciel *Excel* [90] permet de modifier un terme d'une formule, ce qui induit une mise à jour du résultat automatiquement. Selon la documentation, cette fonctionnalité est utile pour analyser les ensembles de valeurs et également pour trouver un ensemble de valeurs possibles aboutissant à un résultat souhaité. *Excel* permet également d'extrapoler des valeurs futures à partir des valeurs actuelles. Si l'extrapolation en soi n'est pas considérée comme de l'analyse *what if*, elle est toutefois une fonctionnalité complémentaire car elle permet d'évaluer le résultat de scénarios sur l'évolution future de données [61].

Une approche *what if* peut également être appliquée aux réseaux informatiques et systèmes distribués. Ces entités sont en effet complexes et il est difficile d'évaluer les conséquences d'une modification sur le réseau. Thereska *et al.* [128] appliquent ainsi une méthode *what if* à la gestion de systèmes distribués. Leur approche permet d'évaluer les conséquences de modifications dans la configuration d'une ou plusieurs machines sur le ressenti utilisateur, exprimé par exemple en termes de latence. Similairement Tarik *et al.* [126] ont développé *Wise*, un système permettant l'analyse de réseaux de distribution de contenu numérique. Ces réseaux sont complexes et leurs gérants doivent évaluer comment un changement de configuration ou d'infrastructure impacte le temps de réponse des serveurs. Les auteurs proposent une méthode permettant d'identifier automatiquement les facteurs d'un réseau donné qui impactent son temps de réponse. Une fois ces facteurs connus, il est alors possible d'appliquer des scénarios de type *what if* afin d'évaluer les conséquences d'une modification du réseau. Ces deux approches reposent sur une définition des scénarios *what if* via un langage de programmation dédié. Ces méthodes sont donc vouées à être utilisées par des utilisateurs experts, possédant des connaissances en programmation.

Bird et Zimmermann [17] appliquent l'approche *what if* à l'analyse de branches de développement logiciel. Les branches de développement sont utilisées pour isoler une partie du code source d'un logiciel sur laquelle travaille une équipe. Toutefois les branches doivent *in fine* être fusionnées, ce qui nécessite du travail supplémentaire. La contribution des auteurs est l'application d'une méthode *what if* permettant de détecter les branches non rentables en termes de temps de développement, c'est à dire les branches dont le coût de fusion est supérieur aux bénéfices apportés. La contribution de ce travail est principalement la définition de métriques permettant d'évaluer les branches. Ces métriques sont basées sur une enquête menée au sein des équipes de développement de *Microsoft*. La méthode a été appliquée avec succès au développement de *Windows 7*.

Les méthodes que nous venons de présenter se concentrent principalement sur l'implémentation de la simulation et la définition de métriques permettant de mesurer l'état du système, et non sur l'utilisation de la méthode en soi. En particulier l'interaction nécessaire pour l'approche *what if*, consistant en la définition des scénarios, l'ajustement de leurs paramètres ainsi que l'évaluation des résultats par l'utilisateur, n'est pas étudiée par ces travaux. La visualisation peut être utilisée en complément de ces

méthodes, par exemple pour analyser le résultat de l'application de scénarios sur des données multidimensionnelles. Toutefois elle n'est pas intégrée à la méthode *what if* et son utilisation n'est pas décrite dans les articles que nous avons présentés ici.

2.2.3 Méthodes *what if* basées sur la visualisation

Nous présentons ici les approches *what if* basées sur des techniques de visualisation permettant à la fois d'élaborer les scénarios appliqués de manière graphique, mais également d'évaluer leurs résultats sur les données. Contrairement aux approches textuelles, ces approches étudient l'interaction et la visualisation dans le cadre du *what if*.

Bret Victor [139] a présenté les *documents réactifs* (*reactive documents*), une méthode d'analyse basée sur des documents interactifs. Les documents présentent un calcul concernant un sujet particulier, basé sur un ensemble de paramètres. Ces paramètres sont modifiables de manière graphique, par exemple via l'utilisation de curseurs. Ainsi il est possible pour l'utilisateur de modifier les paramètres du calcul, le résultat étant mis à jour automatiquement de manière interactive. Le résultat est exprimé sous la forme d'une visualisation simple, souvent basée sur des pictogrammes. Par exemple Bret Victor [138] a élaboré un document réactif dont le sujet est la consommation d'énergie des ménages américains (Figure 2.7). Dans ce document il est possible de modifier le pourcentage de logements qui éteignent la lumière dans les pièces inoccupées. Le résultat est visualisé sous la forme de centrales nucléaires ou à charbon dont la production est équivalente aux économies réalisées.

Deux travaux ont appliqué une approche *what if* à la simulation de systèmes complexes. C'est le cas de *World lines* de Waser *et al.* [140]. Ce système permet d'explorer plusieurs résultats possibles pour une simulation selon ses paramètres. En particulier il permet de lancer plusieurs simulations avec des paramètres différents et de comparer leurs résultats. Le système est basé sur un visualisation sous la forme d'un arbre de chemins, chaque chemin étant associé à une simulation reposant sur un certain ensemble de valeurs des paramètres. Lorsqu'une modification est appliquée sur ces paramètres, un nouveau chemin est créé, ce qui correspond au test d'un nouveau scénario *what if*. *World lines* a été appliqué avec succès à une application pratique : le choix d'emplacements pour des barrières protégeant des bâtiments en cas d'inondation. Dans ce cas l'inondation est simulée et les principaux paramètres modifiables sont les emplacements des barrières de protection.

Si *World lines* est générique et peut être appliqué à différents types de simulations, Afzal *et al.* [6] ont développé un système similaire ciblant la simulation des épidémies. Ce dernier permet aux utilisateurs d'élaborer des scénarios en fonction des paramètres de simulation. Toutefois il propose deux visualisations différentes. La première permet d'élaborer et de visualiser les scénarios *what if* sous forme de séries temporelles, et est similaire à la visualisation de *World lines*. La seconde visualisation spatio-temporelle

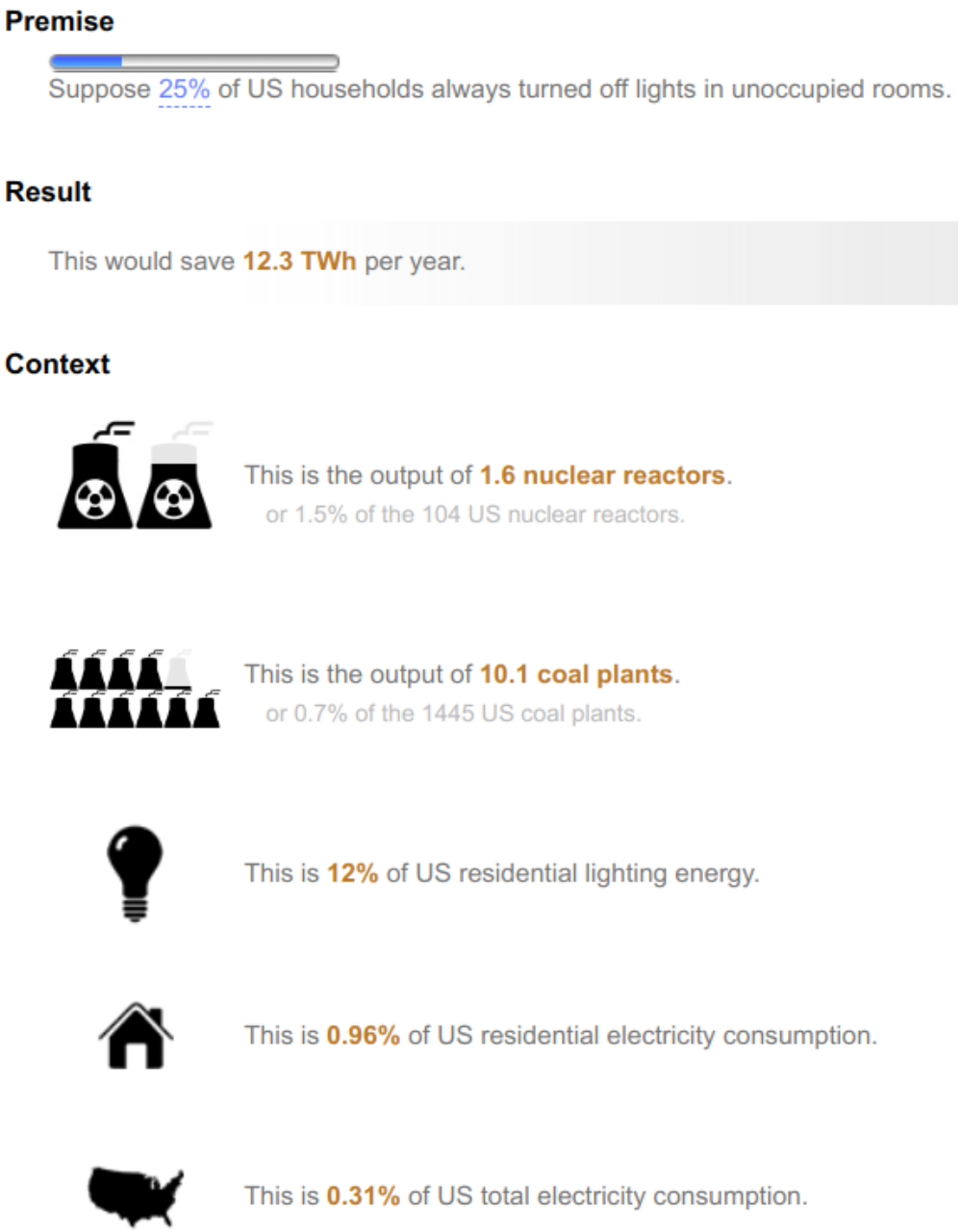


Figure 2.7 – Ten Brighter Ideas ? An Explorable Explanation *de Bret Victor [139], un exemple de document réactif. Celui-ci offre la possibilité à l'utilisateur de changer un paramètre du calcul, ici le nombre de foyers aux États-Unis qui éteignent la lumière dans les pièces inoccupées. Le résultat du calcul est ensuite mis à jour et affiché sous forme visuelle, sous la forme de réacteurs nucléaires représentant les économies d'énergie réalisées.*

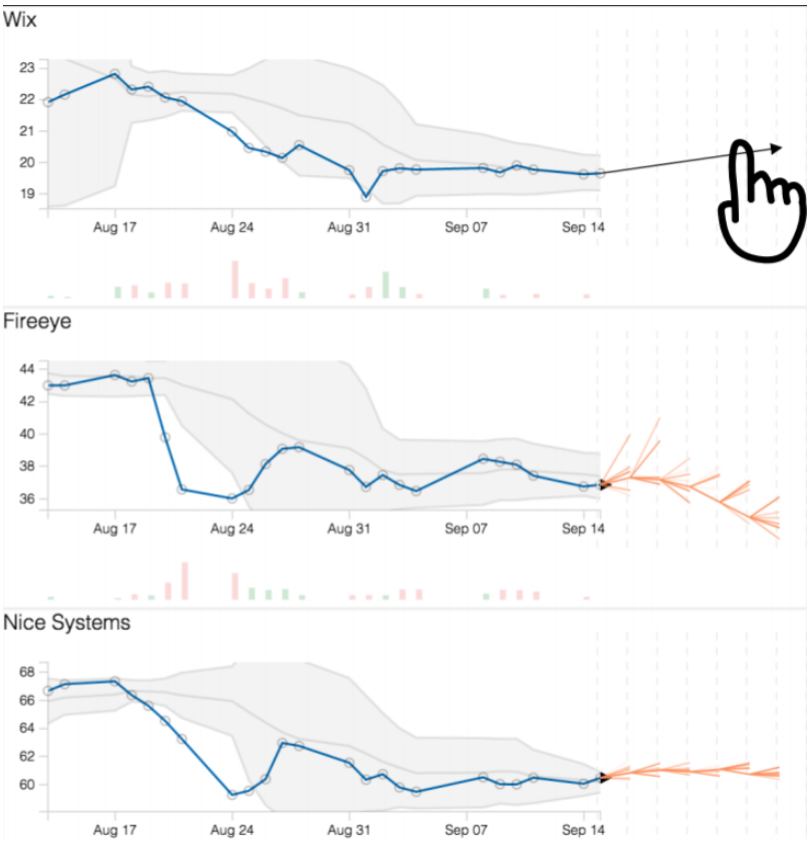


Figure 2.8 – TimeFork *de Badam et al. [13], qui permet d'interagir avec un système de prévision de variables temporelles. L'utilisateur peut appliquer des scénarios de type* what if *en modifiant une variable, l'évolution de variables liées est alors mise à jour.*

permet d'analyser précisément le résultat d'un scénario donné. Ces deux systèmes sont spécifiques aux simulations dont le résultat dépend principalement des paramètres initiaux. Par exemple dans le cas de l'application de *World lines* aux inondations, le nombre de bâtiments protégés dépend du choix initial dans le placement des barrières de protection. L'application à des domaines dans lesquels le résultat dépend de facteurs qui l'influencent à tout instant paraît donc difficile. Par exemple pour le domaine de la consommation d'électricité, la consommation d'un logement dépend des actions des utilisateurs sur les appareils à tout instant. De plus ces systèmes sont conçus pour des utilisateurs experts et leur adaptation pour des utilisateurs novices paraît difficile.

Badam *et al.* [13] ont présenté *TimeFork* (Figure 2.8), un système de prédiction interactif pour les séries temporelles. Ce système s'applique aux séries temporelles multivariées et est basé sur des graphiques en courbe. Les utilisateurs peuvent guider des modèles de calcul qui prédisent le futur de plusieurs variables, possiblement dépendantes. *TimeFork* est basé sur l'interaction avec le système de prédiction, puisque les utilisateurs peuvent apporter leurs connaissances et ainsi rectifier une prédiction qu'ils

estiment erronée. Le système permet également d'appliquer des scénarios *what if* en évaluant l'impact de la modification d'une variable sur l'évolution d'une autre variable. Les auteurs ont conduit avec succès une évaluation dans laquelle *TimeFork* a été appliqué à des données financières. Contrairement à *TimeFork*, nous ne modifions pas directement les données brutes mais permettons l'application de modifications dans le comportement des utilisateurs. Modifier les données brutes nécessite en effet une connaissance du domaine de la part des utilisateurs. De plus notre approche *what if* ne nécessite pas de modèle de calcul prédisant le futur car nous modifions les données passées.

Nous verrons également deux approches de type *what if* [34, 62] appliquées à la visualisation de consommation d'électricité dans le Chapitre 3.

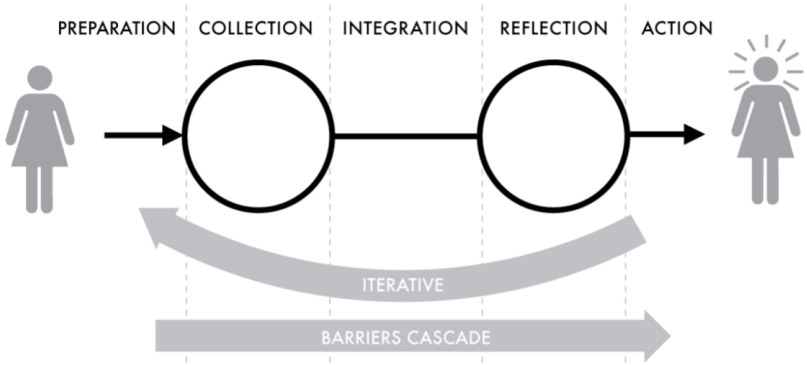


Figure 2.9 – *Étapes dans l'utilisation des systèmes d'informatique personnelle. Figure tirée de l'état de l'art de Li et al. [83].*

2.3 Visualisation personnelle

Cette section présente le domaine de la visualisation personnelle, pouvant être brièvement définie par la visualisation d'information dans un contexte personnel. La compréhension des enjeux de ce domaine est essentielle à la thèse car la consommation d'énergie fait partie de ce contexte personnel. Aussi notre méthode de visualisation personnelle basée sur le *what if* peut s'appliquer à d'autres domaines que nous allons présenter dans cette section. Nous débutons par une définition de l'informatique personnelle, puis de la visualisation personnelle qui en est un sous-domaine (2.3.1). Nous présentons ensuite les difficultés du domaine, qui proviennent principalement du fait que les utilisateurs peuvent être novices (2.3.2). Enfin nous terminons cette section par des exemples de visualisations personnelles et détaillons leurs points communs et différences (2.3.3).

2.3.1 Définitions

Li *et al.* [83, 84] définissent l'informatique personnelle (*personal informatics*) comme l'ensemble des systèmes informatiques permettant aux utilisateurs de recueillir des données personnelles et de les analyser, dans le but de comprendre leurs comportements. Ce domaine s'est beaucoup développé avec l'informatique ubiquitaire (voir 1.2.1) grâce aux capteurs et à leur intégration avec les appareils mobiles. La plupart des systèmes informatiques personnels sont focalisés sur un type de données particulier, par exemple celles concernant l'activité physique. Li *et al.* caractérisent les données personnelles selon plusieurs facteurs. Les données peuvent être relatives au comportement ou physiologiques. Dans le premier cas elles décrivent des activités réalisées, par exemple des activités physiques. Dans le second cas elles décrivent un état de l'utilisateur, par exemple la fréquence cardiaque au cours du temps. Il peut s'agir de données actuelles (temps réel) ou d'un historique de données. Enfin les données peuvent être quantitatives, telles que

le nombre de pas réalisés, ou qualitatives comme l'humeur de l'utilisateur. Il est également possible de considérer des données externes à l'utilisateur si elles sont pertinentes. Dans le cas de l'activité physique, la météo pourrait par exemple être prise en compte. A noter que Li *et al.* se focalisent sur les données directement issues de l'utilisateur qui décrivent son état physique. D'autres définitions que nous verrons par la suite prennent aussi en compte les données indirectement issues de l'utilisateur telles que la consommation d'énergie.

Les études de Li *et al.* ne sont pas focalisées sur la visualisation mais sur le domaine général de l'informatique personnelle. Celui-ci comprend en effet toutes les étapes menant à l'analyse des données, allant de la collecte jusqu'à la visualisation. Dans leur première revue [83], ils proposent une succession d'étapes dans l'utilisation de ces systèmes (Figure 2.9). La première est la *préparation*, dans laquelle les utilisateurs choisissent les types de données qu'ils vont récolter et les outils qu'ils vont utiliser. La seconde étape est la *collecte* des données. Cette étape est suivie d'une étape d'*intégration*, où l'utilisateur prépare les données préalablement à l'analyse, potentiellement aidé d'un outil. Pendant la quatrième étape (*réflexion*) l'utilisateur analyse les données, essentiellement pour en extraire des changements de comportement. Enfin lors de la dernière étape d'*action* les utilisateurs appliquent les changements de comportement trouvés.

La seconde revue de Li *et al.* [84] étudie les attentes des utilisateurs vis-à-vis de ces systèmes et proposent des fonctionnalités nécessaires pour leur efficacité. Cette revue de l'informatique personnelle définit deux phases d'utilisation. La première est la *découverte*, dans laquelle les utilisateurs analysent l'historique et examinent les facteurs qui influencent leurs données. Lors de cette phase les utilisateurs définissent également des objectifs à atteindre, et des changements de comportement pour y parvenir. Cette première phase correspond aux étapes de l'informatique personnelle présentées dans le paragraphe précédent. Pour une application de contrôle du poids corporel par exemple, l'utilisateur va tenter de découvrir les facteurs ayant le plus d'influence sur son poids, qui seront probablement la nutrition et l'activité physique. La seconde étape dans l'utilisation de ces systèmes est la *conservation*, dans laquelle les utilisateurs observent régulièrement leur statut pour se comparer aux objectifs établis. Ils vérifient si leurs changements de comportement portent leurs fruits et leur permettent d'atteindre leurs objectifs. Les utilisateurs peuvent retourner à la phase de découverte lors d'événements inattendus ou d'incompréhensions, par exemple si les changements de comportement choisis ne permettent pas aux utilisateurs d'atteindre leurs objectifs.

Si les revues de Li *et al.* ne ciblent pas l'analyse des données en soi, Huang *et al.* [72] se focalisent sur la visualisation dans un contexte personnel. Ils définissent ainsi le domaine de la *visualisation personnelle* et de l'*analyse visuelle personnelle*. Leur étude agrège le résultat de travaux dans les domaines de la visualisation, de l'interaction Homme-machine, de l'informatique ubiquitaire, de l'informatique persuasive et de l'informatique personnelle. Parmi ces travaux, beaucoup proposent ou analysent des méthodes de récolte de données, mais peu se concentrent sur la visualisation et l'analyse

Figure 2.10 – *Présentation d'un utilisateur lors d'une rencontre de* Quantified selfers. *Cette communauté d'utilisateurs experts en récolte de données personnelles permet d'étudier l'utilisation des outils d'informatique personnelle [28, 29]. Image tirée de* `quantifiedself.com` *[108].*

des données. Une des contributions principales du travail de Huang *et al.* est l'ensemble de définitions proposées permettant de caractériser le domaine. Les auteurs définissent ainsi les *données personnelles* comme les données qui concernent une personne ; cette définition large inclut donc les données non directement issues de la personne, par exemple la consommation d'énergie d'un logement. Elle inclut également les données extérieures telles que le trafic routier si elles sont personnellement pertinentes. Huang *et al.* définissent également le *contexte personnel* comme une utilisation pour soi-même, qui exclut donc une utilisation dans un cadre professionnel. Ce contexte d'utilisation a des répercussions importantes sur la conception des systèmes comme nous le verrons par la suite. De ces définitions découle celle de la *visualisation personnelle*, qui est définie comme l'étude des visualisations interactives utilisées dans un contexte personnel. De même l'*analyse visuelle personnelle* est définie comme l'étude du raisonnement analytique à base de représentations visuelles dans un contexte personnel.

Chloe *et al.* [28, 29] présentent deux études effectuées sur le *Quantified self* [108]. Ce mouvement est constitué de personnes récoltant des données sur eux-mêmes et qui organisent des rencontres dans le but d'échanger leurs expériences (Figure 2.10). Les *quantified selfers* récoltent des données de diverses manières, allant de la notation sur papier jusqu'à la conception de leur propres applications. Cette communauté d'utilisateurs est considérée comme étant constituée d'utilisateurs experts (*extreme users*) de l'analyse des données personnelles. Les résultats sont donc difficilement généralisables à l'ensemble de la population. Toutefois ils ne sont pour la plupart ni experts en analyse de données ni en visualisation, ce qui permet de récolter beaucoup d'information sur leur utilisation des outils d'informatique personnelle et de visualisation personnelle. Chloe *et al.* étudient les visualisations utilisées par les *quantified selfers* qui sont princi-

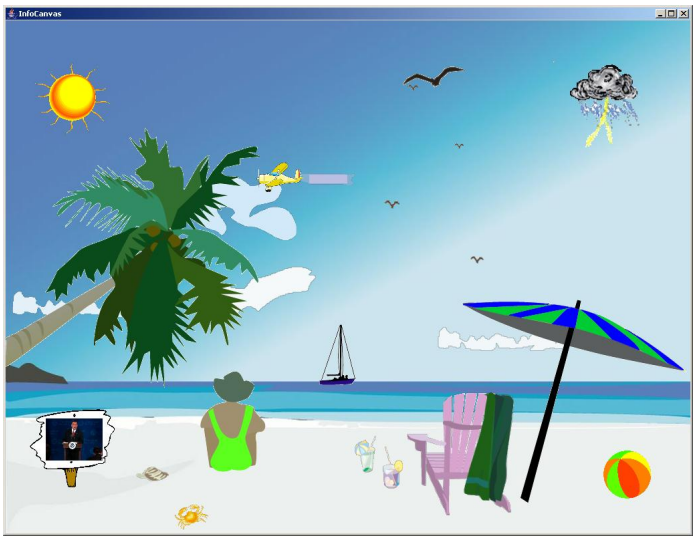


Figure 2.11 – *Le système de visualisation ambiant* InfoCanvas *[123]. Chaque élément visuel, par exemple le soleil ou les oiseaux, est associé à un flux de données et sa représentation évolue selon ces données.*

palement des graphiques en courbes, suivis en fréquence d'apparition par les graphiques en bâtons. Les graphiques en courbe sont en effet à la fois simples à interpréter et adaptés aux données personnelles, qui sont souvent des séries temporelles. Le mouvement *Quantified self* est similaire à l'informatique et à la visualisation personnelles, car il partage l'objectif de trouver des changements de comportement visant au bien être à partir des données. Toutefois il faut noter que le *Quantified self* se focalise presque exclusivement sur soi, impliquant que les données proviennent directement de l'utilisateur. Les données récoltées sont par exemple des données sur les activités des utilisateurs, le sommeil ou encore le poids.

Pousman *et al.* [105] présentent une étude de la visualisation d'information occasionnelle (*casual infovis*), qu'ils définissent comme l'utilisation des outils informatiques pour représenter visuellement les données personnellement pertinentes, dans des contextes professionnels ou personnels. Ainsi au contraire de la définition de la visualisation personnelle de Huang *et al.*, la visualisation d'information occasionnelle inclut des contextes professionnels. Toutefois les utilisateurs ne sont pas experts et n'utilisent la visualisation qu'occasionnellement pour leurs données personnelles. Le travail de Pousman *et al.* étudie trois types de systèmes de visualisation : les systèmes ambiants, les visualisations artistiques et les visualisations de données sociales. Ces visualisations sont utilisées fréquemment dans un contexte personnel mais sont peu étudiées par la littérature en visualisation, qui se concentre sur les systèmes pour utilisateurs experts. Parmi ces trois types de systèmes, les systèmes ambiants sont les plus fréquents, et font l'objet d'une taxonomie de Pousman *et al.* [104]. Ceux-ci sont situés dans l'environnement de l'utilisateur et permettent d'obtenir des informations sur les données

en un coup d'œil. Contrairement aux visualisations destinées à analyser les données, les visualisations ambiantes ne nécessitent pas de concentration et permettent d'être tenu au courant de l'évolution d'un flux de données. Par exemple *InfoCanvas* [123] (Figure 2.11) représente l'évolution de données sous forme d'animation. L'affichage représente un paysage, par exemple une plage, où chaque élément est lié à un flux de données et évolue selon celui-ci. Les systèmes ambiants sont conçus de façon à s'intégrer dans l'environnement utilisateur et l'esthétique est donc une partie importante de la conception. Similairement Huang *et al.* [72] définissent deux types d'interaction pour la visualisation personnelle, l'analyse active et l'attention passive. Toutefois l'analyse et l'interaction des systèmes ambiants sont limitées, ce qui rendent leur appartenance à la visualisation d'information discutable [105]. Même si certains systèmes disposent de moyens d'interaction, le but n'est pas d'effectuer une tâche d'analyse de données mais d'être tenu au courant d'une source d'information sans se concentrer.

Dans cette thèse, nous nous plaçons dans le contexte de la visualisation personnelle au sens de Huang *et al.* car nous nous focalisons sur la visualisation de la consommation d'électricité dans des logements personnels. Les données en question ne proviennent pas directement des utilisateurs, au contraire des données relatives au sommeil par exemple, mais sont toutefois liées à leur comportement. Les différentes définitions précédemment évoquées sont similaires et se recoupent, si bien que les challenges posés par la visualisation personnelle que nous allons maintenant présenter s'appliquent à toutes ces définitions de la visualisation personnelle.

2.3.2 Challenges

Dans cette partie nous abordons les challenges relatifs à la visualisation personnelle, à partir des analyses de ce domaine présentées dans la partie précédente. La première question à se poser lorsque l'on aborde le domaine de la récolte de données sur son comportement est : pourquoi avons-nous besoin de récolter et de visualiser ces données ? Nous pouvons en effet légitimement nous demander si une simple réflexion ne pourrait pas nous permettre de trouver des changements de comportement efficaces. Li *et al.* [83, 84] répondent à cette question en identifiant les raisons principales pour lesquelles cet objectif nécessite des outils spécifiques. Tout d'abord, certains comportements, tels que l'apnée du sommeil, sont invisibles pour l'utilisateur. Analyser le comportement sans outil spécifique nécessiterait d'être en permanence attentif à ce que nous faisons, ce qui demande beaucoup de temps. De plus notre mémoire est limitée et nous ne pouvons pas nous souvenir de tout ce que nous faisons. Même si ces limitations cognitives venaient à être compensées, il serait très difficile d'analyser le comportement et d'en tirer des conclusions. Les tendances et motifs présents dans les données ne peuvent en effet être détectées que par l'intermédiaire d'un outil d'analyse, typiquement une visualisation. Enfin même en utilisant un tel outil des limitations cognitives persistent. Les utilisateurs peuvent en effet faire face à un manque d'expertise et de connaissances leur empêchant

d'interpréter les données. Il est par exemple difficile de tirer des conclusions de ses propres données médicales sans l'avis d'un médecin [53].

Toujours selon Li *et al.* [83, 84], les outils aidant à la récolte des données personnelles possèdent eux-mêmes des limitations. Les étapes dans l'utilisation de ces outils (du choix de l'outil à la visualisation) sont en effet dépendantes, ce qui signifie que tout problème rencontré à une étape se propage aux suivantes. A titre d'exemple, une erreur de récolte entraînant une perte de données risquera d'empêcher leur analyse correcte. Pire, un mauvais choix d'outil de récolte ou d'analyse mènera à de mauvais résultats en termes de changements de comportement. Les utilisateurs participent dans tout le processus : collecte, exploration et compréhension des données. Ils sont donc au cœur de ce processus et ont besoin d'outils faciles à utiliser. Li *et al.* [85] montrent par exemple le compromis entre la récolte automatique des données et l'engagement de l'utilisateur. Les utilisateurs ont en effet tendance à moins s'engager si la récolte de données est automatique. Au contraire, une récolte manuelle ou une annotation de leurs activités impliquera plus d'implication de leur part, mais leur imposera également une charge de travail supérieure et augmentera le risque d'abandon.

Selon Huang *et al.* [72] le principal challenge de la visualisation personnelle est la différence de contexte d'utilisation comparativement à la visualisation d'information pour les experts. En effet les utilisateurs ne sont pas des professionnels rémunérés afin d'effectuer une tâche de visualisation. Ils ont potentiellement moins de temps disponible pour les tâches d'analyse, et leurs buts et motivations sont différents. Dans un contexte personnel les utilisations sont plus courtes mais répétées, au contraire d'une analyse de données ponctuelle et longue pour la visualisation dans un contexte professionnel [105]. Ces paramètres doivent être pris en compte dans la conception de la visualisation. Or selon Pousman *et al.* [105] la recherche en visualisation d'information s'est concentrée principalement sur les utilisateurs experts.

La visualisation personnelle nécessite des outils spécifiques car les conclusions à en tirer sont différentes de la visualisation classique [28]. En particulier ces conclusions sont essentiellement basées sur l'introspection (*self-reflection*). Cette réflexion nécessite un contexte personnel externe pour comprendre les données et surtout faire le lien entre les données et soi-même. Parfois seul l'utilisateur possède le contexte de ses données. Or comme énoncé précédemment la mémoire seule est insuffisante, il faut donc fournir à l'utilisateur des informations de contexte supplémentaires [72]. Pour toutes ces raisons il est impossible de se contenter de réutiliser directement les techniques de visualisation d'information existantes [105]. Une solution possible est de fournir aux utilisateurs la possibilité d'explorer plusieurs types de données [84]. Un type d'utilisation de la visualisation personnelle reporté par Chloe *et al.* [28] est l'expérimentation sur soi (*self-experimentation*). Cette dernière consiste à tester l'impact de changement de comportement sur les données. Chloe *et al.* notent un manque de ce type d'outil permettant le support de l'expérimentation sur soi. La méthode que nous proposons dans cette thèse est justement un de ces outils car elle permet d'évaluer l'impact d'un

changement de comportement sur les données.

Une autre difficulté importante est la nécessité d'élargir la population d'utilisateurs en incluant les novices [105]. La plupart des utilisateurs n'ont en effet pas d'expertise dans la visualisation ou dans le domaine des données analysées. Il est ainsi difficile pour eux de créer des visualisations, de trouver les bonnes associations visuelles et d'interpréter la visualisation [28, 72]. Le type de visualisation choisi peut par exemple être inapproprié pour les données [28]. Ce manque de compétences augmente le risque de mauvaises interprétations des données et en particulier de biais d'interprétation.

Enfin la dernière difficulté majeure concerne l'évaluation des visualisations personnelles. Les évaluations basées sur des métriques de temps et d'erreurs utilisées en visualisation classique ne sont pas adaptées au contexte personnel [72]. Les utilisateurs peuvent en effet utiliser la visualisation pour le plaisir de découvrir leurs données et y passer plus de temps, sans rechercher la performance. Pousman *et al.* [105] relèvent deux autres problèmes majeurs pour l'évaluation des systèmes de visualisation personnelle. Premièrement, les utilisateurs peuvent tirer des conclusions différentes de l'utilisation d'un même outil, qui soient toutes bénéfiques. Deuxièmement, les expérimentations en laboratoire sont souvent inappropriées pour tester l'efficacité des outils de visualisation personnelle. Les bénéfices tirés de l'utilisation de ces outils peuvent en effet n'être visibles que sur le long terme dans le cas de changements de comportement. Toutefois les expérimentations en laboratoire permettent de tester l'utilisabilité des visualisations ; des expérimentations *in-situ* de courte durée peuvent également permettre l'étude de l'interaction au quotidien [57]. Enfin de manière générale, et même pour la visualisation d'information classique, l'évaluation des visualisations sur leur capacité à permettre à l'utilisateur de prendre une décision est difficile et aucune méthode d'évaluation efficace n'est connue [41].

2.3.3 Domaines d'application

Nous présentons dans cette partie les applications principales de la visualisation personnelle. La plupart de ces applications concernent les données provenant directement des individus, comme les données de santé, d'activité physique ou de sommeil. Nous présentons en premier lieu ces applications. Puis nous présentons des applications dans lesquelles les données proviennent indirectement des utilisateurs comme la consommation de bande passante d'une connexion internet ou les finances.

Selon Faisal *et al.* [53] la visualisation pour le domaine de la santé est difficile, que ce soit pour les praticiens ou les patients eux-même. Il faut en effet traiter un grand nombre de données diverses. Dans le cadre de la visualisation personnelle, les praticiens eux-mêmes doivent utiliser la visualisation pour expliquer les données aux patients. Mais les patients eux-mêmes peuvent utiliser la visualisation pour gérer leur santé, notamment dans le cas de pathologies chroniques. Par exemple pour le diabète

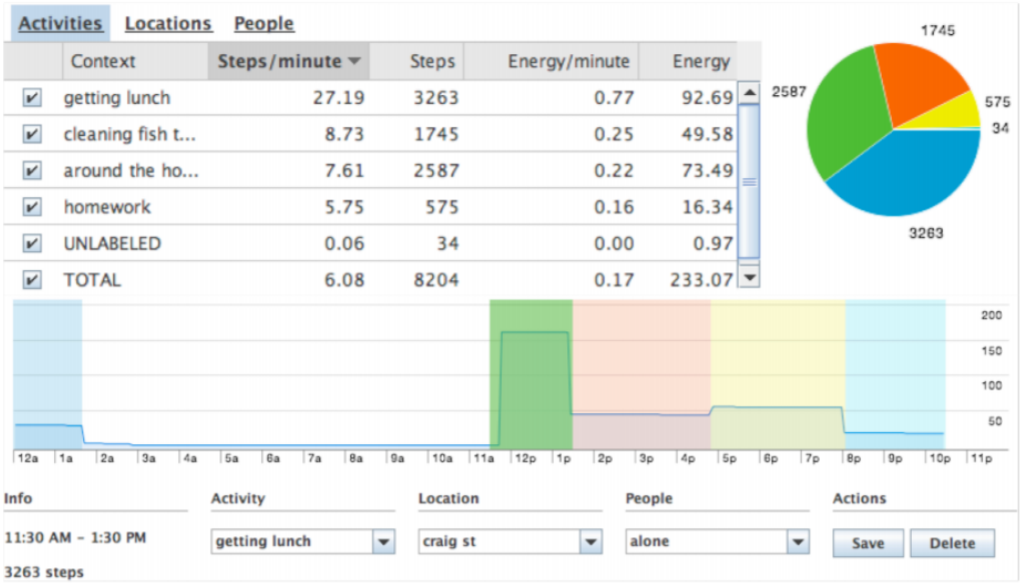


Figure 2.12 – *Le prototype* IMPACT *[85], permettant de visualiser les activités de l'utilisateur sur la courbe du nombre de pas réalisés au cours du temps. Les activités sont représentées sous forme de couleurs, chaque activité étant associée à une couleur donnée. Par exemple sur cette capture d'écran l'activité* prendre un repas *est associée au bleu.*

un certain nombre de visualisations ont été développées, avec pour objectif l'ajout de contexte afin de visualiser les facteurs qui influencent le taux de glucose dans le sang (glycémie). Ainsi Preuveneers *et al.* [106] augmentent la visualisation classique de la glycémie avec les activités et déplacements de l'utilisateur. Frost *et al.* [58] ainsi que Mamykina *et al.* [89] permettent l'ajout de photos à la visualisation afin de lier les repas au taux de glucose. En particulier *MAHI*, l'outil développé par Mamykina *et al.* vise l'apprentissage d'un comportement nutritionnel sain. Toutefois ces systèmes sont assez limités en termes d'analyse de données, car ils se contentent d'afficher la courbe de la glycémie en ajoutant des informations.

Li *et al.* [85] ont conduit trois études utilisateur pour évaluer l'importance du contexte dans la visualisation de données d'activité physique. Deux de ces études étaient basées sur *IMPACT* (Figure 2.12), un prototype conçu pour la visualisation de ces données. Les auteurs ont montré que le système augmentait la conscience de l'activité physique des participants. Cette conscience a permis aux participants de découvrir comment augmenter leur activité physique. Par exemple certains d'entre eux ont décidé de régulièrement remplacer des déplacements en bus par de la marche. Dans *IMPACT* les activités effectuées au cours des journées sont affichées sur la courbe du nombre de pas de l'utilisateur au cours du temps. Ces activités sont représentées par des couleurs sur la visualisation de l'activité physique. Cette visualisation est ainsi proche de celle

Figure 2.13 – *Visualisations tirées de* SleepExplorer *[86], un outil permettant d'analyser la qualité du sommeil et les facteurs qui l'influencent. A gauche les graphiques en bâtons permettent de visualiser des attributs du sommeil de l'utilisateur, ici le temps de sommeil et le temps d'éveil par jour. A droite les bulles représentent les facteurs qui influencent ces données. Les couleurs de ces bulles dépendent de la corrélation avec les attributs du sommeil.*

que nous avons conçu pour les utilisation des appareils électriques (voir 4.2.2), car nous représentons ces utilisations à l'aide de couleurs sur la courbe de la consommation électrique. Cependant les moyens d'interaction de *IMPACT* sont limités, il est par exemple impossible de sélectionner des activités au cours du temps.

Liang *et al.* [86] ont présenté *SleepExplorer* (Figure 2.13) qui est dédié à l'analyse de la qualité du sommeil. La particularité de cet outil est la visualisation de facteurs qui influencent le sommeil en plus de celle des attributs décrivant la qualité du sommeil. Ces facteurs d'influence sont, par exemple, la consommation de café lors de la journée ou l'activité physique. Ces facteurs sont visualisés sous forme de bulles à côté de la visualisation des attributs principaux du sommeil : temps de sommeil, temps éveillé, nombre de réveils pendant la nuit et temps nécessaire pour l'endormissement. Ces attributs sont visualisés à l'aide de graphiques en bâtons. Les corrélations entre les différents facteurs d'influence et les attributs du sommeil sont calculées automatiquement depuis les don-

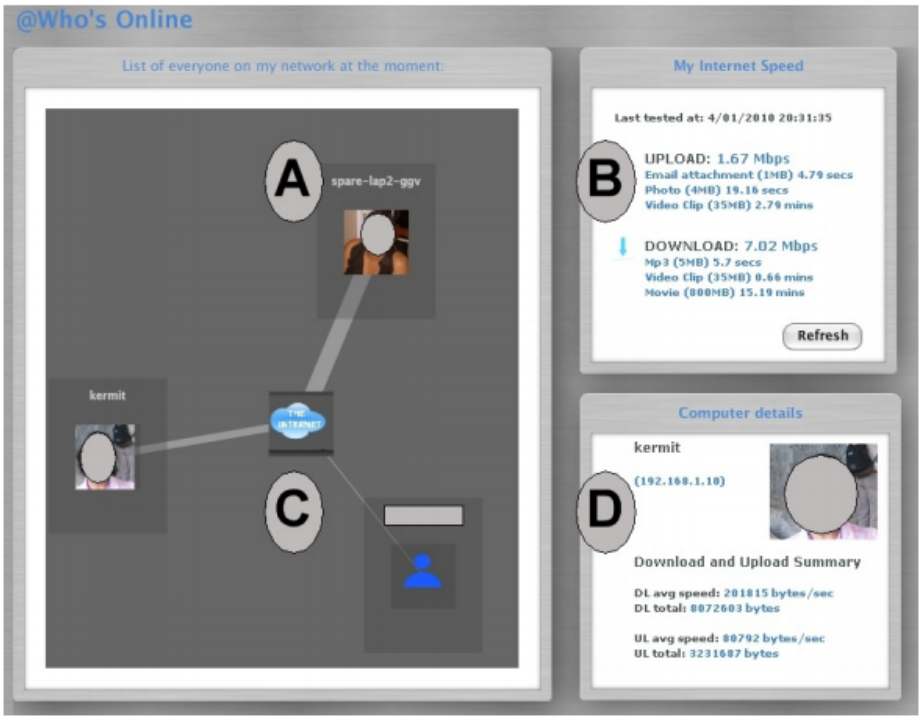


Figure 2.14 – *Visualisation tirée de* Kermit *[26], un outil permettant d'analyser la consommation de bande passante des appareils d'un logement connectés à Internet. Cette visualisation représente le graphes des utilisateurs du logement connectés à Internet. La largeur des arêtes des utilisateurs représente la consommation de bande passante de leur machine.*

nées. Ces corrélations sont ensuite représentées à l'aide de couleurs dans la visualisation. L'expérimentation *in-situ* menée avec 12 participants pendant deux semaines a montré que la visualisation permettait aux participants de mieux assimiler les facteurs qui influencent leur sommeil. De plus les participants ont pu se rendre compte que certaines de leurs suppositions qu'ils avaient avant l'expérimentation étaient erronées. Toutefois ils ont manqué de support pour expérimenter des changements de comportement, le seul moyen étant de faire varier en vrai les facteurs d'influence du sommeil. Certains participants ont par exemple augmenté ou diminué volontairement la quantité de café ou d'alcool pris au cours de la journée afin d'étudier l'influence sur le sommeil. L'application d'une telle solution en pratique paraît complexe. Si les données sur le sommeil et l'activité physique peuvent être récoltées automatiquement à l'aide d'un bracelet dédié, un grand nombre de facteurs doivent être récoltés à la main par l'utilisateur.

La visualisation personnelle s'applique également aux données ne provenant pas directement de l'utilisateur mais qui dépendent de son comportement et sont donc pertinentes personnellement. C'est par exemple le cas des données relatives à l'apprentissage des étudiants. Roberts *et al.* [110] présentent leur idée de la conception de systèmes de

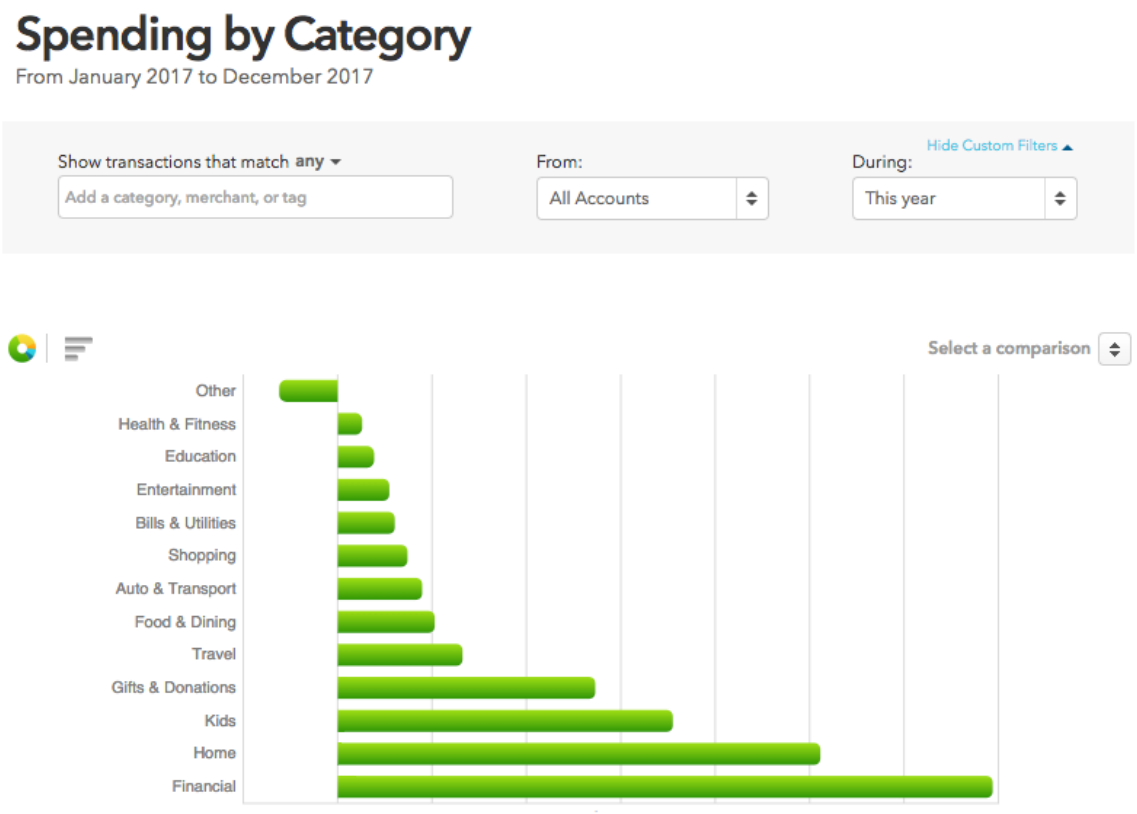


Figure 2.15 – *Visualisation tirée de* Mint *[92], une solution commerciale permettant d'analyser ses finances personnelles. Cet outil se connecte directement au compte bancaire et propose plusieurs types de visualisation. Ici par exemple il est possible de visualiser sur un an les dépenses par catégorie.*

visualisation personnelle appliqués à ce domaine. Les étudiants pourraient en effet avoir accès à une grande quantité de données récoltées qui permettraient de les aider dans leur parcours. Visualiser les cours choisis ou le temps passé dans chacun d'eux pourrait par exemple leur permettre d'analyser leur progression et de mettre en relation leurs résultats avec ces données. Si les auteurs ne présentent pas de prototype réel, leur vision de la visualisation personnelle pour les étudiants est prometteuse.

Chetty *et al.* [26] ont présenté *Kermit* (Figure 2.14), un outil permettant de visualiser la consommation de bande passante de la connexion Internet d'un logement. Grâce à cet outil les utilisateurs peuvent visualiser en temps réel la consommation de bande passante des autres occupants du logement. Cette visualisation permet de déterminer qui consomme le plus de bande passante lorsque la connexion devient lente. Il est également possible de visualiser les utilisateurs les plus consommateurs au cours de la journée. *Kermit* a été déployé dans 10 logements pendant trois mois afin d'être évalué. Les participants ont apprécié l'outil, qui leur a permis de mieux gérer leur connexion internet. La contribution principale n'est toutefois pas la visualisation en soi mais plutôt

l'analyse des requis pour un système efficace de gestion de la connexion internet. Ce travail permet également d'étudier le ressenti des utilisateurs vis à vis de leur connexion internet, par exemple la confiance dans le fournisseur d'accès.

La visualisation personnelle peut également s'appliquer au domaine des finances, dont les données sont personnelles et dépendent du comportement de l'utilisateur. Par exemple *Mint* [92] (Figure 2.15) est un outil commercial permettant de visualiser les finances de l'utilisateur. Il est par exemple possible de visualiser les dépenses au cours du temps, ou de les visualiser par catégorie d'achat. L'avantage principal de *Mint* est sa facilité d'utilisation. En particulier, il s'associe directement avec le compte bancaire de l'utilisateur pour extraire les données et générer les visualisations. Toutefois ces dernières sont classiques et peu d'interactions sont proposées à l'utilisateur. De même *Mint* ne propose pas d'ajout de contexte au contraire des visualisations présentées précédemment. Au contraire de *Mint*, qui permet à l'utilisateur de comprendre d'où proviennent ses dépenses, Schwarz *et al.* [119] proposent d'utiliser les données financières de l'utilisateur afin d'inférer des données sur son comportement. Cette utilisation inversée permet par exemple d'obtenir le nombre de cafés consommés par jour, les types de repas consommés ou encore l'empreinte carbone (quantité de CO_2 émise) des achats réalisés. Le premier avantage de cette application est l'ajout de contexte à la visualisation des finances. Mais elle permet également à l'utilisateur d'obtenir facilement et automatiquement un grand nombre de données personnelles différentes.

2.3.4 Discussion

Dans cette section nous avons présenté le domaine de la visualisation personnelle, qui est inclus dans celui de l'informatique personnelle. Nous avons vu plusieurs définitions du domaine qui sont toutefois similaires. La visualisation personnelle est rendue difficile par le contexte d'utilisation, dans lequel les utilisateurs ne sont experts ni en visualisation ni dans le domaine des données visualisées. Le domaine de la visualisation personnelle étant récent, il pose beaucoup de challenges aux développeurs d'applications et peu de solutions ont été apportées. Par exemple il n'y a pas de solution connue pour la création de visualisations faciles à interpréter par les novices. Aussi il est important de noter le manque d'interaction fourni par ces systèmes. En particulier le manque de support pour le test de changements de comportements dans les applications revient dans plusieurs études. Notre méthode de visualisation personnelle basée sur le *what if* permet justement de tester de tels changements. Une leçon retenue des revues du domaine que nous avons présentées est qu'il ne faut pas uniquement prendre en compte la visualisation dans la conception des systèmes de visualisation personnelle. En effet des paramètres tels que le choix de la manière de récolter les données ont des répercussions sur toutes les étapes d'utilisation de l'informatique personnelle, jusqu'à l'analyse des données par l'utilisateur.

Nous avons également vu que le domaine de la visualisation personnelle contient un

grand nombre d'applications. Toutes ces applications partagent un point commun, qui est la nécessité d'apporter du contexte au données personnelles pour les comprendre, plutôt que de juste visualiser les données brutes. L'ajout de contexte permet en effet aux utilisateurs de lier les données à leur comportement, et ainsi de comprendre comment le modifier pour influencer les données. Mais ce point commun empêche également un système unique de s'adapter à toutes ces applications. Le contexte requis est en effet différent pour beaucoup d'applications, et une conception dédiée est alors nécessaire pour chaque application. Ainsi on ne peut que difficilement étudier la visualisation personnelle de manière générale sans prendre en compte le type des données visualisées. Par exemple nous verrons dans le chapitre suivant que la visualisation de l'énergie possède ses propres requis de conception. En revanche, il est imaginable de réutiliser des modèles de visualisation ou d'interaction pour différentes applications. Par exemple la visualisation des facteurs d'influence utilisée pour le sommeil pourrait s'appliquer à l'activité physique. Suivant cette idée nous proposons d'appliquer notre méthode pour la visualisation personnelle à d'autres applications que la consommation d'énergie, domaine auquel elle est dédiée en premier lieu.

Chapitre 3

Visualiser la consommation d'énergie domestique

Ce chapitre présente le domaine de la visualisation de la consommation d'électricité dans un contexte domestique. Les contributions de la thèse se situent dans ce domaine. Ce sujet est étudié par plusieurs domaines de recherche, les principaux étant l'économie, la psychologie environnementale et l'interaction Homme-machine (IHM), dans laquelle est inclue la visualisation interactive d'information. Nos contributions se situent dans ce dernier domaine. Toutefois il est nécessaire de prendre en compte les aspects relatifs aux deux autres domaines afin de saisir les enjeux humains. Nous débutons cette revue de la visualisation de consommation d'énergie par plusieurs définitions, en particulier celle de l'*eco-feedback* (3.1). Puis nous poursuivons avec les études quantitatives qui concernent majoritairement le domaine de l'économie (3.2). Nous présenterons ensuite les études comportementales (3.3) puis les études de conception (3.4). Enfin nous terminons cette revue par les travaux de recherche concernant les systèmes interactifs (3.5).

3.1 Définitions et exemples de systèmes

Il existe une multitude de possibilités pour fournir aux consommateurs un retour d'information sur la quantité d'énergie consommée, allant de simples factures jusqu'aux systèmes de visualisation temps réel [38]. Ce sujet de recherche est nommé *eco-feedback* dans plusieurs études [15, 21, 57, 122, 125]. Froehlich *et al.* [57] définissent les technologies *eco-feedback* comme des dispositifs permettant de fournir aux utilisateurs un retour sur leur comportement, avec comme objectif la réduction de l'impact environnemental de ce comportement. Notons que le terme *eco-feedback* est large et n'est pas restreint aux logements personnels. Il peut également s'appliquer dans un contexte professionnel, par exemple pour fournir à des employés un retour sur la consommation d'énergie de leur bâtiment de travail [144]. Il concerne également la consommation d'énergie des transports, comme la consommation de carburant d'un véhicule personnel [135]. Pierce et Paulos [102] réduisent le domaine et définissent le *retour d'information sur la consommation d'électricité*, qui consiste en une présentation de leur consommation aux utilisateurs induisant un apprentissage et une réduction de la consommation. Si les définitions précédentes incluent des solutions non informatisées comme les factures détaillées, Pierce *et al.* [101] définissent l'*eco-visualization* comme la présentation de l'énergie consommée via un système interactif de visualisation, dans le but de diminuer la consommation. Toutefois, même si le terme *eco-feedback* n'est pas restreint au contexte domestique et aux solutions informatisées, les auteurs sus-mentionnés utilisant le terme *eco-feedback* [15, 21, 57, 122, 125] se placent dans un contexte de consommation d'énergie domestique avec utilisation de solutions informatisées. Dans cette thèse nous proposons donc d'utiliser la définition suivante de *eco-feedback*, synthétisée depuis celles de ces auteurs :

Eco-feedback : technologies informatisées permettant de fournir aux utilisateurs un retour d'information sur leur consommation d'énergie dans un contexte domestique personnel.

(a)

(b)

Figure 3.1 – *Exemples de systèmes d'*eco-feedback *ambiants.* **(a)** power aware cord *de Gustafsson et Gyllenswärd [67], permettant de visualiser l'énergie électrique sous forme de flux lumineux le long du câble.* **(b)** ecoMeter *de* Landys & Gyr*, affichant la puissance instantanée actuelle du logement ainsi que la consommation au cours de la journée. Image tirée de l'étude de Strengers [125].*

Les technologies *eco-feedback* peuvent prendre de multiples formes. Faisant partie du domaine de la visualisation personnelle, nous pouvons les catégoriser en systèmes ambiants, systèmes sur ordinateur et applications sur mobile. Les systèmes ambiants sont situés dans le logement des utilisateurs et sont vus directement sans besoin de lancer une application (voir 2.3.1), contrairement aux systèmes sur ordinateur ou mobile. Par exemple Gustafsson *et al.* [67] ont conçu le *power aware cord* (Figure 3.1a), un câble électrique affichant un flux lumineux qui correspond à la quantité d'énergie électrique qui circule dans le câble. Les consommateurs obtiennent dès lors un retour sur la puissance électrique consommée par le dispositif alimenté par le câble. Les affichages ambiants peuvent également prendre la forme d'écrans présentant une visualisation (Figure 3.1b). Ils sont alors nommés *IHD* pour *in-home displays* [21] ou encore *Smart displays* [69]. Il est à noter que certains de ces affichages présentent un côté artistique. Dans ce cadre, Holmes [71] étudie la combinaison de la technologie et de l'art pour présenter la consommation aux utilisateurs. Ce côté esthétique a pour but d'attirer l'utilisateur et le faire réfléchir sur la consommation d'énergie.

Les systèmes sur ordinateur, qu'ils soient accessibles depuis une page web ou qu'ils soient une application dédiée, sont appelés les *dashboards* [15]. Ceux-ci peuvent par exemple être fournis par le fournisseur d'électricité dans le cadre du développement des *smart grids* et des compteurs intelligents (voir 1.2.3), comme c'est le cas pour le gestionnaire de réseau français *Enedis*. Celui-ci permet en effet via un portail dédié

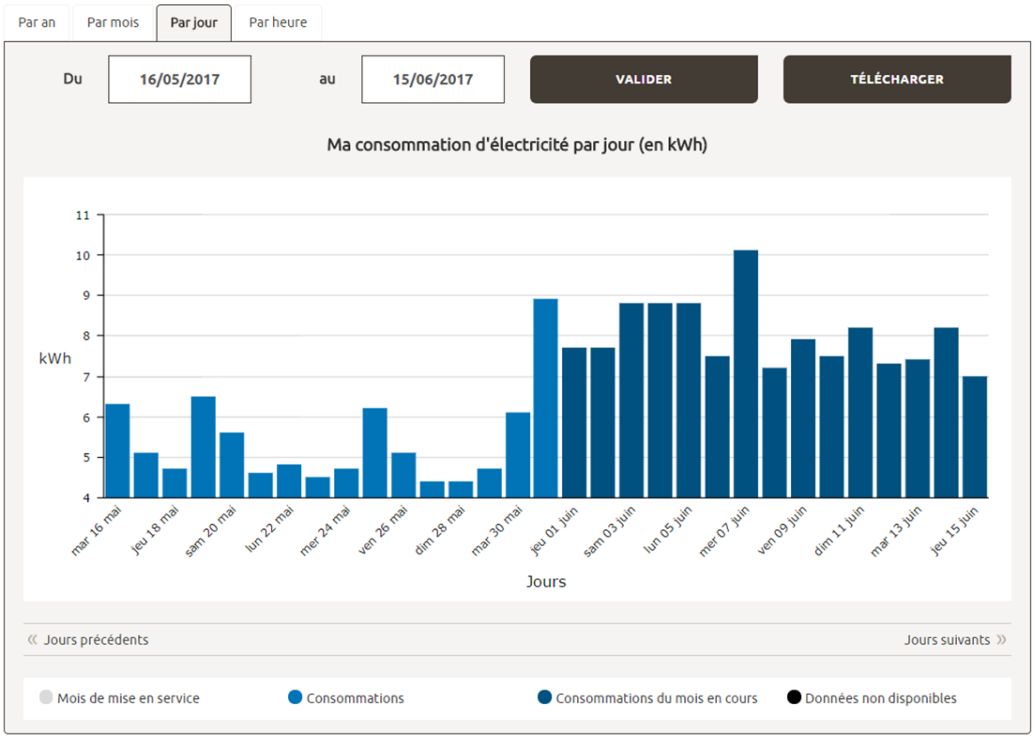


Figure 3.2 – *Visualisation de la consommation électrique d'un logement sur le portail d'*Enedis*, le gestionnaire du réseau électrique français. La consommation électrique est obtenue à partir du compteur intelligent* Linky *(voir 1.2.3).*

(Figure 3.2) de visualiser sa consommation électrique par an, par mois, par jour et par heure [48]. Il est également possible pour les habitants d'un logement d'installer un système de visualisation de leur consommation d'énergie, qu'il soit commercial comme *The Energy Detective* [127] ou libre comme *MyElectric* [96] (Figure 3.3).

Froehlich *et al.* [57] distinguent deux catégories d'études sur les technologies *eco-feedback*. La première catégorie relève du domaine de la psychologie environnementale, et contient les études dont le but est de recueillir des informations sur le comportement vis à vis des systèmes *eco-feedback*. La deuxième catégorie concerne l'IHM, dont le but dans le domaine de l'*eco-feedback* est de concevoir des systèmes interactifs efficaces, permettant aux utilisateurs de mieux comprendre leur consommation et de la réduire. Les études de psychologie environnementale étudient des changements de comportement, ce qui nécessite une plus longue durée d'étude. Au contraire, les études en IHM sont de plus courte durée car elles ciblent l'interaction avec un système et non le comportement des utilisateurs lui-même. Cette catégorisation est similaire à celle de Fischer [55] qui distingue les *expérimentations de terrain* des *projets de modèle*. Le but des premières est d'obtenir des informations sur les effets de l'eco-feedback, tandis que les seconds ont pour objectif l'évaluation d'un type d'*eco-feedback* en pratique. En accord avec ces

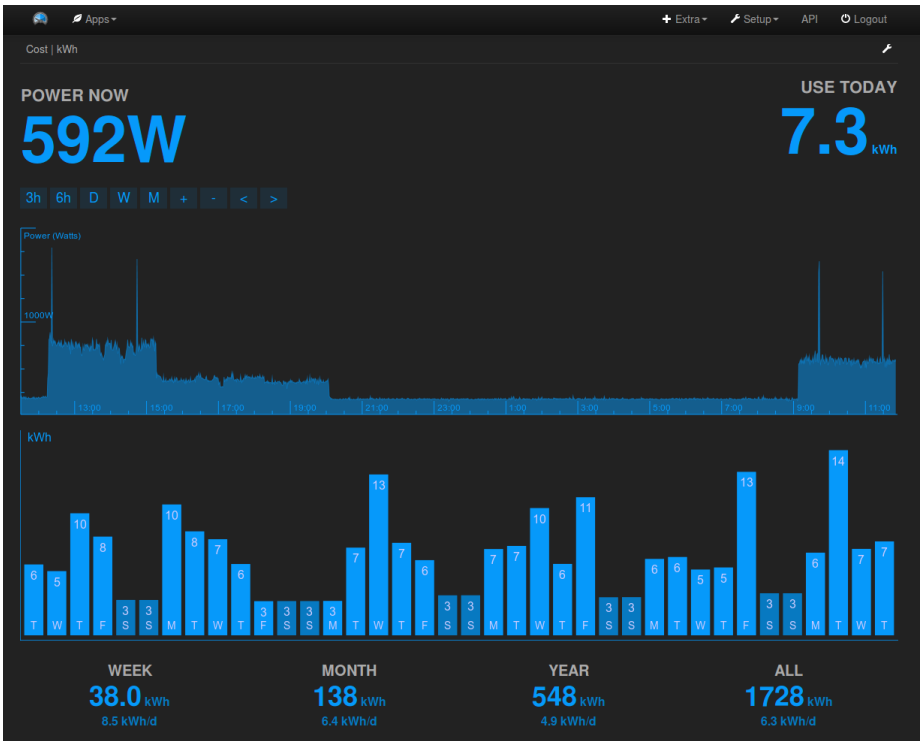


Figure 3.3 – *Visualisation de la consommation électrique d'un logement via l'application* MyElectric *[96]. L'application affiche la puissance instantanée et l'énergie dépensée dans la journée. La première visualisation correspond à la courbe de charge de la journée, et la seconde à l'énergie consommée par jour.*

catégorisations, nous consacrons à chacun de ces deux types d'études une partie de cette revue et ajoutons en première partie une revue des études quantitatives. Ces études ont pour but l'analyse des économies réalisées avec l'aide des dispositifs *eco-feedback*, sans forcément prendre en compte le comportement des utilisateurs.

3.2 Études quantitatives

Le but des études quantitatives est de mesurer les effets de l'*eco-feedback* en termes de variation de la consommation des logements. En particulier elles permettent d'obtenir des chiffres significatifs sur les économies réalisées à l'aide des technologies *eco-feedback*. Pour cela un système *eco-feedback* est installé dans un panel de logements choisis. Un groupe de contrôle est parfois utilisé pour comparer l'évolution de consommation des logements équipés avec des logements similaires non équipés. La caractéristique de ces études, contrairement aux études menées dans le domaine de l'IHM, est le nombre conséquent de logements instrumentés, parfois plusieurs centaines [38]. La durée des études est longue, de plusieurs mois à plusieurs années. Ce nombre de logements et

cette durée sont nécessaires pour obtenir des résultats de variation de consommation significatifs.

Contrairement à ces études, dans cette thèse nous ne ciblons pas de résultats quantitatifs de variation de consommation mais plutôt une analyse de l'interaction avec la méthode que nous proposons. Ces études étant très nombreuses nous ne les détaillons pas toutes mais citons quelques exemples et présentons des synthèses qui agrègent leurs résultats.

À titre d'exemple, Mountain [93] a installé un affichage temps réel chez 300 ménages au Canada pendant une durée de deux ans et demi. Les effets possibles externes sur la variation de consommation tels que la température extérieure sont compensés afin d'obtenir des résultats non biaisés. Ceux-ci montrent une économie de 6.5% en moyenne parmi les logements participant à l'expérimentation, avec des économies plus importantes pour les logements qui ne se chauffent pas avec l'énergie électrique. Wood et Newborough [143] ont déployé un affichage ambiant en Grande-Bretagne dans 44 logements pendant une durée d'au moins un an. La particularité de cette étude est qu'elle se concentre sur l'électricité consommée par la cuisine. Les résultats montrent une économie d'énergie de 15% en moyenne pour les logements équipés, tandis que le groupe de contrôle qui se contentait d'informations sur papier n'a réduit sa consommation que de 3%.

Darby [38] ainsi que Ehrhardt-Martinez *et al.* [46] présentent une revue de ces études quantitatives. Ces méta-études agrègent les conclusions, en prenant en compte les contextes temporels et spatiaux. En effet, les résultats dépendent de l'année de l'expérimentation, car les technologies *eco-feedback* évoluent au cours du temps. Ils dépendent également du lieu où est menée l'expérimentation. La synthèse de ces résultats est positive : l'*eco-feedback* est efficace, car il permet d'économiser de 5% à 15% [38, 46]. Ces chiffres sont attestés par un grand nombre d'études, par exemple la revue de Ehrhardt-Martinez comporte 57 études quantitatives. Toutefois ces revues montrent également la complexité de ce domaine. Les résultats dépendent en effet de beaucoup de facteurs, les principaux étant la méthode de retour sur la consommation utilisée et les participants eux-mêmes. Ehrhardt-Martinez *et al.* présentent une taxonomie des différentes méthodes *eco-feedback*, dans le but d'étudier leur efficacité selon leur type. À noter que celles-ci ne comportent pas uniquement des méthodes informatisées :

- Facture standard : consommation sur un ou plusieurs mois.
- Facture détaillée : facture avec des informations supplémentaires, par exemple des comparaisons avec la moyenne des logements de même catégorie.
- Estimation : désagrégation analytique de la consommation en se basant sur les propriétés du logement. Permet par exemple d'estimer la consommation des appareils électroménagers ou multimédia.

Type de feedback	Nombre d'études	Proportion d'études	Intervalle des gains	Moyenne des gains
Facture détaillée	11	19%	de 1.2% à 10.0%	5.2%
Estimation	3	5%	de 5.1% à 8.5%	6.8%
Historique	15	26%	de 3.7% à 21.0%	11.0%
Temps réel (agrégé)	23	39%	de -5.5% à +32.0%	8.6%
Temps réel détaillé	5	11%	de 9.0% à 18.0%	13.7%

Figure 3.4 – *Récapitulatif des gains des participants lors des études quantitatives menées selon le type de méthode* eco-feedback *[46]. Les études prises en compte sont celles situées avant 2010. Les études avec les systèmes de type* temps réel agrégé *ont entraîné une augmentation de consommation dans certains logements.*

- Historique : historique de la consommation par intervalle de temps, par exemple par jour ou par mois.
- Temps-réel : consommation en temps réel au niveau du logement.
- Temps-réel détaillé : consommation en temps réel détaillée par appareil.

Cette taxonomie permet d'étudier les économies réalisées lors des études à l'aide de ces différentes méthodes (Figure 3.4). Selon ces résultats, les deux types de méthodes qui obtiennent les meilleurs résultats sont l'*historique* et le *temps réel détaillé*. Le premier permet en effet d'analyser les motifs et tendances au cours du temps, tandis que le second donne un retour direct sur les actions de l'utilisateur. A noter que les méthodes *temps réel détaillé* étant récentes, elles ont fait l'objet de peu d'études comparativement aux autres.

Si elles montrent des résultats positifs et les détaillent selon le type d'*eco-feedback*, les études quantitatives ont toutefois des limitations. Elles se concentrent en effet sur les économies réalisées mais peu sur le comportement des utilisateurs vis-à-vis de ces technologies. Pour reprendre la formule employée par certains auteurs, on sait que l'*eco-feedback* est efficace, mais on ne sait pas pourquoi [69, 100]. Un autre problème étant que sans savoir pourquoi il est efficace, on ne peut pas connaître ses limitations et donc l'améliorer. C'est justement le but des études comportementales que nous allons maintenant présenter.

3.3 Études comportementales

Afin de dépasser les limitations des études quantitatives que nous venons de voir et mieux comprendre pourquoi l'*eco-feedback* est efficace, un second type d'études est

mené : les études comportementales. Ces études concernent le plus souvent la psychologie environnementale [57]. Elles ont pour but d'étudier le comportement des utilisateurs vis-à-vis des méthodes *eco-feedback* utilisées. Ces expérimentations sont similaires aux expérimentations quantitatives, en cela qu'un système *eco-feedback* est installé chez les participants pendant une durée de plusieurs mois. Les résultats principaux sont composés d'analyses des réactions des utilisateurs aux technologies déployées. Ainsi des entretiens sont menés avec les ménages participant aux expérimentations. Même si les résultats comportent parfois des analyses de l'évolution de la consommation d'énergie, ce n'est pas le but principal. Le nombre de logements est en effet moins important et les résultats en termes d'évolution de consommation sont donc moins significatifs.

Ces études permettent de mettre en lumière les raisons de l'efficacité de l'*eco-feedback*. La difficulté inhérente à la compréhension de la consommation d'électricité est son invisibilité [55]. L'électricité est un concept abstrait, que les utilisateurs ne voient pas lorsqu'ils la consomment. Aussi de manière générale les consommateurs reçoivent peu de retour sur leur consommation, seulement leur facture d'énergie. Kepton et Layne [78] comparent ainsi la consommation électrique à des courses effectuées dans un supermarché où les prix ne sont pas affichés, et qui ne seraient payées qu'à la fin du mois. L'*eco-feedback* permet de combler ce problème en rendant l'énergie visible pour les consommateurs [21]. Aussi ces technologies permettent aux utilisateurs d'apprendre et ainsi de mieux comprendre la consommation d'énergie [79]. Bartram [15] distingue trois types de connaissances. La connaissance analytique et les modèles conceptuels correspondent à la théorie de l'énergie et sa consommation. La conscience de la situation permet de comprendre ce qui se passe et pourquoi, par exemple pourquoi un appareil donné consomme une telle quantité d'énergie. Enfin les connaissances pratiques permettent aux utilisateurs de savoir quoi faire à un moment donné pour atteindre un but, principalement pour réduire la consommation.

Si les systèmes *eco-feedback* permettent l'apprentissage des deux premiers types de connaissances, la plus grande limitation de ces systèmes se situe dans le manque d'apprentissage du troisième type. En d'autres termes, les utilisateurs éprouvent de grandes difficultés lors des expérimentations pour trouver des actions concrètes qui leur permettent de réduire leur consommation [15, 21, 69, 125]. Par exemple, beaucoup de participants portent leur attention sur les lumières et font des efforts pour les éteindre car c'est un conseil souvent reçu, et leur utilisation est visible directement [69, 125]. Or les lumières, en particulier si elles sont récentes, consomment relativement peu par rapport aux autres types d'appareils. L'impact sur la consommation est alors très faible, ce qui implique une frustration des utilisateurs. Au contraire, des activités très consommatrices telles que la cuisine sont ignorées [125]. Cette difficulté à trouver des changements de comportements permettant d'économiser provient en partie des *pratiques non négociables* [69, 100, 125]. En d'autres termes les consommateurs ne veulent pas arrêter des activités même si elles sont très consommatrices. Par exemple le lavage du linge est une des activités les plus consommatrices d'un foyer, mais les consommateurs ne veulent pas l'arrêter car ils veulent des vêtements propres.

Un autre challenge est la diversité des utilisateurs. Gangale *et al.* [59] étudient l'implication des consommateurs dans les projets de *smart grids*. S'ils ne se concentrent pas uniquement sur le retour sur la consommation d'énergie, cette dimension fait partie intégrante de l'étude. Selon Gangale *et al.*, la communauté *smart grids* se concentre beaucoup sur les technologies utilisées et peu sur les utilisateurs. L'implication de ces derniers est pourtant un point clé de la réussite de ces technologies. Gangale *et al.* déduisent de leur étude que la difficulté à comprendre les utilisateurs provient de la diversité des facteurs qui influencent leur comportement vis à vis de ces technologies, le principal étant la motivation pour les économies d'énergie. Ainsi la segmentation des utilisateurs selon ces facteurs donne de meilleurs résultats lors des études. Cibler des segments spécifiques de population à étudier permet de mieux comprendre leur comportement.

Similairement, Kendel *et al.* [79] discutent d'une différence de consommation et d'effets de l'*eco-feedback* entre les logements à hauts et bas revenus. Ils mènent une étude dans le sud de la France où ils déploient des systèmes de visualisation de la consommation électrique dans 65 logements. Les participants ont la particularité d'avoir des revenus supérieurs à la moyenne de la région. Les économies réalisées par les ménages lors de cette expérimentation sont de 23% en moyenne, bien supérieur à la moyenne des économies réalisées lors d'études similaires. Les auteurs expliquent ce chiffre par le niveau de revenus : les ménages avec hauts revenus ont tendance à être plus consommateurs d'énergie que ceux avec bas revenus. Mais les ménages à bas revenus sont généralement plus sensibles aux économies financières, ce qui peut augmenter leur motivation. De même, He *et al.* [70] ainsi que Khosrowpour *et al.* [80] insistent sur le fait que la grande variabilité des ménages et surtout des utilisateurs rendent impossible le fait qu'un seul type d'*eco-feedback* soit efficace pour tous les logements.

Enfin, le manque de motivation est une limitation rencontrée dans presque toutes les expérimentations [15, 21, 52, 101]. Premièrement, Pierce *et al.* [101] indiquent qu'il est difficile d'atteindre les participants non motivés, qui ne veulent pas installer de systèmes *eco-feedback*. Ensuite, les utilisateurs qui ont installé un système dans leur logement manquent parfois de motivation pour l'utiliser. Une raison fréquemment évoquée par les participants est le manque de temps [52]. L'analyse des données de consommation demande en effet du temps pour être efficace. A noter que les utilisateurs qui ont payé leur système *eco-feedback* ont tendance à plus l'utiliser que ceux qui l'obtiennent gratuitement [21].

Si elles permettent de mettre en valeur les avantages et les limitations des systèmes *eco-feedback*, les études comportementales ont également des limites. Nous avons discuté des difficultés posées par l'*eco-feedback*, cependant aucune solution n'a été présentée jusqu'à présent. Ceci est dû au fait que les éléments de conception des systèmes utilisés sont très peu étudiés par les études comportementales [46]. Par exemple, le type de visualisation employé est rarement présenté dans ces études. Or la conception de ces systèmes a une grand influence sur leur efficacité [100]. De plus les moyens d'in-

teraction des systèmes utilisés sont souvent limités. Ceux-ci se contentent souvent de montrer la consommation agrégée à une certaine échelle de temps, ce qui ne facilite pas l'analyse [69]. Ajouter de l'interaction dans ces systèmes permet d'obtenir de meilleurs résultats [57]. Ainsi dans la partie suivante nous examinerons la conception des systèmes *eco-feedback* et en particulier l'interaction avec ces systèmes.

3.4 Études de conception

Cette partie est consacrée aux études concernant la conception des systèmes *eco-feedback*. Ces études concernent principalement les domaines de l'IHM et de la visualisation d'information. Le protocole est similaire à celui des études présentées précédemment : un système *eco-feedback* est installé dans un ensemble de logements. Les résultats principaux sont les interactions avec le système et le ressenti utilisateur, même si l'évolution de la consommation et le comportement en soi sont parfois étudiés. En particulier, il est intéressant d'étudier comment les choix de conception de ces technologies influencent leurs résultats [57]. Le principal objectif de ces expérimentations est donc d'établir des règles de conception afin d'obtenir des méthodes *eco-feedback* encore plus efficaces. Fischer [55], Pierce *et al.* [101, 100] ainsi que Bartram [15] passent en revue des études *eco-feedback* dans le but d'en extraire des règles de conception. Nous présentons ces règles ici.

Tout d'abord, la précision des données est un paramètre important de l'efficacité des systèmes *eco-feedback*. Faire le lien entre les actions de l'utilisateur sur les appareils et la consommation est un des enjeux fondamentaux de l'*eco-feedback*. Pour cela il est nécessaire d'avoir une visualisation détaillée, au moins au niveau de la journée [55]. Visualiser la puissance instantanée heure par heure permet en effet d'identifier les activités et de les lier à la consommation. De manière générale, les systèmes qui permettent à l'utilisateur de choisir la période de temps pour la visualisation se montrent plus efficaces [55]. Une visualisation détaillée par appareil plutôt que pour tout le logement entraîne une meilleure efficacité [55, 57, 69]. Un niveau de précision insuffisant entraîne des doutes et des incompréhensions de la part des utilisateurs, qui peuvent alors perdre leur confiance dans le système [21]. Une visualisation de la consommation agrégée au niveau du logement par exemple peut entraîner un scepticisme des utilisateurs, notamment lors des pics de consommation [52]. Si les utilisateurs ne se souviennent pas de leur activité lors du pic, il leur est difficile d'identifier l'appareil responsable et ils ont alors tendance à associer ce pic de consommation à du bruit.

Le type de système est également un choix important dans sa conception. Comme énoncé précédemment (3.1) on distingue trois types de systèmes selon Bartam [15] : les systèmes ambiants placés dans l'environnement de l'utilisateur, les applications sur mobile et les *dashboards* (logiciels sur ordinateur et applications web). Les systèmes ambiants ont l'avantage de fournir une information en permanence aux utilisateurs sans

nécessiter de concentration. Au contraire, les *dashboards* demandent plus d'implication à l'utilisateur, qui doit alors lancer l'application et analyser sa consommation. Toutefois ces systèmes permettent l'ajout d'interactions, qui sont limitées voire inexistantes pour les systèmes ambiants [57, 69]. L'interactivité est réclamée par les utilisateurs [21] et mène à des économies d'énergie plus importantes [55]. La plupart des systèmes ambiants affichent la puissance instantanée du logement en temps réel, parfois par l'intermédiaire d'une lumière qui devient rouge lorsqu'une certaine puissance est dépassée [125]. Si fournir à l'utilisateur un retour en temps réel est efficace [46], cela peut mener à une confusion entre puissance et énergie. En effet, les appareils de grande puissance tels que les bouilloires sont alors pris pour les plus consommateurs alors qu'ils ne le sont généralement pas [125]. Similairement, les réfrigérateurs sont alors ignorés car leur puissance est moindre, mais ils font pourtant partie des appareils les plus consommateurs car ils fonctionnent en permanence. Au contraire des systèmes ambiants, les *dashboards* permettent l'analyse de l'historique de consommation. Les motifs et tendances peuvent alors être identifiés et cette confusion est réduite. Les applications sur mobile sont peu étudiées par la littérature, hormis quelques systèmes que nous présenterons par la suite. Toutefois ils correspondent à un compromis entre systèmes ambiants et *dahsboards*, car ils sont utilisables plus rapidement mais leurs capacités d'analyse et d'interaction sont souvent limitées.

Des méthodes ont été proposées dans le but de motiver les utilisateurs. La définition d'objectifs à atteindre est une de ces méthodes [15]. Froehlich *et al.* [57] définissent ces objectifs comme une comparaison entre la situation actuelle et une situation future désirée. L'utilisateur peut par exemple définir un seuil de consommation à atteindre. Un système de récompenses permet également de motiver l'utilisateur à réaliser des économies [55, 122]. Ces récompenses peuvent prendre plusieurs formes, comme des points virtuels à gagner dans l'application [52] ou l'affichage de gains financiers réalisés [55]. Enfin la comparaison à un groupe est également une bonne source de motivation [57, 101]. Elle consiste à comparer la consommation de son logement avec celle de ménages similaires. Si ces moyens de motivation se sont montrés efficaces, ils possèdent des limitations. Tout d'abord, les utilisateurs ont tendance à essayer de conserver une certaine ligne de consommation qu'ils considèrent comme normale, mais sans essayer de la diminuer [69, 100]. Aussi certains logements peu consommateurs éprouvent des difficultés à réduire leur consommation et atteindre les objectifs et récompenses, ce qui peut entraîner une frustration [52].

Le choix de l'unité d'énergie à utiliser est un des critères les plus déterminants pour l'efficacité des technologies *eco-feedback* [15, 69, 125]. En effet les unités de consommation sont souvent jugées abstraites par les utilisateurs. Or l'incompréhension des unités peut diminuer l'efficacité du système, puisque les utilisateurs n'ont alors pas de moyen de connaître les ordres de grandeur de la consommation des appareils. Les utilisateurs doivent également pouvoir comparer les consommations des différents appareils, ainsi qu'estimer la portée des économies réalisées lors d'une modification de leur comportement. Pour cela, il est important de proposer à l'utilisateur une unité de consommation

qui lui soit familière. Contrairement au prix le kWh ne dépend pas du logement ou du contexte. Cette unité permet de comparer efficacement les consommations des appareils mais également de différents logements. Elle permet également aux consommateurs de faire le lien avec leur facture d'électricité. Cependant elle est jugée abstraite pour la plupart des gens [15, 69, 125] et entraîne une incompréhension de l'énergie.

Le prix est plus concret car c'est une unité utilisée dans la vie quotidienne qui peut être comparée à celui d'autres produits. Il permet aux utilisateurs d'évaluer directement le coût d'utilisation de leurs appareils ainsi que les économies réalisées. De plus il convient aux utilisateurs ayant une motivation extrinsèque, puisqu'ils peuvent visualiser directement la somme pouvant être économisée. Cependant, contrairement au kWh le prix n'est pas une unité absolue, puisqu'il varie selon plusieurs facteurs. Il peut être différent d'un logement à l'autre en fonction du fournisseur d'énergie et du type de contrat. Le prix peut également changer au cours du temps en cas de tarification dynamique. La quantité de gaz à effet de serre émise pour produire l'énergie consommée est également une unité possible [15]. Cette quantité est alors exprimée en kg équivalent CO_2 (équivalent en CO_2 de tous les gaz à effet de serre émis lors de la production). Cette unité a du sens pour les utilisateurs ayant une motivation écologique. Tout comme le prix, la quantité de CO_2 émise varie selon certains facteurs, le principal étant le moyen de production d'électricité utilisé. La quantité de CO_2 émise peut également paraître abstraite aux utilisateurs [15]. Pour lui donner plus de sens, il est possible de la convertir en unités plus concrètes telles que le nombre d'arbres nécessaires pour absorber la quantité de CO_2 émise.

3.5 Systèmes interactifs

Cette dernière partie de l'état de l'art sur le domaine de l'*eco-feedback* présente des travaux de recherche ayant pour particularité l'utilisation de techniques d'interaction appliquées au domaine. Ils sont proches de nos contributions car nous proposons dans cette thèse une technique d'interaction basée sur une approche *what if*.

Erickson *et al.* [52] ont développé le *Dubuque Electricity Portal*, une application web permettant aux utilisateurs de visualiser la consommation d'électricité de leur logement. Ce système propose également des comparaisons de groupe, ainsi que des objectifs à atteindre permettant de gagner des points. La contribution n'est pas axée sur le système lui-même, qui est plutôt classique, mais sur l'étude qui est menée. En particulier l'interaction avec les différents composants du système est analysée. Le système a été déployé dans 765 logements, parmi eux 266 l'ont utilisé au moins une fois. La durée de l'expérimentation est de 20 semaines, ce qui est relativement long pour une étude dans le domaine de l'IHM. Celle-ci confirme les limitations présentées dans la section précédente : les utilisateurs éprouvent des difficultés à trouver des modifications concrètes dans leur comportement. Bien que les auteurs aient fait face à des problèmes de motiva-

Figure 3.5 – *Capture d'écran du dashboard* open.DASH*, permettant de visualiser les données d'une maison connectée. Ce système permet aux utilisateurs de créer leurs propres visualisations à partir des flux de données de la maison. Ici une visualisation d'événements au cours du temps a été créée par l'utilisateur, comprenant par exemple les ouvertures de porte.*

tion de la part des utilisateurs, les objectifs et comparaisons de groupe ont eu du succès. Enfin il est à noter que parmi les différentes visualisations proposées, les visualisations temporelles ont eu la préférence des utilisateurs.

Castelli *et al.* [24] ont conçu *open.DASH* (Figure 3.5), un *dashboard* web dédié à la visualisation de données pour les maisons connectées. Ce système permet la visualisation de différentes sources de données, telles que le statut actuel des portes et fenêtres, les réglages du chauffage mais aussi la consommation d'énergie. Sa particularité réside dans la possibilité pour les utilisateurs de créer leurs propres visualisations des flux de données. Le système a été déployé dans plusieurs logements personnels et l'expérimentation est une réussite. Les participants ont bien apprécié la création de visualisations sur mesure, qui a été utilisée soit pour vérifier une hypothèse rapidement, soit pour créer des visualisations personnalisées destinées à être utilisées quotidiennement. Toutefois il faut noter que ce système n'est pas dédié à la visualisation d'énergie, et particulièrement d'électricité, mais est destiné à des données génériques. Il ne prend donc pas en compte

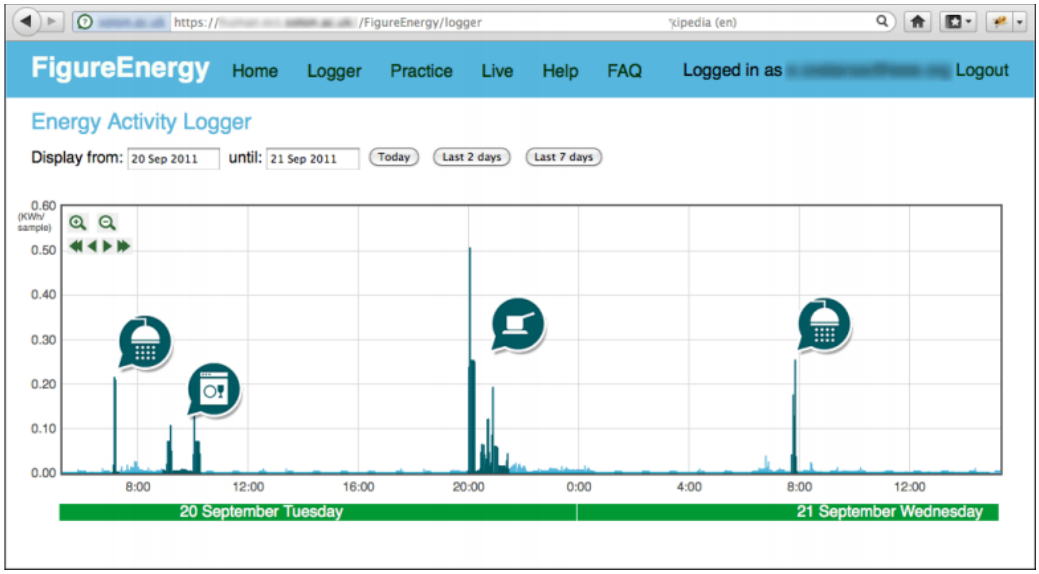


Figure 3.6 – *Visualisation temporelle du système* Figure Energy *[34]. Les activités de l'utilisateur sont annotées à l'aide de pictogrammes sur la courbe de puissance instantanée du logement.*

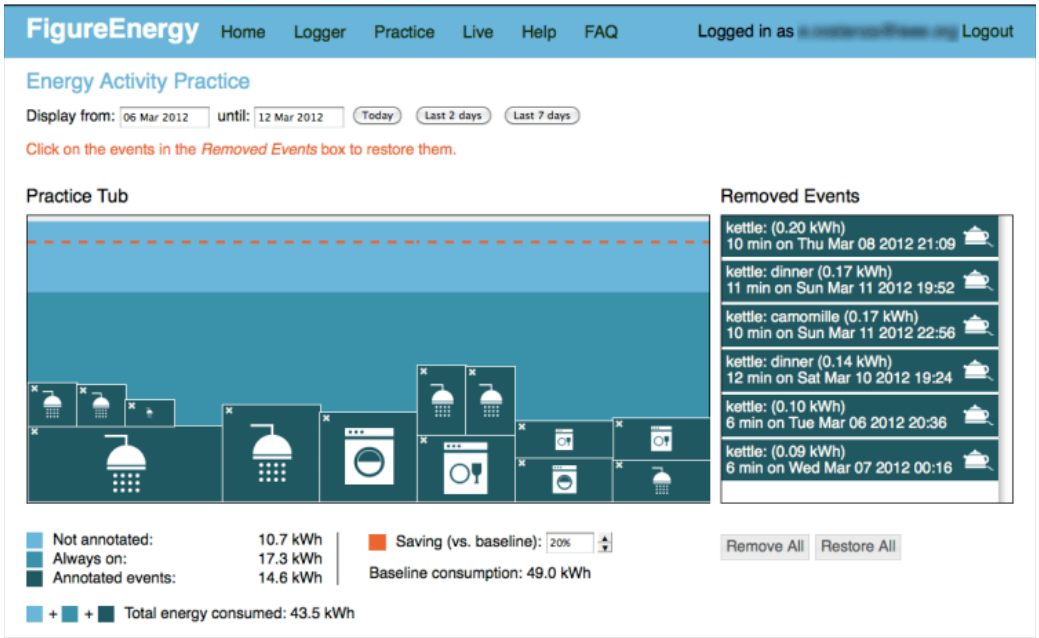


Figure 3.7 – *Méthode* what if *du système* Figure Energy *[34]. Les consommations d'énergie des différentes activités de l'utilisateur sont représentées par une métaphore de liquide. Celles-ci peuvent être supprimées, auquel cas le niveau du liquide diminue.*

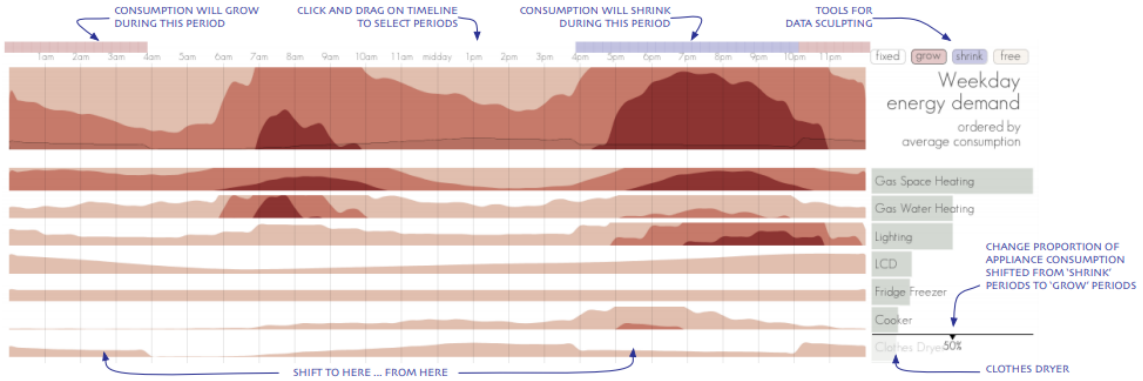


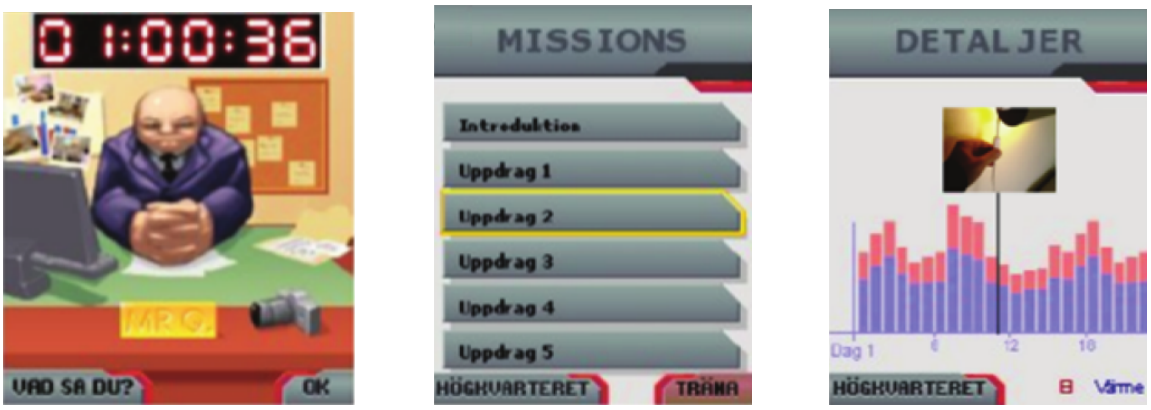
Figure 3.8 – *Visualisation de la consommation de plusieurs appareils tirée de* Demand Horizons *[62]. Ce prototype permet aux analystes d'énergie d'appliquer des scénarios de type* what if *en modifiant les données brutes de consommation des appareils d'un logement.*

les requis spécifiques à la visualisation de consommation d'énergie.

Costanza *et al.* [34] ont présenté *Figure Energy*, un système basé sur la visualisation de consommation d'électricité domestique. Ce travail est le plus proche du notre, car il est basé sur la représentation explicite et la manipulation directe des actions des utilisateurs. Les auteurs fournissent aux utilisateurs un moyen d'interagir avec leur consommation en annotant leurs activités sur une visualisation temporelle (Figure 3.6). De manière similaire à notre méthode, ce système donne la possibilité de manipuler directement les activités des utilisateurs en appliquant une méthode *what if* (Figure 3.7). Cependant nous pouvons noter deux différences importantes. Tout d'abord, les activités de l'utilisateur doivent être sélectionnées manuellement dans le système, tandis que nous fournissons des critères de sélection temporels permettant de sélectionner plusieurs utilisations au cours du temps. La seconde différence importante concerne les modifications d'utilisations des appareils effectués par la méthode *what if*. En effet, dans *Figure Energy* ces dernières sont effectuées dans une vue différente de la visualisation temporelle qui n'inclut pas d'aspects temporels. De plus elles sont limitées à la suppression d'activités. Contrairement à *Figure Energy*, notre méthode de *what if* permet des modifications d'utilisations plus complexes qui se répercutent sur la visualisation temporelle. Il est par exemple possible de modifier le programme du lave-linge ou de réduire l'utilisation de la télévision. *Figure Energy* a été évalué en étant déployé dans des logements d'utilisateurs, montrant qu'offrir la possibilité d'interagir avec les utilisations des appareils est efficace. Toutefois les utilisateurs ont peu compris la visualisation spécifiquement utilisée pour le *what if*. Celle-ci est une métaphore d'une piscine remplie avec les consommations d'énergie des différentes activités. Par conséquent la méthode *what if* a été peu utilisée durant l'expérimentation et n'a donc pas pu être évaluée spécifiquement.

Figure 3.9 – *Capture d'écran du jeu persuasif* Power House *[68]. Ce jeu sérieux a pour objectif d'apprendre aux adolescents la consommation d'énergie d'activités quotidiennes. Le joueur contrôle des personnages fictifs dont chaque activité consomme une certaine quantité d'énergie.*

Goodwin *et al.* [62] ont étudié la conception participative dans le cadre des *smart grids*. Le but de ce type de conception est d'intégrer les utilisateurs finaux afin qu'ils puissent proposer des requis et des solutions. La contribution qui nous intéresse dans ce travail est le prototype *Demand Horizons* (Figure 3.8), un des prototypes créés grâce à cette méthode. Tout comme notre système, celui-ci implémente une méthode *what if* qui permet de modifier la consommation des appareils d'un logement. *Demand Horizons* permet de diminuer les pics de consommation, de réduire arbitrairement la consommation et de déplacer des utilisations. Ces modifications sont faites directement sur la visualisation temporelle, qui est une adaptation de *Horizon graph* [118]. Les expérimentations effectuées avec les utilisateurs ont donné des résultats prometteurs. Toutefois, ce système présente de grandes différences par rapport au notre. Tout d'abord, il a été conçu pour des analystes d'énergie experts, qui ont l'habitude d'analyser les courbes de charge des logements afin de prévoir la demande de consommation d'énergie (voir 1.1.4). Son adaptation tel quel dans un contexte personnel semble donc difficile. Ensuite, la méthode de *what if* implémentée permet d'effectuer des modifications directement sur les données de consommation brutes des appareils. En comparaison, notre système permet de modifier les utilisations des appareils à un niveau d'abstraction mieux susceptible de correspondre au modèle mental de l'utilisateur, les données de consommation étant mises à jour par la suite. Enfin, les modifications proposées ciblent les préoccupations principales des fournisseurs d'énergie, qui sont les pics de consommation, tandis que nous ciblons la diminution de la consommation totale d'énergie du logement.



(a) **(b)** **(c)**

Figure 3.10 – *Captures d'écran du jeu pervasif* Power Agent *[68]. Ce jeu sérieux, basé sur la consommation réelle du logement donne des objectifs à remplir sous forme d'économies d'énergie quotidiennes.* **(a)** *Briefing quotidien avec un agent virtuel.* **(b)** *Choix d'un objectif quotidien à atteindre.* **(c)** *Visualisation de la consommation au cours du temps.*

Le domaine de l'*eco-feedback* comporte plusieurs jeux sérieux dont le but est d'apprendre la consommation d'énergie et transmettre des comportements vertueux. Bang *et al.* [14] ont ainsi présenté *Power House* (Figure 3.9), un jeu persuasif présenté sous forme de monde simulé. Le joueur contrôle des personnages évoluant dans un logement virtuel, qui peuvent prendre part à différentes activités. Ces activités consomment de l'énergie et le joueur obtient un retour sur la consommation de chaque activité, ainsi que sur la consommation totale du logement. Le jeu est conçu de sorte que les adolescents apprennent la consommation des différentes activités, ainsi que des moyens permettant de la réduire. Similairement Gustafsson *et al.* [68] ont développé *Power Agent* (Figure 3.10), un jeu pervasif sur téléphone mobile. A la différence de *Power House*, celui-ci est basé sur la consommation réelle du logement. Dans ce jeu, les participants sont des agents ayant pour mission la réduction de la consommation d'énergie. Chaque jour il leur est attribué un nouvel objectif d'économie par un responsable virtuel, par exemple la réduction de l'énergie consommée pour le chauffage. Si cet objectif est rempli à la fin de la journée ils obtiennent une récompense. Ces objectifs ont pour but de faire trouver aux participants des actes concrets permettant de diminuer la consommation. Bien que ces deux jeux ne soient pas basés sur la visualisation temporelle de la consommation, ils sont comparables à notre approche car ils ciblent explicitement l'apprentissage et la découverte d'actions concrètes permettant de réduire la consommation. Nous pouvons également comparer notre approche à un jeu sérieux, car elle permet à l'utilisateur d'interagir avec son comportement afin de trouver les modifications qui lui rapportent le plus d'économies et qui réclament une quantité d'efforts réduite.

Spagnolli *et al.* [122] ont présenté *Energy Life*, une application mobile permettant de

suivre la consommation d'un logement ainsi que celle de 8 appareils individuels. Comme pour le système que nous proposons, la conception de cette application est basée sur l'analyse des requis extraits de la littérature *eco-feedback*. En particulier les technologies *eco-feedback* doivent être motivantes pour qu'elles soient effectivement utilisées. L'application permet d'obtenir la puissance instantanée des appareils et du logement ainsi que de visualiser l'historique de la consommation au cours du temps. Elle fournit également des conseils personnalisés basés sur la consommation réelle du logement. Par exemple si la télévision reste longtemps allumée, l'application pourra proposer de l'éteindre. *Energy Life* possède également un côté ludique qui la rend similaire aux jeux sérieux précédemment présentés. Les économies réalisés permettent en effet de gagner des points. Des fonctionnalités supplémentaires, telles que la comparaison avec d'autres logements, sont débloquées une fois un certain nombre de points acquis. Tout comme les jeux sérieux *Power House* et *Power agent*, cette application ne propose pas d'analyse poussée de la consommation mais se base plutôt sur son côté ludique pour permettre aux participants de réduire leur consommation.

3.6 Conclusion

Nous avons présenté dans cette section les travaux relatifs à l'*eco-feedback*, et en particulier ceux concernant les technologies de visualisation de la consommation électrique. Dans la majorité de ces études un système *eco-feedback* est installé dans des logements personnels. Ces expérimentations ont pour but d'étudier l'évolution de la consommation des logements et / ou le comportement des utilisateurs lorsqu'ils utilisent un tel système. Les résultats sont prometteurs puisque les participants apprennent leur comportement et ses liens avec la consommation de leur logement, ce qui induit des économies d'énergie non négligeables. Toutefois comme nous l'avons vu ces études prennent peu en compte la conception de ces technologies, et en particulier l'interaction est souvent limitée. De plus il ressort que les participants éprouvent presque toujours des difficultés pour trouver des changements de comportement concrets leur permettant d'économiser.

Certains travaux que nous avons présenté dans la dernière partie sont basés sur la conception d'un système offrant des moyens d'interaction plus poussés aux utilisateurs. Ces travaux ne ciblent pas nécessairement l'étude des économies réalisées ni du comportement en soi mais plutôt l'interaction avec le système. Aussi ces travaux étudient l'utilisation des différents composants du système. Dans cette thèse nous nous situons dans la lignée de ces travaux, car nous proposons une méthode d'interaction pour l'*eco-feedback*. Nos contributions sont donc basées sur la conception de cette méthode, celle du système qui l'implémente ainsi que leur évaluation.

Notre méthode est basée sur le paradigme *what if* et cible la limitation principale de l'*eco-feedback*, qui est la difficulté pour les utilisateurs de trouver des modifications concrètes dans l'utilisation de leurs appareils qui leur permettent de consommer moins

d'énergie. A notre connaissance celui-ci n'a été appliqué qu'une fois auparavant au domaine de l'*eco-feedback*, par Costanza *et al.* [34]. Toutefois ce paradigme *what if* n'était pas la principale cible de l'évaluation et a été peu utilisé car mal compris par les utilisateurs. Nous ne prenons pas en compte la méthode *what if* de Goodwin *et al.* [62] car elle est conçue pour des analystes professionnels. Afin de concevoir le système *Activelec* qui implémente note méthode *what if* nous nous basons sur les règles de conception présentées dans cette partie. Toutefois nous ne réutilisons pas l'ensemble des fonctionnalités possibles, par exemple les comparaisons de groupe, car nous nous focalisons sur notre méthode *what if*. Notre but principal est en effet d'étudier l'application de cette méthode à l'*eco-feedback* dans un contexte personnel.

Deuxième partie

Contributions

Chapitre 4

Activelec : un système appliquant le *what if* à l'*eco-feedback*

Ce chapitre présente le système *Activelec*, dont le raisonnement de conception et l'implémentation constituent la première contribution de la thèse. Ce système de visualisation, dont l'interaction est basée sur un paradigme *what if*, permet d'appliquer des scénarios de modifications d'utilisations d'appareils électriques, puis d'évaluer l'impact de ces modifications sur la consommation d'énergie. Afin d'implémenter ce paradigme d'interaction nous définissons un modèle de données qui associe les appareils électriques à des états au cours du temps, et qui permet de lier leur utilisation à leur consommation. La première section de ce chapitre (4.1) présente le raisonnement menant à la conception de *Activelec*, en particulier la définition du modèle de données et la prise en compte des règles de conception des systèmes *eco-feedback* présentées dans le Chapitre 3.

La seconde section de ce chapitre (4.2) présente la conception et l'implémentation du système *Activelec*. La conception d'un système de visualisation personnelle est un réel challenge (voir 2.3.2). Un tel système doit en effet être accessible aux utilisateurs qui n'ont pas d'expérience en visualisation et peu de connaissances dans le domaine concerné. En particulier dans notre cas, nous ne pouvons pas attendre de connaissances dans le domaine de la consommation d'électricité de la part des utilisateurs. De plus, comme énoncé dans le Chapitre 3, les choix de conception d'un système *eco-feedback* ont une grande importance sur son efficacité. Beaucoup de paramètres doivent être pris en compte et chaque choix de conception est crucial, depuis la récolte et le traitement des données jusqu'à la visualisation et l'interaction.

La conception du système ainsi que son implémentation qui sont décrits dans ce chapitre constituent une contribution de la thèse. Premièrement, il permet de démontrer que la méthode, y compris le modèle de données utilisé, est applicable en pratique sur des données réelles. Dans notre cas ces données représentent la consommation d'énergie d'appareils électriques. Le développement d'*Activelec* est en outre nécessaire pour évaluer notre méthode de visualisation personnelle avec des utilisateurs et des données réelles. Deuxièmement, le système *Activelec* est un système de visualisation de consommation d'électricité implémentant des fonctionnalités de traitement des données, de visualisation et d'interaction. Il se base sur les règles de conception pour l'*eco-feedback* énoncées dans la Chapitre 3. A ce titre c'est également une contribution technique car c'est un système complet, pouvant être déployé dans des logements réels tel que nous l'avons fait au cours de la thèse (voir Chapitre 6).

4.1 Une approche *what if* pour l'*eco-feedback*

Cette première section présente le raisonnement menant à la conception de *Activelec*. Le raisonnement de conception présenté ici est basé sur les règles de conception des systèmes *eco-feedback* ainsi que les limitations des systèmes existants, présentées dans le Chapitre 3.

4.1.1 Modalités d'utilisation

Dans le contexte de l'*eco-feedback*, on recense deux types de systèmes : les systèmes ambiants et les *dashboards*. Les systèmes ambiants sont placés dans l'environnement de l'utilisateur et permettent d'obtenir spontanément des informations. Par contraste, les *dashboards* sont des systèmes sur ordinateur reposant sur des moyens de visualisation classiques. Ils permettant l'ajout d'interactions tels que l'exploration de l'historique des données. Notre méthode requiert l'attention de l'utilisateur, puisque ce dernier doit analyser ses données et appliquer des modifications dans l'utilisation de ses appareils. Ainsi nous avons choisi de concevoir le système *Activelec* sous forme de *dashboard*, ce qui est approprié pour ce type d'utilisation. Afin de faciliter son développement, son évolution et son évaluation, *Activelec* fonctionne dans un environnement de bureau. Pour résumer le contexte d'utilisation, le système est conçu afin d'être utilisé par un utilisateur qui n'est expert ni en visualisation ni dans le domaine de l'énergie, qui analyse ses propres données de consommation sur son ordinateur personnel. Nous discuterons de la possible extension de la méthode à un environnement de type mobile ou affichage ambiant en tant que perspective (voir 8.1.1).

4.1.2 Modèle de données

L'application d'une méthode de type *what if* nécessite des moyens de simulation permettant d'appliquer des scénarios sur les données. Ainsi nous définissons un modèle de données qui permet de lier les utilisations des appareils à leur consommation. Ce modèle permet aux utilisateurs d'analyser l'utilisation des appareils, de modifier des utilisations puis d'obtenir un retour sur les modifications appliquées (économies réalisées et mise à jour de la visualisation). Le modèle de données représente la consommation d'un ensemble d'appareils d'un logement ainsi que les utilisations de ces appareils. Il permet en particulier de lier l'utilisation des appareils au cours du temps à leur consommation d'énergie. Dans ce modèle, chaque appareil est associé à un jeu de données temporel qui correspond à sa puissance électrique instantanée au cours du temps. Ces données sont mesurées directement sur les appareils ou simulées lorsqu'une modification est appliquée. Afin de visualiser et manipuler les utilisations d'appareils dont la durée est parfois de seulement quelques minutes, par exemple les bouilloires, l'échantillonnage

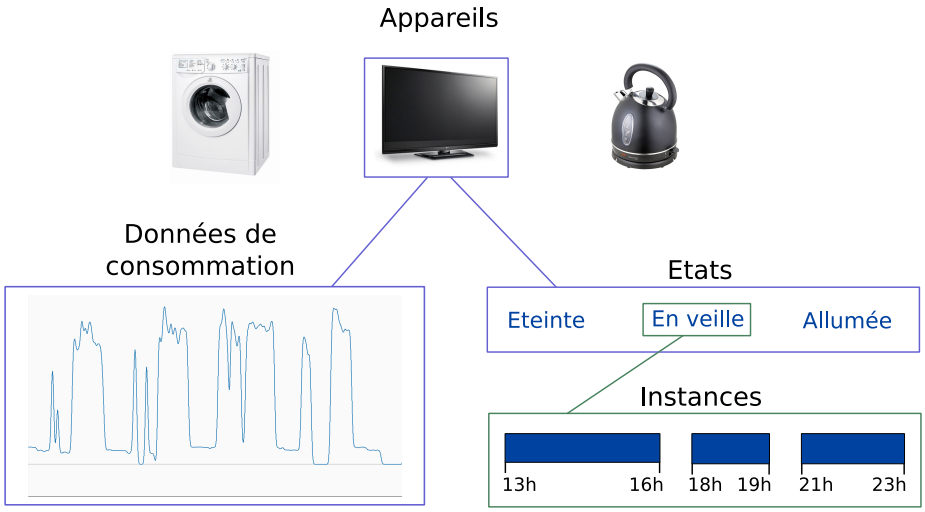
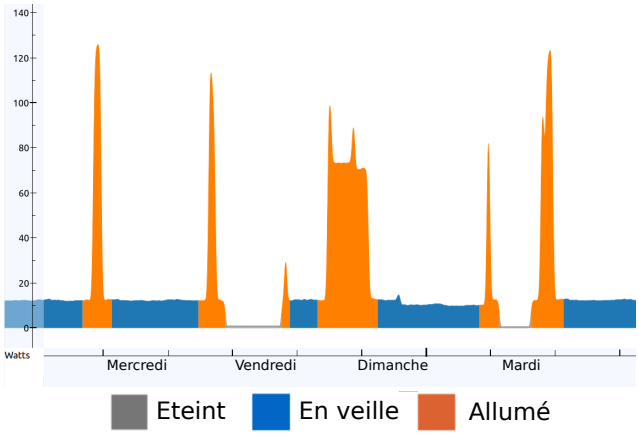


Figure 4.1 – *Modèle de données de notre méthode* what if*, décomposé en appareils, données de consommation, états et instances.*

Appareil	États
Durée modifiable	
Ordinateur	En veille Allumé
Lampe	Allumée
Durée non modifiable	
Bouilloire	Une tasse Deux tasses Pleine
Lave-vaisselle	Lavage normal Lavage écologique

(a)



(b)

Figure 4.2 – *Illustration de l'association entre appareils et états par le modèle de données.* **(a)** *Exemples d'états pour des appareils communs. Tous les appareils possèdent l'état éteint, qui n'est donc pas représenté dans ce tableau.* **(b)** *Exemple d'association des données de consommation aux instances pour un ordinateur avec trois états :* éteint, en veille *et* allumé. *Chaque état est associé à une couleur différente.*

des données doit être suffisamment précis (inférieur à la minute).

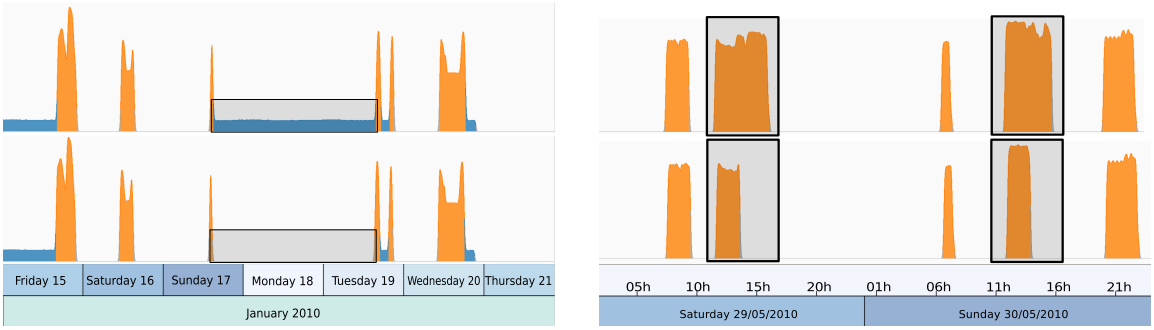
Les appareils électriques sont associés à des états au cours du temps, par exemple *allumé*, *en veille* et *éteint* pour un ordinateur. A un instant donné, l'état d'un l'appareil dépend de l'action de l'utilisateur sur cet appareil. Les états sont définis selon les différents types d'utilisation d'un appareil et sont associés aux actions de l'utilisateur sur l'appareil. L'état dans lequel se trouve l'appareil à un moment donné est lié à la consommation d'énergie de cet appareil, permettent ainsi d'établir une relation entre les données de consommation et les actions de l'utilisateur. La Figure 4.2a présente des exemples d'ensembles d'états d'appareils électriques communs. Tous les appareils possèdent l'état *éteint* ; un appareil est dit *utilisé* lorsqu'il se situe dans un état différent de *éteint*. Ainsi un ordinateur en veille est considéré *utilisé* selon notre modèle car il n'est pas éteint, même si l'utilisateur n'est pas effectivement en train de l'utiliser réellement. Nous définissons les instances des états d'un appareil comme les intervalles de temps pendant lesquels l'appareil est dans cet état. Les instances d'un appareil représentent donc l'évolution de l'état de ce dernier au cours du temps. La figure 4.1 récapitule les différents composants du modèle de données : appareils, données de consommation, états et instances. Les instances d'un appareil sont liées aux données de consommation via leurs bornes temporelles, ce qui permet d'associer à chaque instance la portion de données de consommation qui lui correspond, comme le montre la Figure 4.2b.

Un état est dit de durée modifiable si la modification de la durée de ses instances a un sens, autrement il est dit de durée non modifiable. Par exemple l'état *lavage à 30°* d'un lave linge est dit de durée non modifiable, car réduire sa durée n'est pas concrètement possible. En revanche l'état *allumé* d'une télévision est dit de durée modifiable car son arrêt à un moment arbitraire a un sens concret, qui correspond à la mise en veille ou à l'extinction de la télévision. En pratique, les instances des états de durée non modifiable sont de durée similaire pour un état donné. Par exemple, les lavages en machine utilisant un même programme de lavage ont des durées similaires.

4.1.3 L'interaction au cœur de la méthode

Durant les études précédemment menées sur l'*eco-feedback*, les utilisateurs éprouvent souvent des difficultés à trouver des changements de comportement concrets pour réduire leur consommation [15, 52, 125]. Le système *Activelec* est conçu pour remédier à ce problème. Plutôt que de juste visualiser les données brutes de consommation, les utilisateurs visualisent, interagissent avec leurs données et les modifient. Il est à noter que les données analysées et modifiées dans le système sont des données passées, situées préalablement à l'utilisation du système (de plusieurs mois à moins d'une minute). L'utilisation d'autres types de données, par exemple l'extrapolation à des données futures, est évoqué en tant que perspectives dans le chapitre 8.

L'interaction est basée sur une boucle, composée d'exploration, sélection, modifica-



(a) **(b)**

Figure 4.3 – *Exemples de modifications appliquées sur les données de deux appareils avec données initiales (en haut) et données modifiées (en bas). Le rectangle sombre montre la sélection modifiée.* **(a)** *Ordinateur allumé (orange) ou en veille (bleu). L'instance de veille dont la durée dépasse une journée (en haut) est supprimée (en bas).* **(b)** *Télévision avec un état allumée (orange). Les deux instances ayant lieu l'après-midi (en haut) sont limitées à une durée de deux heures (en bas).*

tion et évaluation. Tout d'abord, les utilisateurs explorent leurs données en visualisant l'utilisation de leurs appareils liée à leur consommation. Ensuite, ils sélectionnent des actions sur les appareils soit directement, soit par la définition de critères temporels portant sur les propriétés des actions. La phase de sélection peut également être vue comme une extension de l'exploration car elle permet d'obtenir des informations sur les utilisations des appareils. La sélection est suivie d'une modification des actions sélectionnées, qui correspond à un scénario de changement de comportement. Une fois la modification appliquée, la visualisation est mise à jour pour permettre aux utilisateurs d'évaluer l'impact de leur scénario sur la consommation. L'économie totale réalisée est également affichée. Cette boucle d'interaction motive les utilisateurs à s'engager dans leurs données en manipulant des actions concrètes sur les appareils, par exemple des lavages écologiques et des lavages standards pour un lave-vaisselle.

En se basant sur des appareils communs, nous donnons 4 exemples qui illustrent l'interaction entre les utilisateurs et le système. Cette interaction conduit à des modifications concrètes dans l'utilisation de leurs appareils, et de manière générale une meilleure compréhension de la relation entre utilisation des appareils et consommation d'énergie :

- Soit un ordinateur à trois états, *éteint*, *en veille* et *allumé*. L'état *en veille* consomme approximativement deux fois moins d'énergie que l'état *allumé*. Supposons que les occupants du logement laissent habituellement l'ordinateur en veille pendant la journée pour pouvoir l'utiliser instantanément, et que celui-ci est éteint la nuit ou quand il n'y a personne à la maison. Cependant, comme visible sur la Figure 4.3a, l'ordinateur est parfois laissé en veille pendant un ou deux jours en-

tiers. En utilisant *Activelec*, les utilisateurs peuvent évaluer l'énergie économisée si l'ordinateur est éteint lorsque la veille dépasse une certaine durée. Pour cela, ils peuvent sélectionner les instances de veille qui dépassent une certaine durée, par exemple deux heures. Ensuite les états de ces instances peuvent être changés à *éteint*, puis les utilisateurs obtiennent un retour sur les économies réalisées.

- Soit une télévision à deux états, *éteinte* et *allumée*, si on suppose qu'elle n'est jamais mise en veille. Pendant la journée, les occupants du logement regardent la télévision pendant la soirée après être rentrés chez eux. Cependant durant le week-end la télévision reste allumée pendant l'après-midi, et reste dans cet état sans être regardée. Ce comportement peut être vu sur la Figure 4.3b. En le visualisant avec *Activelec*, les utilisateurs peuvent non seulement en être conscients, mais ils peuvent aussi évaluer quelles seraient les économies si la télévision était éteinte. Pour cela, toutes les instances de l'état *allumée* peuvent être sélectionnées et leur durée limitée, par exemple à deux heures.

- Les lumières font souvent partie des appareils les moins consommateurs du logement, surtout s'il s'agit d'ampoules basse consommation. Les utilisateurs peuvent le remarquer grâce à notre système, et en particulier grâce au mode *appareils* qui permet de comparer les consommations des différents appareils du logement. Ainsi il peut être plus utile de se concentrer sur des appareils plus consommateurs pour trouver de meilleurs changements de comportement. Suivant le type de lumière et son utilisation, il n'y a peut-être que peu d'énergie en jeu, et l'effort n'est alors pas rentable.

- Au contraire, le four est un des appareils les plus consommateurs d'un logement s'il est utilisé régulièrement. Les utilisateurs peuvent le remarquer en analysant leurs données avec *Activelec*. Cependant les utilisateurs ne veulent pas éviter l'utilisation du four car ils veulent cuisiner, même si ce dernier consomme beaucoup d'énergie. Pour cette raison ils vont placer leurs efforts pour économiser de l'énergie sur les autres appareils. *Activelec* permet ainsi de choisir sur quels appareils placer ses efforts d'économie d'énergie pour qu'ils soient rentables.

4.1.4 Avantages de l'approche *what if* pour l'*eco-feedback*

Les appareils électriques et notamment leur consommation par utilisation varient selon les logements. Cela implique qu'une modification de l'utilisation d'un appareil peut mener à des gains différents selon l'appareil et le logement. Par exemple éteindre les lumières peut mener à de faibles gains ou d'importants gains selon l'efficacité énergétique des ampoules. Les utilisateurs ont donc besoin d'informations précises sur le résultat de changements de comportements, plutôt que des conseils généraux tels que "éteindre les lumières". Une autre force de notre approche est la capacité offerte de tester de légères modifications répétées au cours du temps. Un changement donné, tel que faire bouillir

seulement la quantité d'eau nécessaire dans une bouilloire, peut sembler négligeable mais peut conduire à d'importantes économies s'il est réalisé tous les jours. En permettant aux utilisateurs de visualiser le gain accumulé au cours du temps ils deviennent conscients de la pertinence de telles modifications.

Aucun système *eco-feedback* ne convient à tous les utilisateurs. Cette constatation est expliquée par la diversité des utilisateurs selon plusieurs facteurs, comme les capacités cognitives, les comportements ou la motivation pour les économies d'énergie (voir 3.3). Dans notre cas, les modifications des utilisations d'appareils choisies par les utilisateurs dépendent de leur propre évaluation de l'effort requis pour les appliquer en réalité. Par exemple, éteindre un appareil au lieu de le laisser en veille peut demander peu d'effort pour un utilisateur donné mais un effort important pour un autre utilisateur. En un mot, l'approche *what if* permet aux utilisateurs d'estimer le ratio entre les économies et l'effort requis pour convertir leur modification en action réelle. Il peut sembler trivial d'économiser de l'énergie en réduisant l'utilisation des appareils. En pratique cette économie est très dépendante de facteurs externes qui contraignent l'utilisation des appareils du logement. Par exemple les économies réalisables sur un lave-linge dépendent du nombre et de l'âge des occupants, ainsi que de facteurs temporels tels que le jour et l'heure d'utilisation. Ces économies dépendent également de facteurs personnels tels que la motivation, qui sont souvent négligés dans le domaine de l'*eco-feedback* [100] et ne peuvent pas être connus du système. Cela soutient l'utilisation du *what if* qui permet à chacun d'analyser individuellement ces facteurs.

Le *what if* peut également contrer une autre limitation des systèmes *eco-feedback*, qui est la non-négociabilité des pratiques quotidiennes [125, 100]. En d'autres termes, certaines utilisations des appareils ne peuvent pas être supprimées en raison de contraintes externes, typiquement des contraintes sociales. Par exemple, il n'est pas concevable d'arrêter l'utilisation du lave linge car les gens veulent porter des vêtements propres. De plus, les utilisateurs se concentrent sur l'énergie qui est visible (telle que celle des lumières) et tendent à oublier les appareils les plus consommateurs tels que les réfrigérateurs. Grâce à son modèle de données que nous avons spécifiquement conçu, *Activelec* permet la modification des utilisations au lieu de leur suppression. Par exemple, les utilisateurs peuvent changer la température d'un lavage de chaud à froid, ce qui implique une économie loin d'être négligeable [50].

4.1.5 Unités de consommation électrique

L'unité utilisée pour les chiffres de consommation électrique est un aspect important de la conception d'un système *eco–feedback*. En effet les unités de consommation sont souvent jugées abstraites par les utilisateurs (voir 3.4). Or l'incompréhension des unités peut diminuer l'efficacité du système, puisque les utilisateurs n'ont alors pas de moyen de connaître les ordres de grandeur de la consommation des appareils. Les utilisateurs doivent également pouvoir comparer les consommations des différents appareils, ainsi

qu'estimer la portée des économies réalisées lors de l'application d'une modification. Pour cela, il est important de proposer à l'utilisateur une unité de consommation qui lui soit concrète. Dans *Activelec*, l'unité d'énergie électrique est utilisée pour afficher la quantité d'énergie des appareils, des instances, des sélections et de l'énergie économisée ou ajoutée par les modifications. L'utilisateur peut choisir à tout moment l'unité utilisée parmi le prix en euros, le kWh et le CO_2 émis pour la production d'électricité. Pouvoir changer facilement l'unité d'énergie, tel que conseillé par Bartram [15], permet d'établir des relations entre les unités et donc de se faire une idée des ordres de grandeur de consommation des appareils. Pour la visualisation des courbes de consommation nous utilisons le watt, une unité qui est satisfaisante pour comparer les courbes des appareils, les caractéristiques les plus intéressantes étant les variations de ces courbes au cours du temps. Pour le système *Activelec*, nous calculons le prix de l'énergie en fonction du prix au kWh indiqué par le fournisseur d'énergie, qui est constant. Nous discutons du support d'un prix variable au cours du temps, qui est utilisé par les fournisseurs d'énergie afin de décaler les pics de consommation, en tant que perspective (voir 7.2.1). Pour calculer le volume de CO_2 émis par la production d'électricité, nous utilisons la quantité moyenne émise au cours de l'année qui est fournie par le gestionnaire du réseau électrique.

La période d'agrégation est également importante pour exprimer la quantité d'énergie consommée par les appareils. Cette période peut être absolue, par exemple le dernier mois, ou fréquentielle, par exemple la quantité d'énergie par semaine. Nous choisissons de proposer à l'utilisateur deux types d'agrégation possible. Le premier est absolu et correspond à la quantité d'énergie consommée depuis le début du jeu de données. Cette agrégation permet de se représenter la quantité d'énergie totale consommée par l'appareil, et d'évaluer la portée des changements de comportement sur le long terme. Le second type d'agrégation est fréquentiel et correspond à la quantité d'énergie moyenne consommée par mois. Utiliser une période d'un mois pour l'agrégation semble raisonnable, car c'est une période souvent utilisée pour le paiement de certains services habituels. De plus les factures d'énergie sont souvent détaillées en termes de consommation par mois.

Figure 4.4 – *Interface du mode* appareils. *Cinq appareils sont affichés : un ordinateur (orange), un lave-vaisselle (vert), une lumière (bleu), une télévision (violet) et un lave-linge (rouge). Le lave-linge a été mis en surbrillance par l'utilisateur, la courbe de l'ordinateur a été cachée et le widget du lave-vaisselle a été étendu pour visualiser sa consommation. En bas à gauche de l'interface un graphique en bâtons permet de visualiser la consommation totale initiale (sans modifications) ainsi que la consommation totale actuelle (avec modifications appliquées).*

4.2 Conception du système *Activelec*

Cette seconde section présente la conception et l'implémentation du système *Activelec*, en particulier les moyens d'interaction et de visualisation fournis par le système. Nous présentons également les réalisations techniques permettant de résoudre les problèmes posés par l'application du *what if* à des données réelles.

4.2.1 Interface

Le système *Activelec* est composé de deux modes d'interaction : le mode *appareils* (Figure 4.4) qui permet d'explorer et de comparer la consommation de tous les appareils du logement, et le mode *instances* (Figure 4.5) qui se concentre sur un appareil unique et ses données. Dans les deux modes, le centre de l'interface est réservé à la visualisation des courbes de consommation des appareils, qui est décrite en détail dans la sous-section

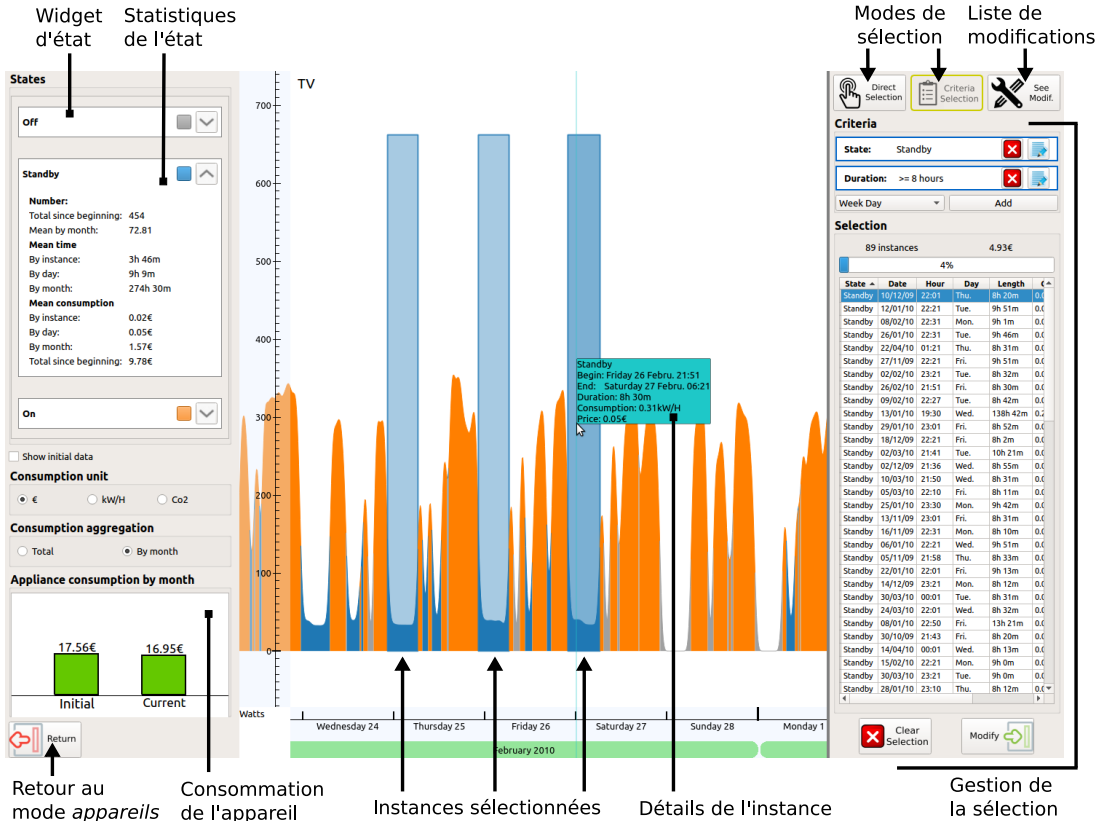


Figure 4.5 – *Interface du mode* instances. *La télévision a été choisie par l'utilisateur, dont les états sont* utilisée *(orange),* en veille *(bleu) et* éteinte *(gris). Sur la droite, nous pouvons voir que l'utilisateur a sélectionné toutes les instances de veille dont la durée dépassé 8 heures via la définition de critères.*

.

suivante. Deux sélecteurs situés sur la gauche permettent à l'utilisateur de choisir l'unité affichée pour la consommation d'énergie (voir 4.1.5). Le premier sélecteur permet de choisir l'unité parmi prix, kWh et CO_2. Le second sélecteur permet d'alterner entre les deux types d'agrégation (énergie totale et par mois).

Le mode *appareils* affiche la consommation de tous les appareils sur la même visualisation, permettant aux utilisateurs d'explorer les consommations des appareils et de les comparer. Ce mode donne aux utilisateurs un aperçu de la consommation des appareils du logement. La consommation d'énergie totale de chaque appareil ainsi que celle de l'ensemble des appareils sont visualisées à l'aide de diagrammes en bâtons, qui sont détaillés dans la sous-section suivante. Dans le mode *appareils*, la partie gauche de l'interface contient la liste des appareils disponibles. Chaque appareil est associé à un widget de cette liste affichant ses détails : nom, couleur de la courbe et énergie consommée. Ce widget contient également un bouton permettant de choisir cet appareil et de basculer en mode *instances*.

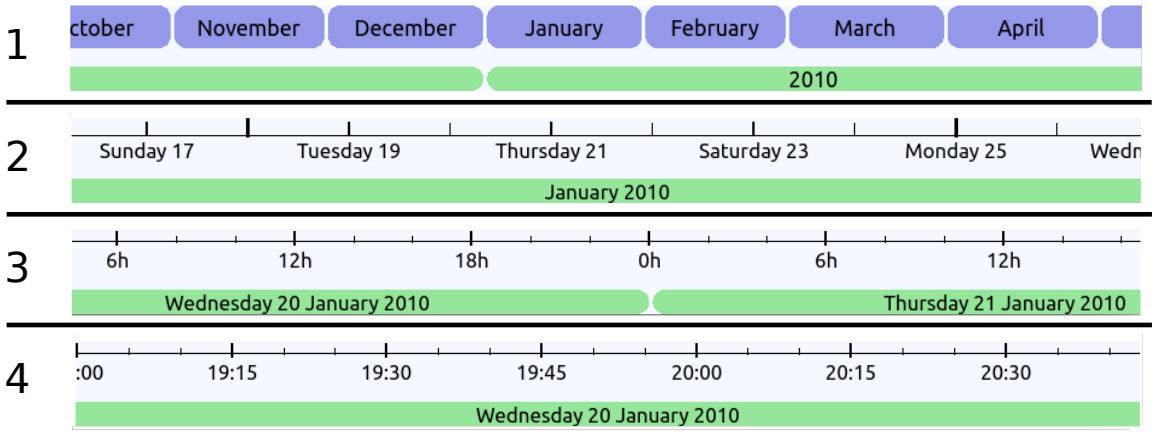


Figure 4.6 – *Évolution de l'axe du temps sur quatre niveaux de zoom. L'adaptation entre ces différents niveaux est continue.*

Le mode *instances* affiche la consommation et les utilisations d'un unique appareil et implémente le *what if*. Tout d'abord, les utilisateurs acquièrent des informations sur les utilisations de l'appareil via l'exploration et les sélections. Puis les utilisateurs peuvent tester plusieurs changements de comportement au cours du temps via le système de modifications et évaluer l'impact de ces changements sur la consommation. Dans le mode *instances*, la liste des appareils est remplacée par la liste des états de l'appareil sélectionné. Chaque état est associé à un widget affichant son nom et sa couleur. En déroulant le widget d'un état, l'utilisateur accède à ses statistiques, comme son nombre d'instances total et par mois, la durée moyenne de ses instances ou encore la consommation moyenne de l'état par instance, par jour ou par mois. Enfin la partie droite de l'interface du mode *instances* est réservée aux sélections et modifications, qui seront présentées par la suite.

4.2.2 Visualisation

Pour afficher l'évolution de la consommation au cours du temps, nous avons choisi d'utiliser des graphiques en courbes, qui sont une métaphore répandue pour les données temporelles continues. C'est en effet le type de visualisation le plus utilisé pour la visualisation de données personnelle (voir 2.3.1). Ce type de graphique est aussi adapté pour les interactions fluides telles que la translation et le zoom, qui sont disponibles pour explorer les données. L'utilisation de techniques moins répandues comme les *Braided Graphs* [76] ou les spirales [141] pourrait être attractif mais conduirait à une courbe d'apprentissage plus pentue et risquerait d'être moins bien compris par les personnes dont les capacités en visualisation (ou *visualization literacy* [19]) sont réduites. Aussi les graphiques en courbe permettent de comparer efficacement les courbes, par rapport à des courbes multiples disposées en parallèle (*small multiples*) par exemple où les courbes

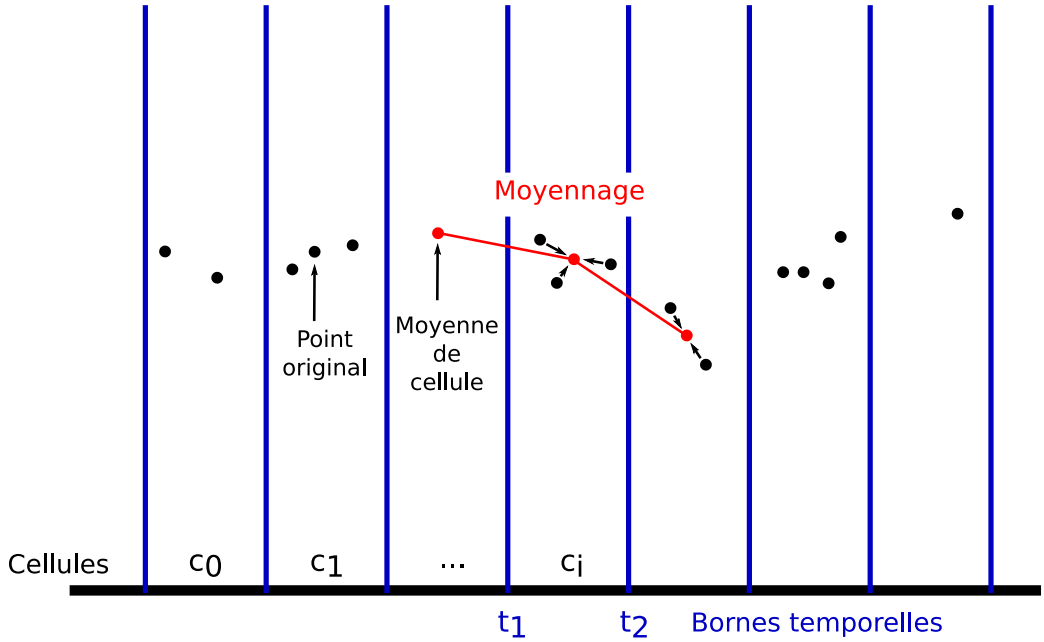


Figure 4.7 – *Algorithme de construction des diagrammes en courbes. Les cellules correspondant aux colonnes de pixels c_i sont parcourues et les points contenus dans ces cellules sont moyennés pour obtenir les points affichés.*

ne se situent pas sur la même visualisation [76]. Le risque d'encombrement visuel est réduit car le nombre d'appareils visualisés dans un logement est rarement grand. Il est de plus possible de cacher certaines courbes afin de se concentrer sur un sous-ensemble d'appareils.

Les courbes de consommation sont rendues avec une méthode inspirée de *BinX* [16], où les points sont filtrés d'une façon dépendante de l'écran : les points de la courbe se trouvant dans un même pixel sont moyennés ensemble. Ainsi contrairement à la plupart des systèmes de visualisation de consommation électrique qui agrègent les données à une échelle fixe [69], les courbes peuvent être visualisées à n'importe quel niveau de zoom et sont toujours lisses et cohérentes. Cette fonctionnalité nous semble importante, en effet Fischer [55] stipule que les systèmes *eco-feedback* permettant aux utilisateurs de choisir l'échelle de temps pour la visualisation des données sont plus efficaces, contrairement à une visualisation fixe de l'énergie consommée par jour par exemple. Afin de fournir un contexte temporel permanent à l'utilisateur, l'axe du temps s'adapte de manière continue en fonction du niveau de zoom (Figure 4.6).

Au lieu de parcourir les données et de les afficher à l'écran directement, l'algorithme de tracé de courbe parcourt les pixels en largeur et calcule la valeur du point devant être affiché pour chaque colonne de pixels. Nous définissons un histogramme contenant autant de cellules que la résolution horizontale de la visualisation, c'est à dire le nombre de colonnes de pixels. Chaque cellule de l'histogramme correspond à une colonne de pixels

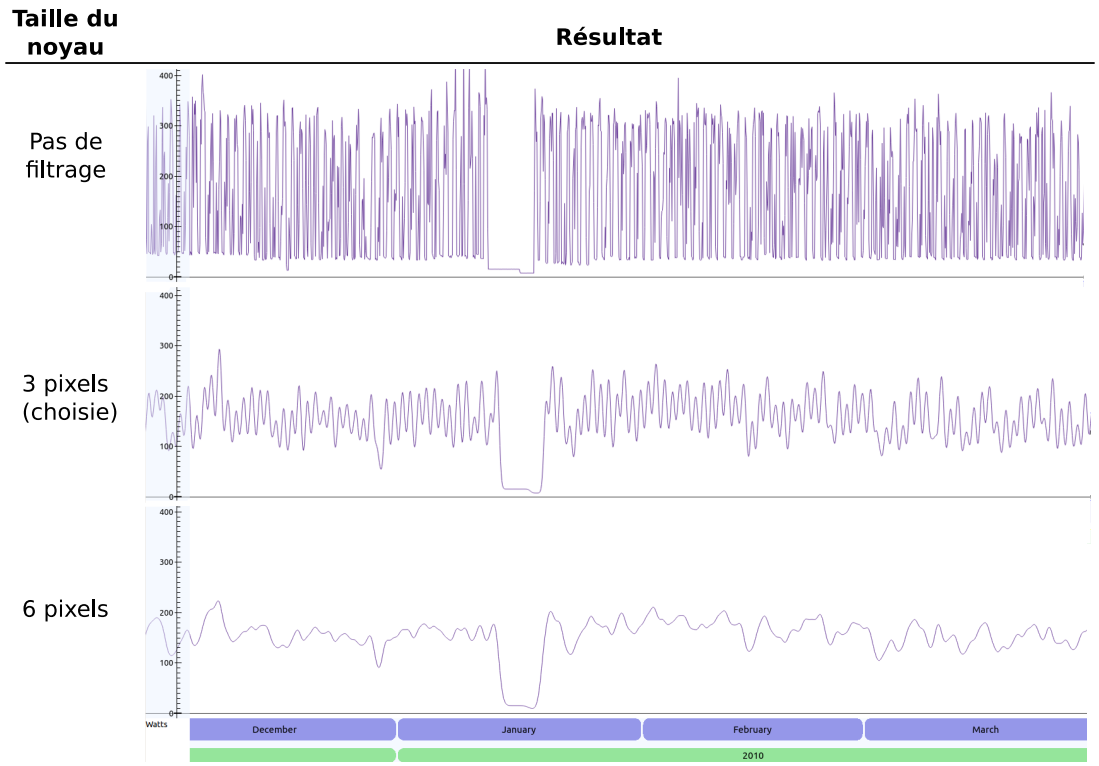


Figure 4.8 – *Influence de la taille du noyau gaussien sur le filtrage des données de consommation d'une télévision. Sans filtrage (en haut), les variations sont trop importantes et provoquent une confusion. Un filtrage trop important (en bas) peut mener à une perte d'informations, et les utilisations des appareils deviennent difficilement identifiables. Nous choisissons d'utiliser un noyau de 3 pixels (au mileu), qui permet un bon compromis.*

à l'écran. Soient t_1 et t_2 les temps de début et de fin d'une cellule c_i de l'histogramme dans la visualisation. Afin de déterminer la valeur du point à afficher en c_i, nous moyennons l'ensemble des points du jeu de données dont le temps est compris entre les bornes temporelles t_1 et t_2. Cette méthode est illustrée par la Figure 4.7. Cet algorithme peut être accéléré par l'utilisation d'un jeu de données dont l'échantillonnage est régulier, car les indices des points situés entre les deux bornes des cellules de l'histogramme sont alors facilement calculables. Afin de filtrer les courbes affichées, nous convoluons les valeurs de l'histogramme ainsi calculé en utilisant un noyau gaussien. La Figure 4.8 montre le filtrage appliqué avec différentes tailles de noyau. Si les petites valeurs de noyaux peuvent provoquer une confusion visuelle en raison des variations rapides de la puissance électrique, les grandes valeurs entraînent un lissage important et peuvent donc limiter l'information transmise par la courbe. En particulier les débuts et fins des utilisations des appareils peuvent alors devenir difficiles à identifier. Ainsi en pratique nous utilisons une taille de trois pixels pour le noyau gaussien, qui se trouve être un bon compromis. Cette valeur est facilement modifiable dans le système.

Figure 4.9 – *Affichage des données initiales d'une télévision (en haut) en plus des données modifiées (en bas) pour comparaison.*

En mode *appareils*, les courbes de consommation de tous les appareils sont affichées sur le même graphique afin d'être comparées facilement. L'utilisateur peut masquer certaines courbes afin de ne comparer qu'un sous-ensemble des appareils. Par défaut les surfaces des courbes ne sont pas remplies afin d'éviter de surcharger la visualisation. Il est toutefois possible de remplir la surface sous la courbe d'un appareil en cliquant sur son widget dans la liste des appareils. Colorer la surface de la courbe permet de mieux apprécier son aire, qui correspond à la quantité d'énergie consommée par l'appareil correspondant. En mode *instances*, la courbe de l'appareil est colorée en fonction de ses instances. Plus précisément, la partie sous la courbe est remplie avec la couleur de l'état actuel le long de la courbe. Cette coloration, comparable à celle de Li *et al.* [85] pour les activités physiques, permet de mieux comprendre les liens entre l'utilisation de l'appareil et sa consommation. En utilisant cette représentation, les utilisateurs peuvent visualiser la consommation avec leurs actions sur les appareils. Ainsi l'évolution de l'état au cours du temps est représenté dans la visualisation par l'évolution de la couleur le long de la courbe, tandis que la puissance électrique instantanée est représentée par la courbe elle-même. Une échelle de couleurs multiples obtenue à partir de *ColorBrewer* [20] est utilisée pour associer des couleurs aux appareils et états. Il est possible pour les utilisateurs d'obtenir des informations détaillées sur les instances en plaçant le curseur sur celles-ci, tel que montré sur la Figure 4.5. Une description de l'instance est alors affichée, comprenant notamment son état, ses temps de début et de fin et la quantité d'énergie consommée par cette instance. Dans le mode *instances*, la courbe affichée est celle des données actuelles de l'appareil, c'est à dire les données sur lesquelles les modifications

Critère	Choix possibles	Exemple
État	• Parmi l'ensemble d'états de l'appareil	• *en veille* pour un appareil avec {*éteint, en veille, allumé*}
Jour de la semaine	• Parmi {lundi, mardi, mercredi, jeudi, vendredi, samedi, dimanche}	• samedi et dimanche
Heure de la journée	• Avant une certaine heure • Après une certaine heure • Entre deux heures différentes	• Avant 15h • Après 22h • Entre 23h et 8h
Durée	• Plus courte qu'une certaine durée • Plus longue qu'une certaine durée • Entre deux durées différentes	• Plus courte que 30 minutes • Plus longue qu'une journée • Entre 5 heures et une journée
Fréquence	• Une instance sur un nombre donné	• Une instance sur trois

Figure 4.10 – *Critères de sélection disponibles pour la sélection des instances par critères.*

sont appliquées. Il est possible de visualiser les données initiales de l'appareil (c'est à dire non modifiées), qui sont alors affichées au dessus des données actuelles. Cette double visualisation permet de comparer l'effet des modifications appliquées sur les utilisations et sur la consommation de l'appareil (Figure 4.9).

Afin de visualiser la consommation totale d'énergie de chaque appareil et également de l'ensemble des appareils nous utilisons des diagrammes en bâtons. Ces diagrammes possèdent toujours deux bâtons : le premier correspond aux données initiales (non modifiées) et le second aux données actuelles (modifiées). Ces diagrammes permettent donc à l'utilisateur de visualiser l'impact de ses modifications sur la consommation totale. Il est possible de visualiser le diagramme en bâtons de la consommation de chaque appareil en étendant son widget. L'utilisateur peut alors comparer les consommations de plusieurs appareils en déroulant leurs widgets associés. Dans le mode *appareils*, un diagramme en bâtons correspondant à la consommation globale est affiché en bas à gauche de l'interface. En mode *instances*, ce diagramme est remplacé par celui associé à la consommation de l'appareil sélectionné. Ces diagrammes sont visibles sur les Figures 4.4 et 4.5.

4.2.3 Sélections

En mode *instances*, les instances peuvent être sélectionnées en cliquant directement sur la courbe, ou en définissant des critères sur leurs propriétés. Les sélections ont trois principaux avantages. Premièrement, elles permettent à l'utilisateur d'obtenir des informations sur les instances sélectionnées. Par exemple l'utilisateur peut vérifier si les consommations ou les durées de lavages en machine sont similaires. Deuxièmement, les

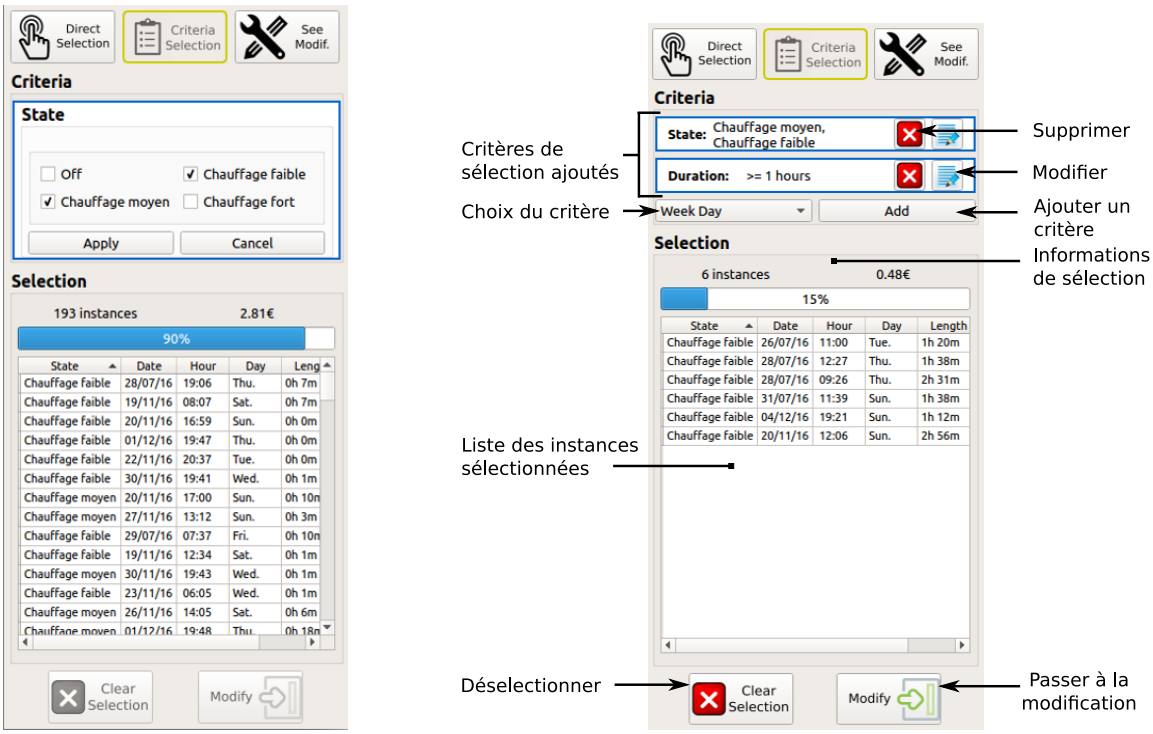


Figure 4.11 – *Panneau de sélection par critères.* **(a)** *Application d'un critère de sélection : choix de l'état. Ici toutes les instances des états* Chauffage faible *et* Chauffage moyen *d'une plaque électrique sont sélectionnées.* **(b)** *Panneau de sélection avec deux critères ajoutés. Le premier sélectionne les instances ayant pour état* Chauffage faible *ou* Chauffage moyen*, le second sélectionne parmi ces instances celles dont la durée est supérieure à une heure.*

sélections permettent aux utilisateurs de voir les parties de la courbe de consommation d'un appareil qui sont associées aux instances sélectionnées. Ceci afin de lier plus facilement l'utilisation d'un appareil et sa consommation. Enfin et surtout, définir une sélection d'instances permet d'appliquer une modification sur ces instances.

La première manière de créer une sélection est de le faire directement sur la visualisation en cliquant sur les instances. Cliquer sur une instance non sélectionnée permet de l'ajouter, tandis qu'un clic sur une instance déjà sélectionnée la retire de la sélection. Cette interaction permet aux utilisateurs de sélectionner des instances particulières qui ne pourraient pas être sélectionnées avec des critères temporels. En effet les utilisateurs peuvent vouloir sélectionner des instances par rapport à des critères personnels, qui ne sont pas définissables en fonction des propriétés des instances. Par exemple un utilisateur pourrait vouloir éteindre la télévision laissée allumée alors qu'il est sorti de chez lui, ce qui n'est pas définissable s'il ne s'agit pas d'un comportement régulier. La sélection directe permet aussi aux utilisateurs de tester une modification sur un petit nombre

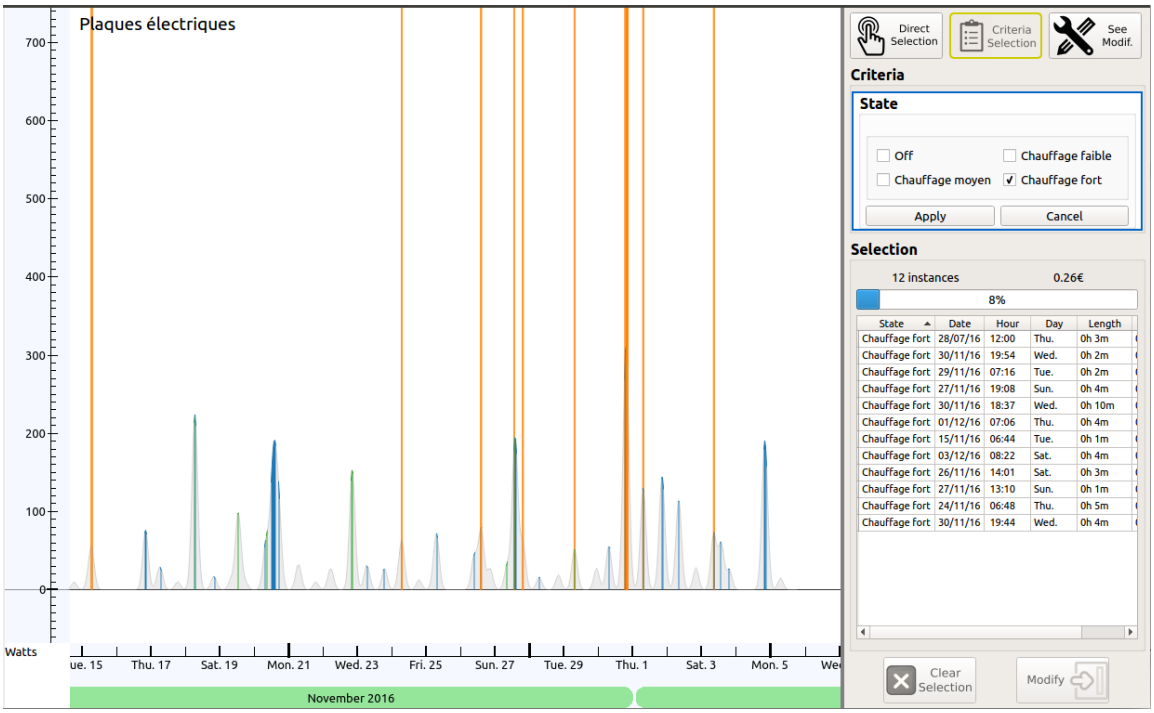


Figure 4.12 – *Affichage des instances sélectionnées sur la visualisation en temps réel. L'appareil visualisé est une plaque électrique, ayant comme états* chauffage faible*,* chauffage moyen *et* chauffage fort*. Ici l'utilisateur a sélectionné toutes les instances de l'état* chauffage fort*, qui sont alors repérables sur la visualisation grâce aux barres verticales.*

d'instances. Cette méthode est typiquement utilisée pendant la phase d'apprentissage et permet aux utilisateurs de découvrir le fonctionnement des modifications. Elle permet également d'étudier l'application d'une modification sur une instance ou un nombre réduit d'instances, par exemple pour visualiser en détail le changement de consommation entre un lavage en machine à 40° et un lavage à 30°.

La seconde façon de sélectionner des instances est de le faire via la définition de critères sur les propriétés des instances. Le système *Activelec* permet de sélectionner des instances selon leur état, durée, jour de la semaine, heure de la journée et par fréquence. Ces critères sont présentés sur la Figure 4.10. Par exemple pour un ordinateur, les utilisateurs peuvent sélectionner toutes les périodes de veille dont la durée est plus longue qu'une heure. Il est aussi possible de combiner ces critères, par exemple sélectionner seulement un lavage en machine sur trois ayant lieu en dehors du week-end. La définition de critères s'effectue par l'intermédiaire de widgets dédiés. Lorsqu'un critère est modifié, l'ensemble des instances sélectionnées est mis à jour en temps réel, et ces instances sont mises en surbrillance sur la visualisation. Ce processus de sélection est visible sur les Figures 4.11 et 4.12.

La sélection par critères étend la phase d'exploration classique puisque les utilisa-

Type de modification	**Exemple**
Modification d'état	Modification de *lavage normal* à *lavage écologique*
Limitation de durée	Limitation à 2 heures
Arrêt à une certaine heure	Arrêt à 22 heures

Figure 4.13 – *Types de modifications disponibles sur les instances sélectionnées.*

teurs peuvent explorer l'espace des critères à l'aide des widgets dédiés. Cette méthode permet des sélections rapides et des retours directs sur ces sélections, avec un ajustement progressif de l'ensemble des instances sélectionnées [7]. Grâce à la mise en valeur des instances sélectionnées dans la visualisation il est aisé pour les utilisateurs de lier les critères à l'utilisation et à la consommation de l'appareil. Ce type de sélection permet à l'utilisateur de généraliser une habitude détectée pendant la phase d'exploration, et ainsi mène à la visualisation et la modification des habitudes d'utilisation des appareils.

4.2.4 Modifications

Après la sélection des instances, l'étape suivante dans la boucle d'interaction du *what if* est leur modification. *Activelec* fournit trois types de modifications, qui sont présentées sur la Figure 4.13. La première est la modification de l'état des instances, qui est lié à la suppression de l'utilisation d'un appareil ou au changement de la manière dont il est utilisé. Par exemple il est possible de modifier les instances *faire bouillir deux tasses* d'une bouilloire en instances *faire bouillir une tasse*. Le deuxième type de modification est la limitation de la durée des instances à un certain temps. Cette modification est équivalente à éteindre un appareil lorsque son utilisation dépasse cette durée. La partie supplémentaire, c'est à dire celle située après la limite, est supprimée et remplacée par une instance de l'état *éteint*. Les utilisateurs peuvent par exemple limiter les instances de chauffage d'une plaque électrique à 30 minutes, ce qui est équivalent, en termes d'actions réelles, à éteindre cette plaque lorsqu'elle est laissée allumée par oubli. Enfin le troisième type de modification correspond à l'extinction d'un appareil après une certaine heure de la journée. Ce type de modification est similaire au deuxième type (limite de durée) car la partie des instances située au-delà de l'heure définie est supprimée et remplacée par une instance de l'état *éteint*. Cette modification permet par exemple aux utilisateurs de limiter les instances de veille d'un appareil à 23 heures, ce qui correspond en termes d'actions réelles à éteindre l'appareil le soir au lieu de le laisser en veille toute la nuit. Les deux derniers types de modification ne sont applicables qu'aux appareils à états de durée modifiable (voir 4.1.2).

Lorsqu'une modification est appliquée sur un appareil, les données de consommation de celui-ci doivent être mises à jour. Pour cela les parties correspondant aux instances modifiées sont recalculées. Actuellement, un algorithme de copie est utilisé afin d'appliquer les modifications d'état des instances. Supposons qu'une instance d'état e soit

modifiée et affectée à un nouvel état e'. Si e' est l'état éteint, les données de consommation correspondant à l'instance sont mises à 0. Sinon, si l'appareil est à états de durée modifiable, des parties d'instances de l'état e' choisies aléatoirement sont copiées afin de remplacer les données de consommation de l'instance modifiée. Par exemple, si une instance de l'état *allumé* d'un ordinateur est modifiée et associée à l'état *en veille*, des parties d'instances de l'état *en veille* existantes sont copiées afin de remplacer les données de consommation de l'instance modifiée. Si l'appareil est à états de durée non modifiable, une instance de l'état e' est choisie aléatoirement et ses données de consommation sont copiées. Nous distinguons ces appareils car copier une partie d'une instance, par exemple une partie d'un lavage en machine, n'a pas de sens concret. L'ajout d'un caractère aléatoire dans le choix des instances copiées permet d'éviter d'obtenir des données de consommation identiques. De plus cette sélection aléatoire d'instances à copier permet de minimiser l'erreur de simulation, car la différence de consommation induite par la modification est alors une moyenne obtenue à partir d'un ensemble d'instances. Pour les deux autres types de modifications qui correspondent à une limitation de durée, les données de consommation sont remplacées par la valeur 0 à partir de la limite temporelle, et ce jusqu'au début de l'instance suivante.

Une fois la modification appliquée, la visualisation est mise à jour et la liste des modifications appliquées est affichée dans la partie droite de l'interface (Figure 4.14). Pour chaque modification appliquée, un objet visuel de cette liste fournit des informations sur sa sélection, son type de modification et surtout la quantité d'énergie qu'elle permet d'économiser ou d'ajouter. Les utilisateurs peuvent appliquer autant de modifications qu'ils le souhaitent, qui sont alors ajoutées à la liste afin d'être comparées. Pour permettre la manipulation des modifications, nous appliquons le concept de réification [88]. Ce dernier signifie qu'une modification est représentée par un objet constitué d'une sélection d'instances et d'un type de modification. En plus du résumé, l'objet visuel correspondant à une modification permet de la modifier (modifier sa sélection ou son type) ou de la supprimer. Il est également possible d'annuler l'application d'une modification tout en la conservant dans la liste des modifications. La modification non appliquée peut alors être comparée avec d'éventuelles autres modifications sans interférer avec elles, et peut être ré-appliquée par la suite. Annuler l'application de la modification puis la rétablir permet également à l'utilisateur de visualiser les données qui sont modifiées sur la courbe de l'appareil. La liste de modifications est accessible à tout moment en cliquant sur le bouton correspondant. Par exemple un utilisateur peut vouloir comparer les modifications appliquées sur un appareil ou supprimer une certaine modification.

4.2.5 Extraction des instances

Une méthode d'extraction de données est nécessaire afin d'obtenir les instances des états des appareils au cours du temps. Ces instances ne peuvent être obtenues que

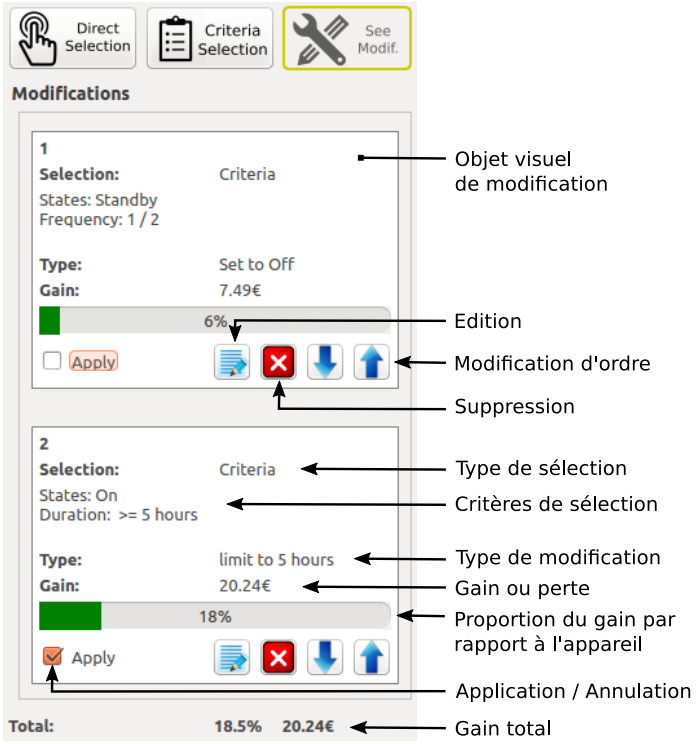


Figure 4.14 – *Liste des modifications affichée en mode* instances *lorsqu'une modification est appliquée ou que l'utilisateur clique sur le bouton correspondant. Nous pouvons remarquer que deux modifications ont été créées. La première supprime une instance de* veille (standby) *sur deux, la seconde limite la durée des instances* utilisé (on) *à cinq heures. Seule la seconde modification est appliquée.*

par une analyse de la puissance électrique au cours du temps de l'appareil. Le système doit en effet pouvoir être appliqué directement aux seules données de consommation des appareils. Nous utilisons deux algorithmes d'extraction des instances pour les appareils, selon que les états de l'appareil soient de durée modifiable ou non.

Le premier algorithme s'applique aux données des appareils à états de durées modifiables. Cet algorithme est basé sur un seuillage des données de puissance de l'appareil, chaque état de l'appareil étant associé à un seuil de puissance. Nous définissons les données de puissance instantanée d'un appareil comme un ensemble de tuples (t, p) où t correspond au temps et p à la puissance. Soit un état e d'un appareil associé à un seuil de puissance S. Les données de puissance instantanée associées aux instances de cet état sont les tuples (t, p) tels que $S < p < S_1$, où S_1 est le seuil de l'état du même appareil dont le seuil est directement supérieur à celui de e. Les temps de début et fin des instances de l'état peuvent alors être déterminés par un parcours des données de consommation. Certains appareils tels que les plaques électriques fonctionnent par pics de puissance réguliers. Les instances d'un état de chauffage à une certaine température sont alors extraites par l'algorithme uniquement lors des pics de puissance. Afin de

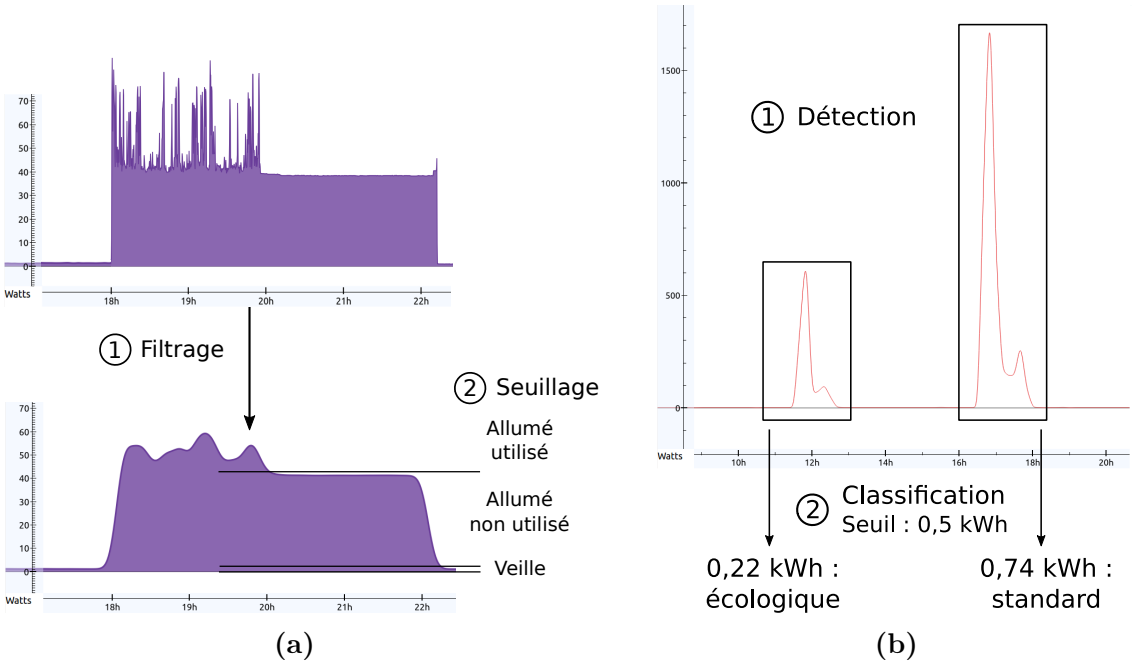


Figure 4.15 – *Algorithmes d'extraction des instances pour les deux types d'appareils (états à durée modifiable ou non).* **(a)** *Algorithme pour les appareils à états de durée modifiable, appliqué à un ordinateur possédant les états* veille, allumé non utilisé *et* allumé utilisé. **(b)** *Algorithme pour les appareils à états de durée non modifiable appliqué à un lave linge possédant comme états* éteint, lavage écologique *et* lavage standard.

corréler les instances avec l'utilisation de l'appareil par l'utilisateur, celles-ci doivent débuter lors de l'allumage de la plaque ou de son changement de température. Afin de pallier ce problème, nous filtrons les données de puissance instantanée en les convoluant avec un noyau gaussien qui permet d'obtenir une valeur de puissance lissée. Ce filtrage permet également de détecter de manière plus précise la différence entre les états de certains appareils, par exemple entre des états *allumé et utilisé* et *allumé et inutilisé* d'un ordinateur. Cet algorithme est illustré par la Figure 4.15a.

Le second algorithme d'extraction est utilisé pour les appareils à états de durée non modifiable. Cet algorithme fonctionne en deux étapes. La première étape est la détection des utilisations, qui consiste à créer des instances correspondant aux utilisations de l'appareil, sans toutefois leur attribuer un état. Par exemple tous les lavages d'un lave-linge, dont les températures sont *30°* ou *40°*, sont alors associés à des instances sans distinction de température. La deuxième étape consiste à classifier ces instances selon leur état. Chaque état est associé à un seuil de quantité d'énergie consommée et les instances dont la consommation est comprise entre ce seuil et le seuil de l'état de seuil directement supérieur lui sont attribués. Pour l'exemple du lave-linge, un seuil est défini pour l'état *lavage à 40°*, par exemple 0,5 kWh. Ainsi les lavages dont la quantité d'énergie est inférieure à 0.5 kWh sont associés à l'état *lavage à 30°* et les autres à l'état

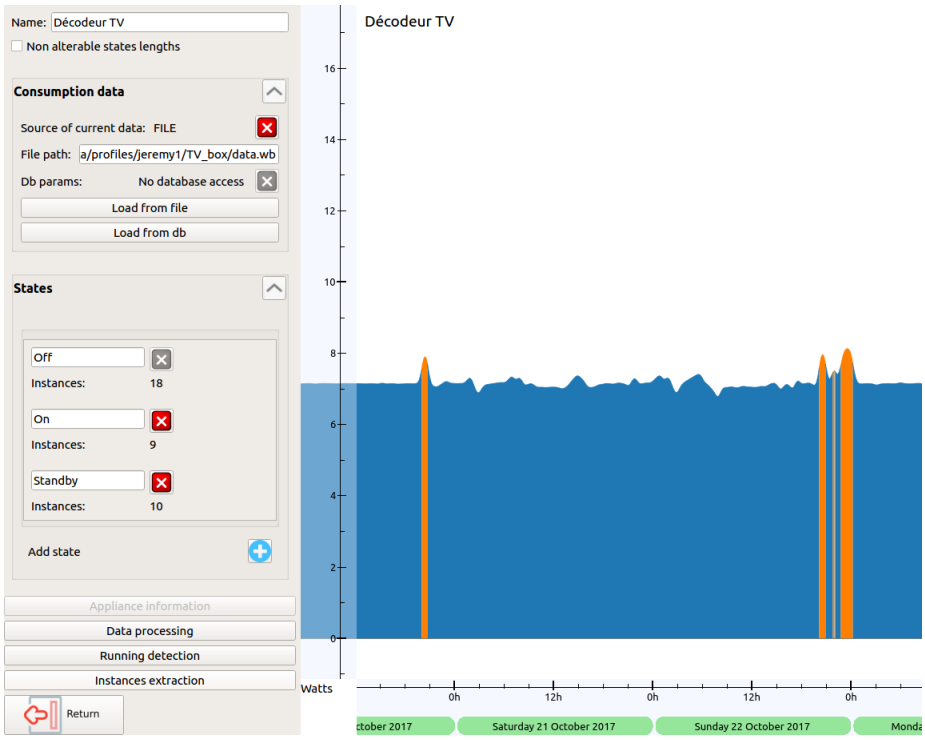


Figure 4.16 – *Outil de création et de gestion du modèle de données. Ici les données et états d'un décodeur TV ont été paramétrés et ses instances extraites.*

lavage à 40°, tel qu'illustré par la Figure 4.15b. Ces algorithmes produisent des résultats imparfaits car ils sont basés sur de simples seuils. Nous discuterons de l'utilisation d'algorithmes plus élaborés qui permettraient d'obtenir de meilleurs résultats dans le Chapitre 8. Toutefois pour les expérimentations que nous avons menées dans le cadre de cette thèse ces algorithmes produisent des résultats d'extraction suffisants, au vu de leur faible nombre d'erreurs d'extraction.

Nous avons développé un outil spécifique permettant d'analyser et de pré-traiter les données de consommation, visible sur la Figure 4.16. Cet outil graphique facilite la création et le traitement des données d'un logement :

- Création des appareils et de leurs états
- Importation de données de consommation, à partir de fichiers ou d'une base de données
- Traitement des données de consommation (échantillonnage, traitement de données manquantes...)
- Définition des paramètres d'extraction des instances

Cet outil qui peut sembler complexe n'a pas vocation à être utilisé par les utilisateurs directs de *Activelec* mais par un utilisateur habitué aux données de consommation d'énergie. Par exemple il est utilisé par les expérimentateurs dans les études que nous avons menées afin de composer les jeux de données utilisés par les participants. Fournir une méthode d'extraction ainsi qu'un outil utilisables par un utilisateur novice fait partie des perspectives de cette thèse (voir 8.1.2).

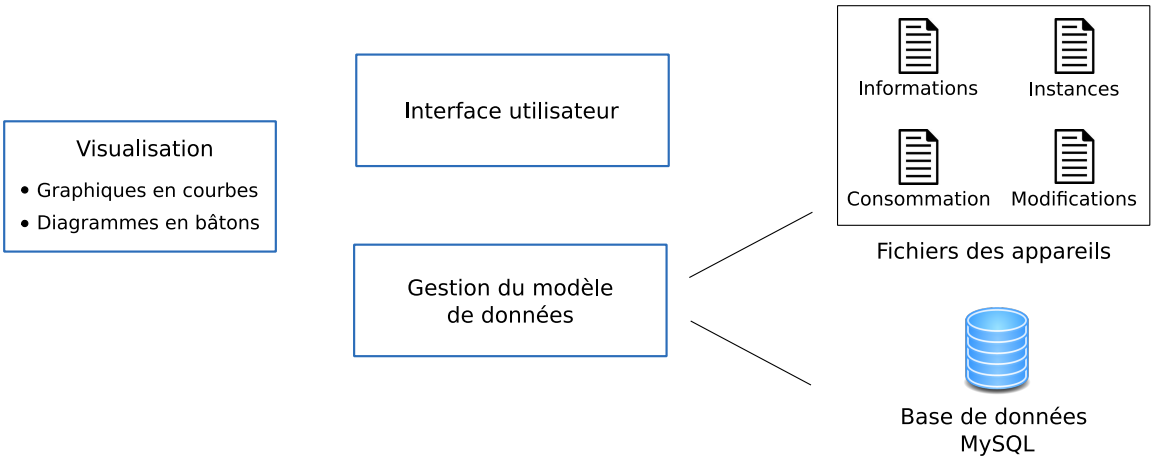


Figure 4.17 – *Architecture logicielle du système* Activelec. *Le système est principalement basé sur les modules de gestion des données et de visualisation.*

4.2.6 Implémentation

Le système *Activelec* est implémenté en *Python* et est utilisable sous *Linux*, *Windows* et *Mac*. L'interface graphique est basée sur la bibliothèque *QT*, tandis que la gestion des données est réalisée à partir de *Numpy*, une extension de *Python*. L'architecture du système *Activelec* est illustrée par la Figure 4.17. Afin d'obtenir des performances optimales un module de visualisation des courbes a été entièrement implémenté sur mesure. Les axes dynamiques et l'interaction avec les courbes sont inclus dans ce module. Un module spécifique à la gestion des données a également été développé, comprenant l'implémentation du modèle de données (appareils, états et instances), l'extraction des données et l'implémentation des sélections et modifications. Ce module gère également le stockage des données des appareils dans le format *JSON*. Chaque appareil est associé à quatre fichiers. Un premier fichier contient les informations de l'appareil (nom, états et paramètres d'extraction des instances). Les données de consommation (puissance au cours du temps) de l'appareil sont stockées dans un second fichier. Les instances de l'appareil (état, début et fin) sont stockées dans un troisième fichier. Enfin les modifications appliquées sur l'appareil par l'utilisateur sont stockées dans un quatrième fichier, afin d'être rechargées lors de l'ouverture de l'application. Le système est capable de récupérer les données de consommation des appareils directement à partir d'une base de données *MySQL*. Les instances sont alors extraites directement par le système lorsque l'utilisateur demande une mise à jour des données. Cette demande se fait par l'intermédiaire du bouton *update* visible sur la Figure 4.7. Nous prévoyons de diffuser *Activelec* et son code source de façon libre.

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les choix de conception ainsi que l'implémentation du système *Activelec*. Celui-ci implémente une méthode de visualisation personnelle basée sur un paradigme d'interaction de type *what if*, appliquée ici à des données réelles de consommation d'électricité. Grâce à l'utilisation d'un modèle de données spécifique, nous pouvons représenter l'utilisation des appareils et la lier à la consommation d'énergie de ces appareils. Cette représentation permet aux utilisateurs de visualiser non seulement la consommation des appareils mais également leur utilisation au cours du temps, permettant une meilleure analyse. Notre système est focalisé sur l'interaction avec les données. Nous fournissons des moyens de sélection des utilisations des appareils mais également de modifications de ces utilisations. Les utilisateurs peuvent alors appliquer des scénarios de type *what if* sur leur comportement et évaluer leur impact sur la consommation d'énergie.

Nous avons montré l'application en pratique de notre méthode à des données de consommation d'énergie. En particulier nous avons présenté des scénarios illustrant comment et pourquoi le système serait utile en pratique pour permettre de trouver des modifications concrètes permettant d'économiser (4.1.3). Désormais nous devons évaluer cette méthode ainsi que le système *Activelec* avec des participants, sur des données réelles de consommation d'énergie. Ces évaluations feront l'objet des prochains chapitres (5 et 6) et permettront de confirmer l'utilité de la méthode et du système pour la découverte de modifications permettant d'économiser de l'énergie.

Chapitre 5

Évaluation de l'approche *what if* et du système *Activelec* en laboratoire

Dans le chapitre précédent nous avons présenté le système *Activelec*, qui implémente une méthode de type *what if* permettant d'analyser visuellement les données d'utilisation et de consommation d'appareils électriques. Nous devons désormais évaluer notre approche *what if* et le système *Activelec* qui l'implémente auprès d'utilisateurs, en utilisant des données de consommation réelles. Ce chapitre présente deux expérimentations menées en laboratoire à ces fins. En particulier nous devons déterminer si notre système permet aux utilisateurs de trouver facilement des modifications dans l'utilisation des appareils, qui permettraient d'économiser une quantité d'énergie non négligeable. Aussi ces modifications ne doivent pas demander beaucoup d'efforts aux utilisateurs pour être appliquées en pratique. Pour cela *Activelec* devrait leur permettre d'évaluer le compromis entre la conservation du confort et les économies induites par les modifications trouvées.

Dans un premier temps nous devons tester l'utilisabilité du système *Activelec* et de la méthode basée sur le *what if*. Nous avons donc conduit une première expérimentation dans laquelle nous utilisons des données réelles, qui ne proviennent pas des participants. Cette expérimentation est présentée dans la première partie de ce chapitre (5.1). Cette première expérimentation ne permet toutefois pas d'évaluer comment le système permet aux utilisateurs d'apporter leurs connaissances personnelles sur l'utilisation de leurs appareils. Nous avons donc mené une seconde expérimentation dans laquelle les participants utilisent le système *Activelec* sur leurs propres données de consommation. Cette seconde expérimentation est présentée dans la seconde partie de ce chapitre (5.2). Enfin nous concluons sur ces deux expérimentations dans la dernière section de ce chapitre (5.3).

5.1 Étude d'utilisabilité

Nous avons conduit une première étude utilisateur afin d'évaluer l'utilisabilité d'*Activelec* et plus spécifiquement pour estimer si les utilisateurs peuvent facilement trouver des modifications utiles dans l'utilisation des appareils. Dans cette expérimentation contrôlée en laboratoire, les participants ont utilisé le même jeu de données qui provient d'appareils réels.

5.1.1 Participants

Dans cette expérimentation, nous ciblons une population qui soit capable d'utiliser des visualisations simples, de type graphiques en courbe et diagrammes en bâtons. *Activelec* étant basé sur ces visualisations, il est en effet souhaitable que les participants comprennent ce type de visualisation pour accomplir la tâche demandée. Nous ciblons également des utilisateurs motivés par les économies d'énergie. Cette restriction de population n'est pas incompatible avec l'étude d'un système *eco-feedback*. Il est en effet nécessaire de cibler des segments de population pour l'étude des systèmes *eco-feedback* [70, 80] (voir 3.3). 13 participants (11 hommes et 2 femmes) ont participé à l'étude. Les participants ont été recrutés à l'université et étaient distribués en 7 doctorants, 1 post-doctorant, 4 ingénieurs et 1 professeur.

Nous avons conduit un entretien préalable afin d'évaluer le niveau des participants en termes de visualisation et de connaissances en consommation d'énergie. Pour évaluer leur capacité en visualisation, nous demandions aux participants s'ils avaient pour habitude l'utilisation de visualisations, en particulier des graphiques en courbes et diagrammes en bâtons. Tous les participants utilisaient occasionnellement ces types de visualisations. Puis nous demandions aux participants s'ils possédaient des connaissances approfondies en visualisation ; par exemple s'ils connaissaient des visualisations moins répandues telles que *Horizon graph*. Parmi les 13 participants, seulement 2 possédaient de telles connaissances approfondies de la visualisation.

Afin d'évaluer les connaissances des participants en consommation d'énergie, trois questions leur étaient posées. Nous demandions de classer trois types d'appareils (lumière basse consommation, télévision et radiateur électrique) selon leur consommation moyenne supposée. Le classement attendu du moins consommateur au plus consommateur était lumière, télévision puis radiateur électrique. 11 participants sur 13 ont été capables de classer ces trois types d'appareils de façon correcte. Nous demandions ensuite aux participants s'ils étaient capables de différencier puissance et énergie électrique, et si oui de définir précisément ces deux entités. 7 participants ont été capables de définir précisément ces deux termes. Enfin nous demandions aux participants s'ils pouvaient estimer le prix de l'énergie consommée au mois ou à l'année de certains appareils communs, tels qu'une télévision ou une lampe. Aucun participant ne put donner

de réponse à cette question.

Comme dernière question de l'entretien préalable, nous demandions aux participants s'ils étaient motivés par l'économie d'énergie. Parmi les 13 participants, 12 étaient motivés par l'économie d'énergie. Un participant ne voulait pas économiser d'énergie et par conséquent n'a pas suivi les instructions de la tâche. Nous ne considérons donc pas ses résultats dans l'analyse de cette expérimentation car il ne correspond pas à la population ciblée. Parmi les 12 participants retenus, 2 d'entre eux ont indiqué qu'ils ne voulaient pas fournir trop d'effort pour changer leur comportement. Un participant a indiqué que les économies d'énergie ne devaient pas être réalisées au détriment du confort.

5.1.2 Composition du jeu de données

Pour la tâche de cette expérimentation nous utilisons des données réelles issues d'une expérimentation menée en Grande-Bretagne, *Household Electriciy Survey* [39]. Ces données ont été récoltées grâce à l'installation de systèmes de mesure dans des logements et représentent la puissance instantanée détaillée au niveau des appareils. Nous avons sélectionné six mois de données provenant de dix appareils électriques communs. La Figure 5.1 montre la consommation de ces appareils sur une période de un mois. Sur cette figure, les appareils sont classés selon leur consommation totale d'énergie, du plus consommateur en haut (la télévision) au moins consommateur en bas (la lumière). La Figure 5.2 présente les appareils utilisés pour cette expérimentation, les états que nous avons défini pour ces appareils ainsi que leurs statistiques de consommation et d'utilisation durant la période du jeu de données. Nous pouvons remarquer que la consommation de l'état *éteint* des appareils ne correspond pas toujours à 0%, ce qui est dû à une consommation résiduelle lorsque l'appareil est branché, et également à des imprécisions d'extraction des instances. En particulier, le grille pain consomme de l'énergie même sans être utilisé. Celui-ci étant peu utilisé, la proportion d'énergie consommée par l'état *éteint* de cet appareil est alors importante.

Nous avons volontairement choisi un jeu de données où les appareils présentent des caractéristiques intéressantes, pouvant amener à des modifications. Par exemple la télévision est l'appareil qui consomme le plus d'énergie, alors qu'elle est peu concernée par les économies d'énergie dans les travaux précédents. Au contraire la lumière qui est souvent l'objet de l'attention des utilisateurs est l'appareil le moins consommateur. Enfin la télévision, l'ordinateur et la console de jeux possèdent tous les trois des périodes de veille, mais seules celles de l'ordinateur représentent une quantité d'énergie non négligeable par rapport au total de l'appareil. Ces particularités permettent d'évaluer si les participants sont capables de trouver les appareils pertinents sur lesquels économiser. Par exemple ils devraient se concentrer d'avantage sur la télévision que sur les lumières, et supprimer d'avantage de périodes de veilles de l'ordinateur que d'autres appareils.

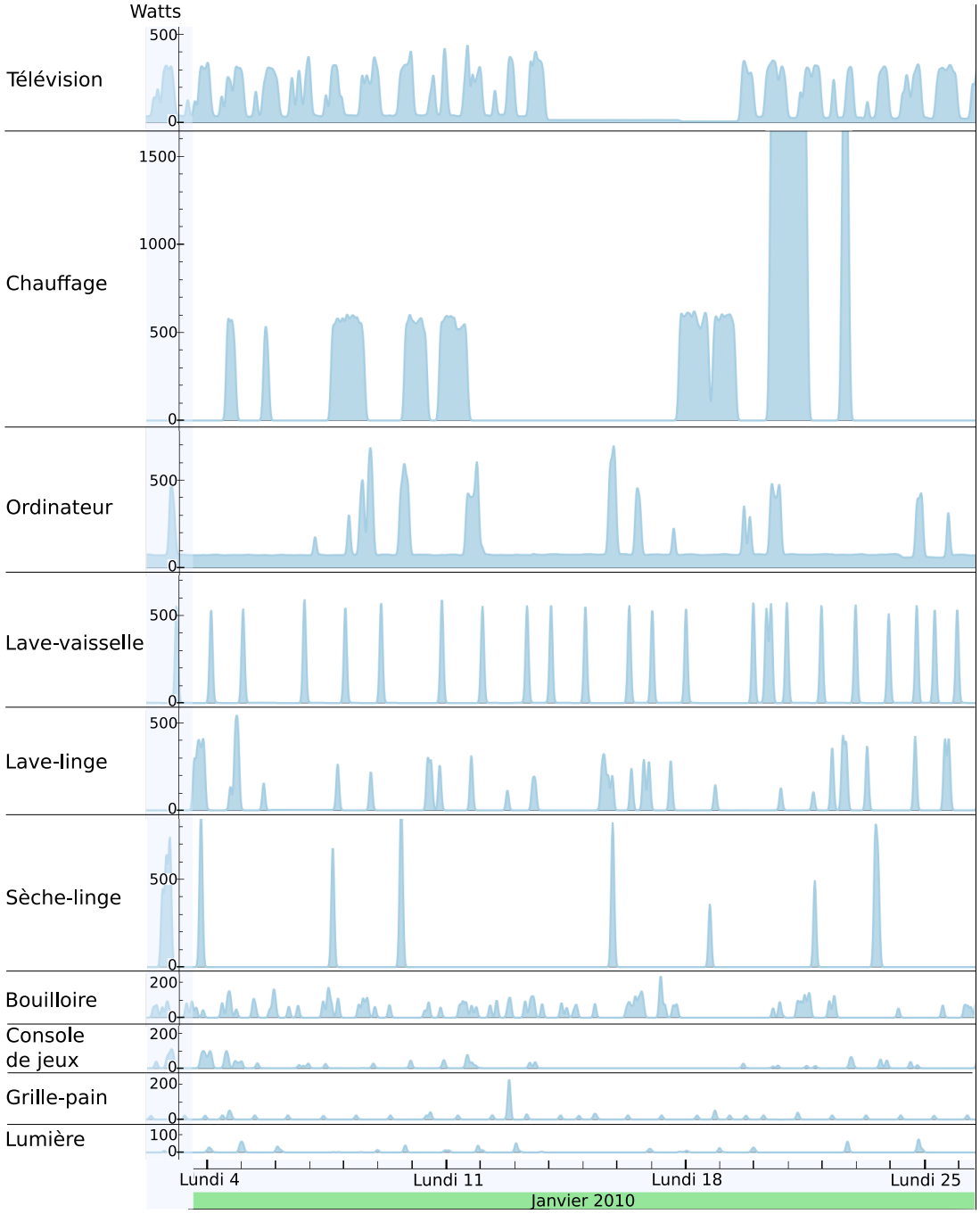


Figure 5.1 – *Évolution sur une durée de un mois de la consommation des appareils utilisés pendant la première expérimentation. Les appareils sont classés du plus consommateur (la télévision) au moins consommateur (la lumière). Les deux pics de puissance du chauffage (Jeudi 21 et Vendredi 22) ont été tronqués, leur maximum se situe aux environs de 2300 watts.*

Appareil	Coût (€)	États	Conso. rel. de l'état	Utilisation de l'état
Télévision	175.0	Allumée	81.6%	11h / jour
		En veille	11.9%	12h / jour
		Éteinte	6.5%	1h / jour
Chauffage	136.0	22°	21.0%	18min. / jour
		20°	70.0%	3h / jour
		18°	8.7%	42min. / jour
		Éteint	0.3%	20h / jour
Ordinateur	116.5	Allumé	41.3%	2h / jour
		En veille	58.7%	21h 30min. / jour
		Éteint	0.0%	30min. / jour
Lave-vaisselle	65.5	Lavage standard	98.6%	7.2 lavages / semaine
		Lavage économique	0.1%	1 lavage / 6 mois
		Éteint	1.3%	Le reste du temps
Lave-linge	47.5	Lavage standard	91.3%	8.8 lavages / semaine
		Lavage économique	4.9%	5.5 lavages / semaine
		Éteint	3.8%	Le reste du temps
Sèche-linge	36.0	Séchage 80°	82.5%	30min. / jour
		Séchage 60°	16.5%	10min. / jour
		Éteint	1.1%	23h 20min. / jour
Bouilloire	30.0	Pleine	80.3%	3.7 utilisations / jour
		Deux tasses	11.7%	6 utilisations / jour
		Une tasse	1.8%	1.4 utilisations / jour
		Éteinte	6.2%	Le reste du temps
Console de jeux	17.5	Allumée	84.7%	4h / jour
		En veille	11.5%	19h / jour
		Éteinte	3.8%	1h / jour
Grille pain	4.7	Allumé	78.3%	1.3 utilisations / jour
		Éteint	21.7%	Le reste du temps
Lumière	3.7	Allumée	94.2%	1h / jour
		Éteinte	5.8%	23h / jour

Figure 5.2 – *Description des données des appareils utilisés pour la première expérimentation. La deuxième colonne contient le coût total de l'énergie consommée par l'appareil sur l'ensemble du jeu de données (environ 6 mois), exprimé en euros (0.16 euros par kWh). La troisième colonne présente les différents états de l'appareil, et la quatrième la consommation relative de l'état par rapport à la consommation de l'appareil. Cette consommation correspond à l'énergie consommée par l'appareil lorsqu'il est dans cet état. Enfin la dernière colonne présente l'utilisation moyenne des états des appareils pendant la période du jeu de données.*

Certaines utilisations de certains appareils sont annotées dans le jeu de données initial, principalement les lave-linges et lave-vaisselles. Ces annotations permettent de leur associer des états et de définir des paramètres permettant l'extraction automatique de leurs instances (voir 4.2.5). Pour d'autres appareils, il est facile d'identifier des états correspondant aux types d'utilisation, puis de définir leurs paramètres d'extraction. Il est par exemple facile d'identifier les périodes de veille et d'utilisation de la télévision et de l'ordinateur, tel que visible sur la Figure 5.1. Enfin concernant la bouilloire, le lave-linge et le chauffage, des utilisations différentes sont clairement visibles sur la courbe de consommation de ces appareils mais aucune information sur les états de ces appareils n'est présente dans le jeu de données. Nous avons donc associé à ces appareils des états correspondant à une utilisation courante. Par exemple pour la bouilloire, nous avons choisi d'utiliser des états *une tasse*, *deux tasses* et *pleine* correspondant aux trois consommations différentes visibles sur la courbe de consommation de cet appareil. Même si les états choisis ne correspondent pas nécessairement à l'utilisation réelle des appareils, ils sont cohérents en termes de fréquence d'utilisation et de consommation. Comme le jeu de données ne provient pas des participants, ces choix d'états n'ont pas d'incidence sur l'analyse des données par l'utilisateur. Le but premier est en effet d'étudier l'utilisation de *Activelec* pour trouver des modifications applicables.

5.1.3 Protocole

Phase d'apprentissage

L'expérimentation était précédée d'une phase d'apprentissage qui durait environ 25 minutes. La première étape de cette phase était la présentation de *Activelec* par un expérimentateur. La / le participant(e) utilisait le système pendant que l'expérimentateur lui fournissait les explications. Nous nous assurions que les participants comprenaient bien les interactions : navigation dans la visualisation, sélections et modifications. Afin de ne pas introduire de biais, la phase de découverte du système était effectuée sur deux appareils ne faisant pas partie du jeu de données, un ordinateur et un lave-linge. Une fois cette première partie de présentation terminée, les participants devaient compléter un exercice permettant de se familiariser avec les interactions de l'outil. Dans cet exercice, deux modifications étaient données aux participants, qui devaient ensuite les appliquer dans le système. La première modification était la suppression des instances de veille de l'ordinateur dont la durée est supérieure à une journée. La seconde modification était la modification d'un lavage standard sur trois du lave-linge en lavage économique. Tous les participants ont appliqué chacune de ces modifications en moins d'une minute, en comptant le temps nécessaire pour choisir l'appareil. Pour conclure la phase d'apprentissage nous demandions à la / au participant(e) si elle / il avait des questions supplémentaires avant de commencer la tâche.

Tâche

La tâche à réaliser par les participants fût conçue pour étudier l'utilisabilité de *Activelec* et en particulier la pertinence de l'approche *what if*. Nous souhaitions étudier si les participants étaient capables de trouver des modifications permettant d'économiser de l'énergie, tout en étant faciles à appliquer en réalité. Nous demandions donc aux participants de trouver des actions qui économisent de l'énergie en utilisant *Activelec* avec le jeu de données précédemment présenté. Nous leur précisions également d'utiliser notre outil comme s'ils étaient chez eux avec leurs propres données, afin de se placer dans un contexte d'utilisation personnelle. Aussi pour que les participants soient libres en utilisant *Activelec*, ils n'avaient pas d'objectif d'économie ni de limitation de temps. Pour évaluer la relation entre les économies induites par une modification et l'effort pour l'appliquer dans un logement, nous avons utilisé une mesure subjective évaluée par les participants pour chaque modification qu'ils appliquaient dans le système. Cette mesure évalue la quantité d'effort à fournir par la / le participant(e) pour appliquer la modification en réalité. Nous avons demandé aux participants de noter cet effort pour chaque modification appliquée, sur une échelle psychométrique entre 1 (pas d'effort) et 5 (effort maximal).

5.1.4 Résultats

Résultats quantitatifs

La Figure 5.3 présente les résultats quantitatifs de la tâche. Pour chaque appareil, l'*économie moyenne* est la moyenne pour tous les participants du ratio entre l'économie réalisée par la / le participant(e) et la consommation totale de l'appareil. De manière analogue l'*effort moyen* d'un appareil est la moyenne de l'effort évalué par les participants pour les modifications appliquées sur cet appareil. En moyenne les participants ont appliqué des modifications qui économiseraient 36.75% ($\sigma = 12.53$) de la consommation d'énergie totale. Les participants ont modifié 6.75 appareils sur 10 ($\sigma = 1.06$) en moyenne, avec un total de 7.4 ($\sigma = 0.82$) modifications appliquées en moyenne par participant. L'effort moyen évalué par les participants pour les modifications fût de 1.48 ($\sigma = 0.39$). Tous les utilisateurs ont réussi à utiliser le système avec succès quel que soit leur niveau de connaissances en énergie ou en visualisation. De plus lorsque les participants avaient décidé d'appliquer une modification, ils parvenaient à le faire en moins d'une minute, et souvent en quelques secondes. Cela montre que les utilisateurs ont pu aisément appliquer des modifications à l'aide des widgets dédiés, permettant de choisir la sélection et le type de modification. Les participants ont tous passé environ 10 minutes pour appliquer des modifications, après quoi ils estimèrent que les économies réalisées étaient satisfaisantes.

La Figure 5.4 montre le graphique normalisé des résultats quantitatifs de cette ex-

Appareil	Coût total (€)	Nb. de modif. (Nb. de diff.)	Économie moyenne (%)	Effort moyen
Télévision	175.0	15 (7)	32.9%	1.7
Chauffage	136.0	10 (4)	22.7%	1.8
Ordinateur	116.5	11 (8)	48.8%	1.7
Lave-vaisselle	65.5	12 (7)	54.2%	1.3
Lave-linge	47.5	9 (4)	44.0%	1.3
Sèche-linge	36.0	12 (3)	50.1%	1.3
Bouilloire	30.0	6 (5)	29.7%	1.0
Console de jeux	17.5	7 (4)	22.0%	1.3
Grille-pain	4.7	0 (0)	0.0%	/
Lumière	3.7	2 (2)	2.3%	1.0

Figure 5.3 – *Résultats quantitatifs de la première expérimentation. Cette table présente, pour chaque appareil de l'expérimentation : la consommation totale en termes d'argent, le gain moyen, l'effort évalué moyen et le nombre total de modifications appliquées par tous les participants. Le nombre de modifications différentes appliquées est indiqué entre parenthèses. Deux modifications sont considérées comme différentes si elles diffèrent par les critères de sélection ou le type de modification.*

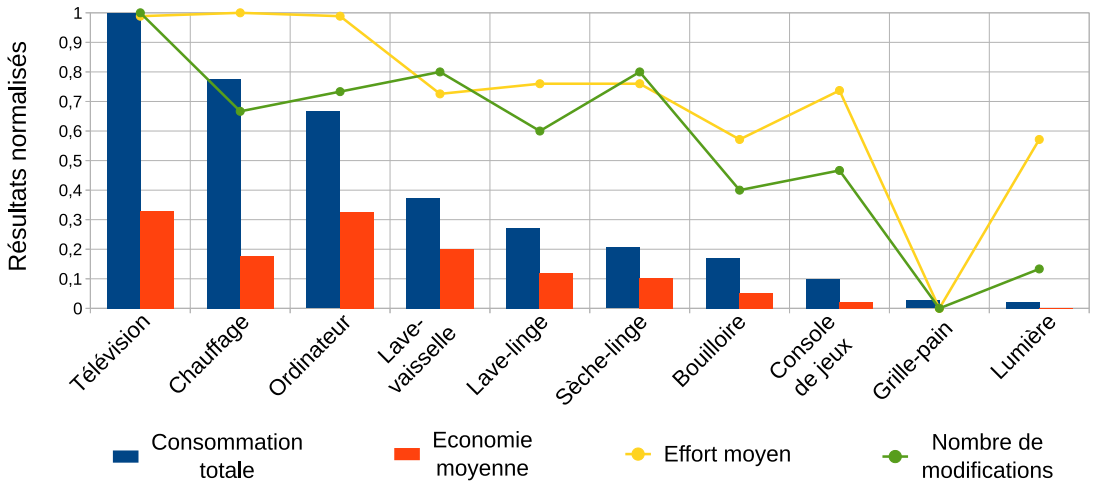


Figure 5.4 – *Graphique des résultats quantitatifs normalisés de la première expérimentation. La consommation des appareils ainsi que le gain réalisé, exprimés en euros, sont normalisés selon la consommation de l'appareil le plus consommateur, qui est la télévision (175 euros). L'effort moyen est normalisé selon l'effort moyen maximal, qui est celui du chauffage (1.8). Enfin le nombre de modifications est normalisé selon le nombre maximal de modifications appliquées sur un appareil, qui est celui de la télévision (15).*

Appareil	Modification	Nombre d'applications	Économie moyenne	Effort moyen
Télévision	*Veille* → *Éteinte*	6	11%	2.2
Chauffage	*22°* → *20°*	8	14%	1.9
Ordinateur	Si durée de *Veille* > d → *Éteint* $d \in \{3h, 4h, 6h\}$	4	59%	1.8
Lave-vaisselle	*Lavage normal* → *Lavage économique*	7	34%	1.1
Lave-linge	*Lavage normal* → *Lavage économique*	6	35%	1.3
Sèche-linge	*80°* → *60°*	7	23%	1.3
Bouilloire	*Pleine* → *2 tasses*	2	77%	1.0
Console de jeux	*Veille* → *Éteinte*	3	11%	1.7
Lumière	*Allumée* → *Éteinte* entre 0h et 8h	1	9%	1.0

Figure 5.5 – *Modifications les plus appliquées par les participants sur les appareils pendant la tâche de la première expérimentation. Chaque modification est associée à son nombre total d'applications sur l'appareil par les participants, l'économie qu'elle permettrait de réaliser en pourcentage de consommation de l'appareil (calculée dans le système) ainsi que l'effort moyen évalué par les participants pour appliquer cette modification en vrai. Le symbole → signifie une modification d'état des instances de l'appareil. La modification de l'ordinateur correspond à une suppression des instances de l'état de veille dont la durée est supérieure à une certaine durée, qui était 3 heures, 4 heures ou 6 heures selon les participants.*

périmentation. Nous pouvons constater que les appareils les plus consommateurs tels que le chauffage, l'ordinateur ou la télévision ont fait l'objet de plus de modifications de manière générale. Ils ont également reçu des efforts plus importants de la part des participants selon les notes attribuées aux modifications. En comparaison les appareils les moins consommateurs, typiquement la lumière et le grille-pain furent l'objet de peu de modifications. Une relation est clairement visible sur la Figure 5.4 entre la consommation d'un appareil, le nombre de modifications appliquées sur cet appareil et l'effort fourni pour modifier son utilisation. De manière générale il semble que plus l'appareil est consommateur, plus les participants tentent de modifications dans son utilisation et aussi placent plus d'effort dans ces modifications. La facilité à trouver des modifications sur un appareil entre également en compte, mais cette quantité est difficilement mesurable car subjective. Par exemple nous pouvons noter que le sèche-linge a été l'objet de plus de modifications que le lave-linge, alors que ce dernier consomme d'avantage d'énergie. Cela est explicable par le fait qu'une proportion importante des participants a modifié le sèche-linge en indiquant que ce n'était pas un appareil indispensable, contrairement au lave-linge.

La Figure 5.5 présente les modifications les plus appliquées par les participants sur chaque appareil. La console de jeux n'est pas présente sur cette figure car aucune modification n'a été appliquée sur elle. Nous pouvons remarquer que les modifications les plus appliquées par les participants ne comportaient pas de critères de sélection complexes, mais c'était le cas d'autres modifications. En guise d'exemple, certains participants ont modifié un lavage standard sur trois du lave-vaisselle en lavage économique. Nous devons également noter que la modification la plus appliquée sur la télévision n'économise que 11% de son énergie, alors qu'en moyenne les participants ont économisé 32.9% sur ce même appareil. Cette différence est explicable par le fait que certains participants ont réduit l'utilisation de la télévision à deux ou trois heures par jour. Ce type de modification permet d'économiser une grande partie de l'énergie de la télévision, qui est allumée 11 heures par jour en moyenne. Enfin, les modifications les plus appliquées par les participants semblent dans l'ensemble faciles à appliquer en vrai, à l'exception de la télévision. Les télévisions sont en effet pour la plupart en veille permanente, et il est nécessaire de les débrancher pour véritablement les éteindre, ce qui a été indiqué par certains participants.

Résultats qualitatifs

Après avoir terminé la tâche, les participants ont rempli un questionnaire basé sur une échelle de Likert entre 1 (*Pas du tout d'accord*) et 5 (*Tout à fait d'accord*). Le questionnaire fût conçu pour récolter les impressions des participants sur le système. Les notes moyennées ainsi que les écarts types des réponses sont montrés sur la Figure 5.6. Les résultats montrent que dans l'ensemble le système a été jugé facile à utiliser par les participants, et en particulier son utilisation a été bien comprise. Le plus important à noter est que les participants ont trouvé que le système leur permettait de trouver des modifications permettant d'économiser de l'énergie. Ce résultat est à mettre en relation avec les études *eco-feedback* précédentes, dans lesquelles les participants éprouvent souvent des difficultés pour trouver des modifications concrètes (voir 3.5). La visualisation a été bien comprise par les participants et leur a permis d'analyser l'utilisation des appareils et leur consommation, aussi bien en mode *appareils* qu'en mode *instances* (voir 4.2.1). La question *facilité des sélections* recueille la note la moins élevée, ce qui est explicable par le temps d'apprentissage nécessaire pour comprendre les différents critères de sélection ainsi que le fonctionnement du système de sélections. Les participants ont jugé que les sélections étaient très utiles pour comprendre les données, ce qui montre qu'elles ont été très bien utilisées par les participants une fois comprises. Les sélections leur ont en effet permis non seulement de définir un comportement à modifier, mais également d'analyser les données via l'exploration des critères de sélection. Les modifications ont elles été jugées faciles à utiliser. Enfin les participants souhaiteraient utiliser *Activelec* chez eux avec leurs propres données.

Nous avons également demandé aux participants quelles fonctionnalités ils avaient

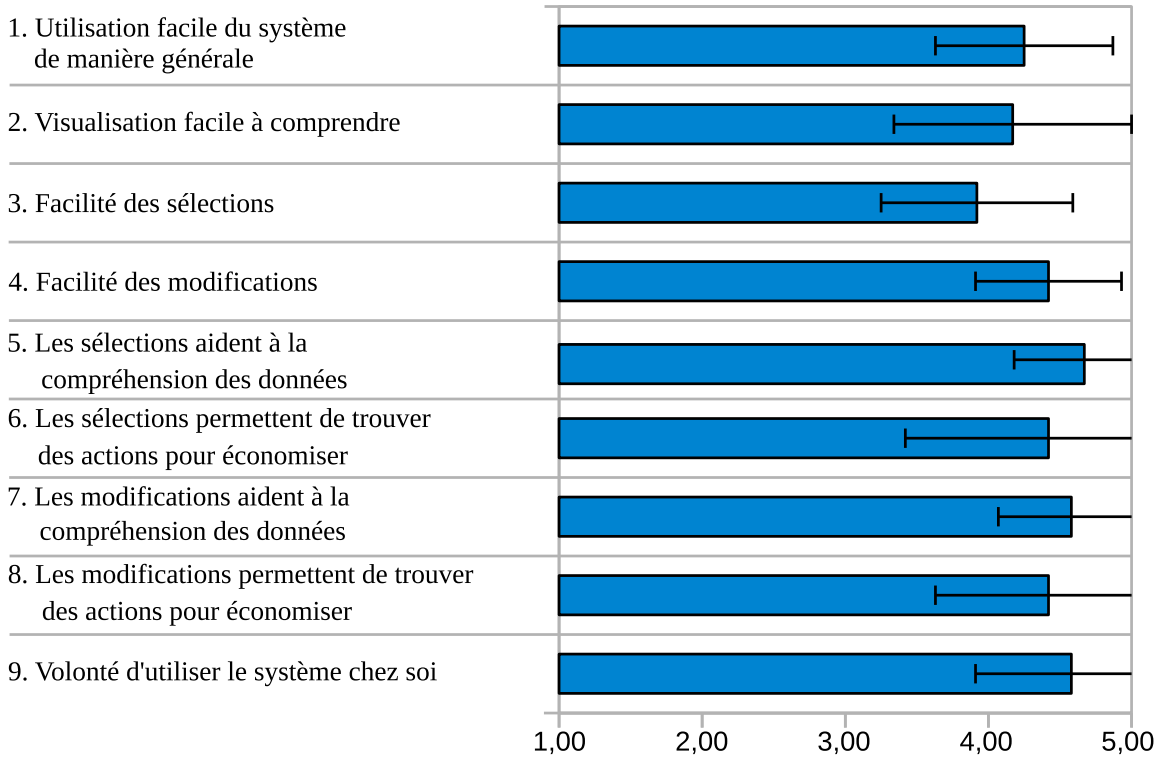


Figure 5.6 – *Moyennes et écarts types des notes des participants au questionnaire de la première expérimentation. Ce questionnaire porte sur l'utilisabilité du système Activelec.*

le plus apprécié et quelles fonctionnalités ils n'avaient pas aimé. Tous les participants ont donné de 2 à 4 éléments pour expliquer ce qu'ils avaient préféré dans l'outil. La conception de la visualisation a été particulièrement appréciée par 8 participants. Ceux-ci ont particulièrement apprécié la possibilité d'obtenir des informations détaillées sur les instances, la possibilité de comparer les consommations des appareils sur le même graphique et le choix des couleurs. L'interaction avec les données des appareils a été mentionnée par 7 participants. En particulier les participants ont apprécié le système de sélections qui leur permettait de définir rapidement un ensemble d'utilisations à modifier. La possibilité d'avoir un retour sous forme de prix a été mentionnée par 6 participants. Celle-ci leur a permis d'évaluer de façon concrète les modifications appliquées et d'évaluer si leur application réelle était rentable. Dans l'ensemble les participants ont donné peu de points négatifs. Un participant a indiqué que le temps d'apprentissage nécessaire était légèrement long. Les autres remarques concernaient des améliorations potentielles de l'interface, qui ont été mentionnées par 4 participants. Ces modifications mineures ne concernaient pas le cœur de l'interaction. Par exemple, les participants auraient souhaité avoir d'avantage de détails sur les états des appareils, tels que leur consommation relative. Ces suggestions ont été intégrées dans l'interface utilisateur avant la seconde expérimentation présentée en Section 5.2.

Utilisation type

L'expérimentation a permis d'identifier des comportements communs entre les participants pour trouver des changements de comportement pertinents. Premièrement, les utilisateurs sélectionnent un des appareils les plus consommateurs en utilisant la visualisation fournie dans le mode *appareils*. Puis les utilisateurs passent en mode *instances* et analysent l'utilisation de l'appareil choisi au cours du temps afin de définir des critères qui correspondent à un changement de comportement identifié. Le retour instantané sur la sélection des instances permet d'ajuster les critères de sélection jusqu'à ce que le ratio entre économie et effort soit jugé satisfaisant. Ensuite, les utilisateurs appliquent une modification et l'évaluent avec la visualisation et la valeur des économies réalisées. Si les utilisateurs ne sont pas satisfaits du résultat de la modification, ils ont tendance à ajuster leurs critères de sélection pour balancer le compromis entre effort à fournir et économies. Si les économies sont faibles, les utilisateurs essaient d'obtenir une modification menant à de meilleures économies, en fournissant plus d'efforts si nécessaire. Si l'effort nécessaire est jugé comme étant élevé, les utilisateurs ont tendance à modifier leurs critères pour diminuer l'effort à fournir pour appliquer la modification en réalité. Lorsqu'une ou plusieurs modifications convenables ont été trouvées, les utilisateurs retournent dans le mode *appareils* pour sélectionner un autre appareil, dont le ratio entre consommation et effort à fournir pour le modifier semble intéressant.

5.1.5 Discussion

Utilisabilité

L'objectif principal de cette première expérimentation était d'évaluer l'utilisabilité du système *Activelec* et plus spécifiquement l'approche *what if* appliquée à l'*eco-feedback*. Bien que les participants n'aient pas utilisé leurs propres données lors de l'expérimentation, ils ont pu comprendre la consommation et la lier avec l'utilisation des appareils grâce à notre outil. De plus cette compréhension a été renforcée par l'application des sélections, en particulier les sélections par critères. Enfin les modifications dans les utilisations des appareils ont été facilement appliquées par les participants. En effet les résultats montrent que les participants ont appliqué plusieurs modifications différentes sur les appareils.

Un des problèmes principaux rencontré par les utilisateurs de systèmes *eco-feedback* est la difficulté à trouver les appareils sur lesquels agir pour économiser (voir 3.3). Les résultats de cette expérimentation montrent que les participants ont résolu ce problème à l'aide de *Activelec*, comme en l'attestent les choix de modifier les appareils les plus consommateurs. Par exemple les utilisateurs ont d'avantage modifié la télévision et l'ordinateur que la console de jeux, alors que ces trois appareils restaient la majorité du temps en veille. Les utilisateurs ont également choisi des appareils dont l'effort à fournir

pour les modifier est jugé faible. Par exemple le sèche-linge a été beaucoup modifié car la majorité des participants a jugé son utilisation dispensable, et sa température d'utilisation a alors été réduite voire son utilisation complètement arrêtée.

Économies réalisées

Selon les études précédentes les systèmes *eco-feedback* permettent d'économiser de 5 à 23% de la consommation d'un logement. Les économies réalisées par les participants lors de l'expérimentation sont relativement élevées, avec en moyenne une économie de 36.75% de la consommation totale. Ces résultats montrent un réel potentiel du système pour aider les participants à trouver des actions concrètes à appliquer, qui permettent d'économiser une quantité d'énergie non négligeable. Par ailleurs les utilisateurs ont majoritairement évalué l'effort à fournir pour modifier les utilisations comme étant faible. Cette évaluation montre que les participants ont été capables de trouver des actions qu'ils estiment faciles à appliquer en réalité. Ces modifications seraient donc potentiellement appliquées en réalité par les participants sur leurs appareils. Le système *Activelec* permet donc aux utilisateurs d'évaluer le compromis entre économies d'énergie et confort.

Toutefois les économies réalisées dans le système par les participants sont à nuancer. Tout d'abord, nous n'utilisons qu'un nombre réduit d'appareils. En particulier le jeu de données ne comprend pas de réfrigérateur ni de congélateur, qui figurent parmi les appareils les plus consommateurs d'un logement. Ensuite, les états de certains appareils (chauffage, lave-linge et bouilloire) ont été supposés. De même les modifications que nous calculons sur un appareil sont basées sur une copie d'autres instances de cet appareil. Ces approximations peuvent influencer les économies réalisées, même si les gains calculés pour les modifications sont dans l'ensemble cohérents. Enfin nous devons particulièrement insister sur le fait que les modifications appliquées dans le système n'ont pas été réellement appliquées. Même si l'effort évalué par les participants pour appliquer les modifications est faible, nous ne considérons pas ici leur application réelle.

Diversité des utilisateurs

Bien que les participants ayant des connaissances préalables en énergie ont économisé d'avantage d'énergie que les autres, tous les participants ont trouvé des modifications concrètes à appliquer. Le manque de connaissances en énergie ou en visualisation des participants ne les a pas empêchés de trouver des actions pertinentes pour économiser. Ceci valide notre conception qui cible aussi bien les utilisateurs expérimentés que les novices. Même si les participants de l'expérimentation étaient tous d'éducation supérieure, ceci montre la capacité du système à convenir aux participants. De plus la visualisation a été comprise par l'ensemble des participants, quel que soit leur niveau de connaissances en visualisation.

Nous avons observé une différence entre le mode de retour sur l'efficacité des modifications utilisé par les participants. Certains participants se basaient principalement sur la visualisation, tandis que d'autres ont préféré la valeur agrégée des économies d'énergie, en particulier exprimée en termes d'argent. Cela montre que le système peut être utilisé par des personnes préférant se baser sur la visualisation aussi bien que par des personnes qui préfèrent un retour sous forme chiffrée. *Activelec* fournit les deux possibilités : la visualisation qui est mise à jour lorsqu'une modification est appliquée et les indicateurs de l'énergie économisée.

Choix personnels

Cette expérimentation confirme l'importance des choix personnels des participants dans les modifications à appliquer. Notre méthode permet en effet aux participants de choisir l'appareil sur lequel appliquer des modifications, puis d'estimer le compromis entre l'effort à fournir pour appliquer une modification et les économies réalisées. Bien que certaines modifications ont été appliquées un nombre conséquent de fois, beaucoup de modifications différentes ont été retenues par les participants. Les sélections et modifications flexibles ont permis aux participants d'obtenir des modifications qui leur convenaient. De plus les choix des participants en termes de maintien du confort diffèrent. Certains participants ont par exemple refusé de modifier le chauffage, d'autres ont refusé de faire l'effort d'éteindre les appareils en veille. Mais ces participants ont pu trouver d'autres modifications qui leur convenaient. Ces résultats montrent que notre méthode permet la prise en compte des choix personnels des participants pour réaliser des économies d'énergie.

5.2 Étude avec données propres aux participants

En plus de l'expérimentation présentée dans la section précédente, nous avons conduit une seconde expérimentation dont le but est d'étudier comment les participants utilisent le système *Activelec* avec leurs propres données. Notre hypothèse est que les participants trouveront des modifications pertinentes dans leur propre utilisation des appareils qui leur permettent d'économiser de l'énergie, et qui correspondent à leur comportement. En particulier le fait d'utiliser leurs propres données devrait permettre aux participants d'analyser l'utilisation des appareils de manière plus approfondie. Cela devrait donc leur permettre de trouver des modifications de comportement que nous ne pouvons envisager auparavant sans leur analyse.

5.2.1 Participants

L'objectif de cette seconde expérimentation est d'étudier si notre méthode permet aux utilisateurs de trouver des modifications dans l'utilisation de leurs propres appareils. Pour cela, chaque participant de l'expérimentation doit utiliser le système *Activelec* avec ses propres données de consommation. Deux solutions sont possibles pour obtenir de telles données propres aux participants. La première solution est de recruter des participants qui ont auparavant récolté les données de consommation de leurs propres appareils. Pour cette seconde expérimentation nous avons choisi cette solution. La seconde solution possible est d'instrumenter les appareils électriques des participants dans leur logement puis de récolter leurs données. Nous avons appliqué cette solution pour l'expérimentation de terrain présentée dans le Chapitre 6.

Nous avons recruté deux participants qui ont vécu individuellement dans l'appartement connecté du projet *Amiqual4Home* [11]. Cet appartement instrumenté permet entre autres de récolter la consommation des appareils électriques au cours du temps. Les deux participants étaient des doctorants qui ont vécu dans l'appartement connecté pendant un mois, et ont récolté leur consommation pendant cette période. Les participants ont initialement récolté les données de consommation à des fins de recherche dans le domaine de la reconnaissance automatique d'activité. Ce domaine ne concerne donc directement ni la visualisation ni la consommation d'électricité. L'expérimentation a été conduite après la fin de la période de récolte des données, lorsque les participants ne vivaient plus dans l'appartement connecté.

Nous avons conduit un entretien préalable avec les participants, identique à celui de la première expérimentation (voir 5.1.1). Les deux participants ont indiqué qu'ils étaient motivés par la réduction de la consommation d'électricité. Ils ont tous deux pu classer trois types d'appareils (lumière basse consommation, télévision et radiateur électrique) selon leur consommation moyenne supposée. Seul le Participant 1 a pu définir précisément puissance et énergie électrique. Aucun des deux participants n'avait une

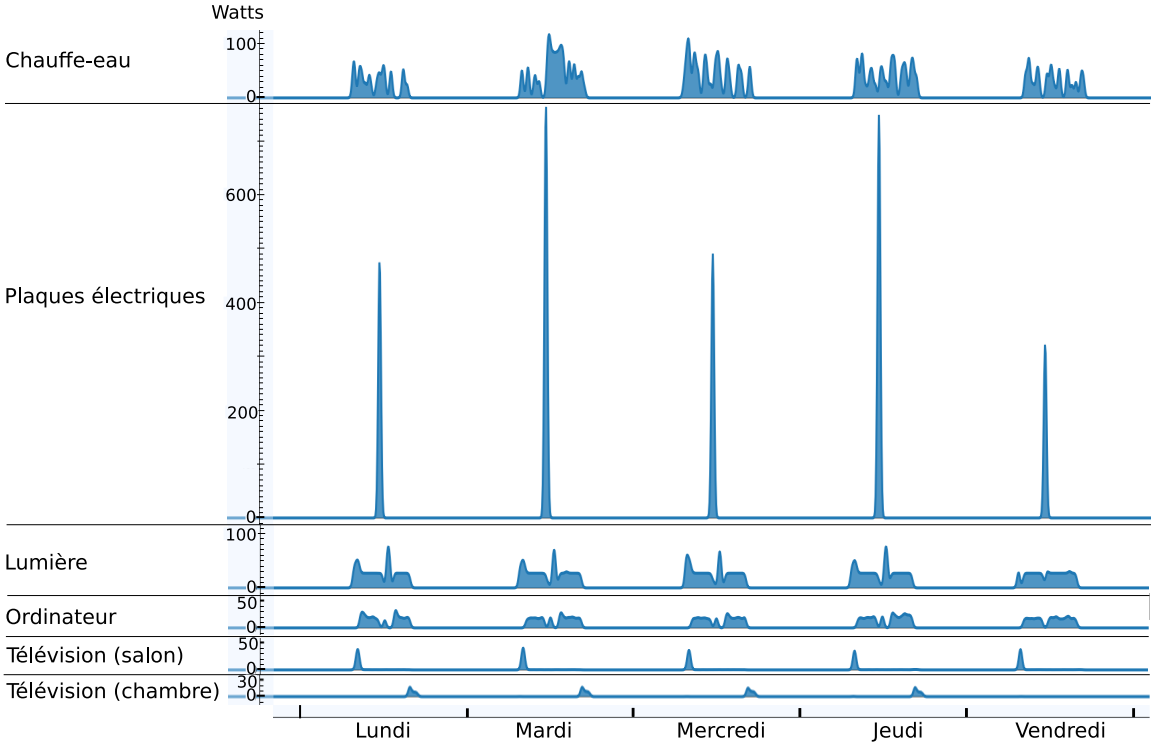


Figure 5.7 – *Évolution sur une durée de cinq jours (durant Février 2017) de la consommation des appareils du premier participant à la deuxième expérimentation. Les appareils sont classés du plus consommateur (chauffe-eau) au moins consommateur (télévision de la chambre).*

idée du prix correspondant à la consommation des appareils par mois ou par an. Les participants étaient capables d'utiliser des visualisations simples telles que graphiques en courbe et diagrammes en bâtons mais n'étaient pas spécialistes en visualisation.

5.2.2 Données

Les appareils électriques du logement intelligent dans lequel ont vécu les deux participants sont instrumentés, ce qui permet de récolter leur puissance instantanée au cours du temps. Les deux participants ont séjourné chacun environ un mois dans le logement, au cours du mois de Février 2017 pour le premier et au cours du mois de Juillet 2016 pour le second. Les évolutions de puissance instantanée au cours du temps des appareils du premier et du second participant sont visibles sur les Figures 5.7 et 5.8 respectivement. Les jeux de données de consommation des appareils ont été rendus disponibles en ligne par les participants [37, 82].

Les ensembles d'appareils dont les données ont été récoltées sont différents pour les

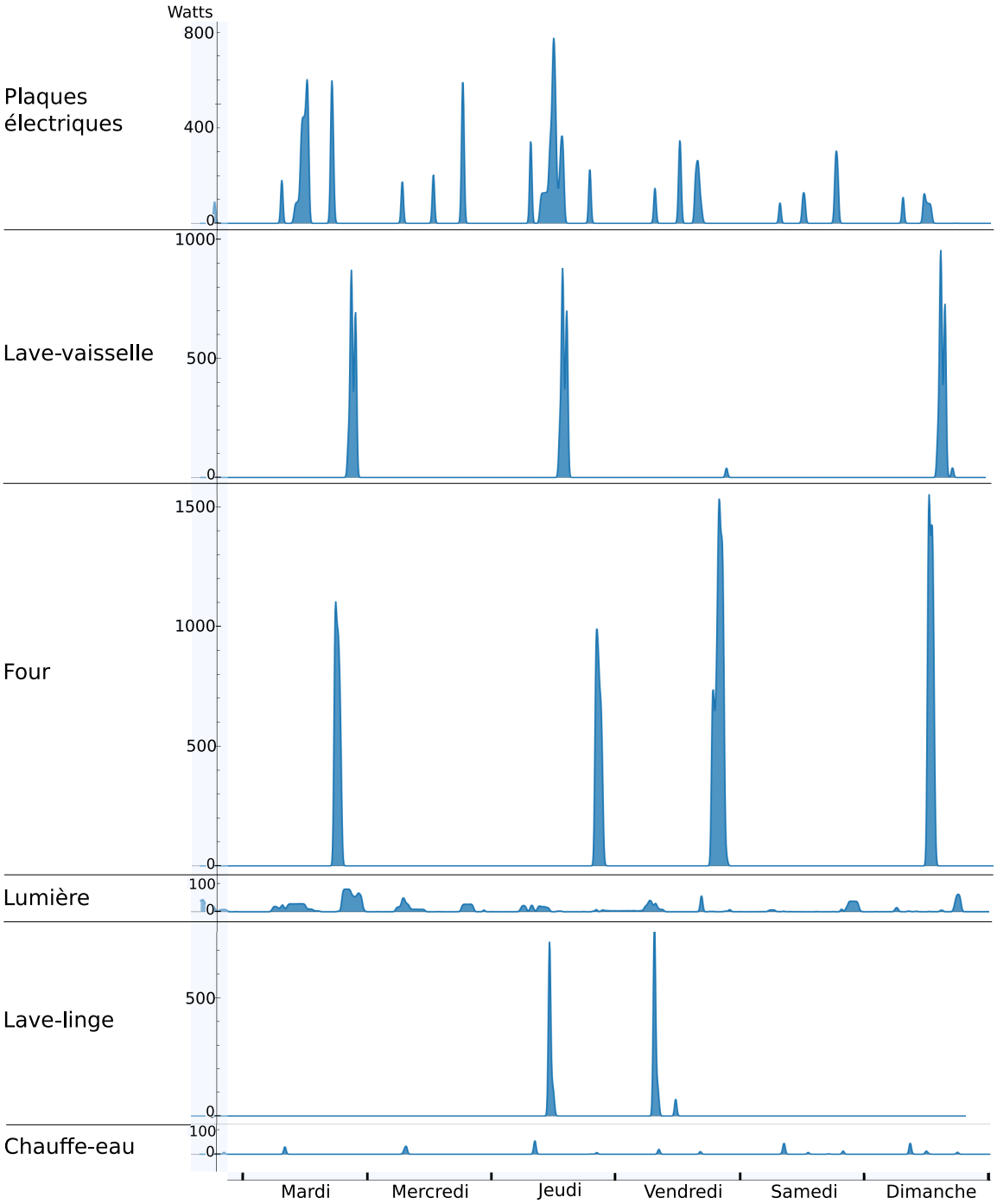


Figure 5.8 – *Évolution sur une durée de six jours (durant Juillet 2016) de la consommation des appareils du second participant à la deuxième expérimentation. Les appareils sont classés du plus consommateur (plaques électriques) au moins consommateur (chauffe-eau).*

Appareil	Coût (euros)	États	Cons. rel. de l'état	Utilisation moyenne de l'état
Chauffe-eau	0.74	Chauffage	96.3%	1h 50min. / jour
		Éteint	3.7%	22h 10min. / jour
Plaques électriques	0.68	Chauffage fort	59.4%	1h 10min. / jour
		Chauffage moyen	31.3%	1h / jour
		Chauffage faible	7.9%	50min. / jour
		Éteintes	1.4%	21h / jour
Lumière	0.68	Allumée	99.4%	5h 20min. / jour
		Éteinte	0.6%	18h 40min. / jour
Ordinateur	0.36	Allumé	99.6%	4h 30min. / jour
		Éteint	0.4%	19h 30min. / jour
Télévision (salon)	0.07	Allumée	87.7%	40min. / jour
		En veille	12.3%	5h 40min. / jour
		Éteinte	0.0%	17h 40min. / jour
Télévision (chambre)	0.03	Allumée	42.6%	10min. / jour
		En veille	56.2%	30min. / jour
		Éteinte	1.2%	23h 20min. / jour

Figure 5.9 – *Description des données des appareils utilisés par le premier participant pour la seconde expérimentation. La seconde colonne contient le coût total de l'énergie consommée par l'appareil sur l'ensemble du jeu de données (environ 1 mois), exprimé en euros. La troisième colonne présente les différents états de l'appareil, et la quatrième la consommation relative de l'état par rapport à la consommation de l'appareil. Cette consommation correspond à l'énergie consommée par l'appareil lorsqu'il est dans cet état. Enfin la dernière colonne présente l'utilisation moyenne des états des appareils pendant la période de récolte des données.*

deux participants. Les deux participants ont récolté la consommation du chauffe-eau, de la lumière et des plaques électriques. Le premier participant a de plus enregistré les consommations de deux télévisions et d'un ordinateur, tandis que le second a enregistré les consommations des lave-linge, lave-vaisselle et four. Les différences dans les ensembles d'appareils mesurés entraînent des différences dans les motifs de consommation au cours du temps. Comme visible sur les figures 5.7 et 5.8, les courbes de consommation des appareils du premier participant montrent une répartition de l'utilisation au cours de la journée, tandis que celles du second participant présentent des pics ponctuels. De plus le chauffe-eau est l'appareil le plus consommateur du premier participant, alors qu'il est le moins consommateur du second participant. Ceci s'explique par la différence du mois de récolte des données, le premier participant ayant séjourné dans le logement instrumenté en hiver, tandis que le second y a séjourné en été. A noter que l'appareil *lumière* regroupe l'ensemble des lumières de l'appartement, au nombre de 4.

Appareil	Coût (euros)	États	Cons. rel. de l'état	Utilisation moyenne de l'état
Plaques électriques	0.70	Chauffage fort	8.4%	1min. / jour
		Chauffage moyen	35.2%	9min. / jour
		Chauffage faible	55.3%	1h / jour
		Éteintes	1.1%	22h 50min. / jour
Lave-vaisselle	0.48	Lavage	100%	8 lavages / semaine
		Éteint	0.0%	Le reste du temps
Four	0.47	Chauffage fort	52.0%	10min. / jour
		Chauffage moyen	25.2%	5min. / jour
		Chauffage faible	22.2%	10min. / jour
		Éteint	0.6%	23h 35min. / jour
Lumière	0.20	Allumée	99.2%	8h / jour
		Éteinte	0.8%	16h / jour
Lave-linge	0.13	Lavage standard	59.6%	1 lavage / semaine
		Lavage économique	40.3%	2 lavages / semaine
		Éteint	0.1%	Le reste du temps
Chauffe-eau	0.12	Chauffage	96.3%	5min. / jour
		Éteint	3.7%	23h 55min. / jour

Figure 5.10 – *Description des données des appareils utilisés par le second participant pour la seconde expérimentation. Voir la Figure 5.9 pour une description des colonnes.*

Nous avons manuellement attribué des états aux appareils présents dans les jeux de données des participants, en fonction de leurs utilisations. Les instances de ces appareils ont ensuite été automatiquement extraites par le système *Activelec*. Au cours d'un entretien préalable, nous avons demandé aux participants une confirmation des modes d'utilisation de certains appareils. Par exemple nous avons demandé au Participant 1 si elle / il avait utilisé le mode veille de l'ordinateur et des télévisions, et au Participant 2 si les modes économiques des lave-linge et lave-vaisselle avaient été utilisés. Nous ne demandions pas de détails sur le nombre d'utilisations et les participants ne voyaient pas leurs données avant l'expérimentation pour éviter tout biais. Les appareils et leurs états utilisés dans cette expérimentation pour chaque participant sont présentés respectivement sur les Figures 5.9 et 5.10. En raison de notre méthode de simulation qui copie des instances existantes lors d'une modification (voir 4.2.5), seuls les états ayant été effectivement utilisés lors de la récolte de données peuvent être modélisés. Pour cette raison, l'ordinateur du Participant 1 ne possède pas d'état *en veille* car il n'a jamais été dans ce mode au cours de la récolte de données. Similairement le lave-vaisselle du Participant 2 ne possède pas d'état *lavage économique*.

Les jeux de données des participants ne présentent pas de consommation importante. En particulier, peu de modifications simples qui ne nécessiteraient pas une connaissance

du comportement des participants peuvent être appliquées aux appareils. Par exemple l'ordinateur du Participant 1 n'est jamais en veille au cours de la période de récolte, la modification simple qui consisterait à supprimer ses périodes de veille ne peut donc pas être appliquée. Ces jeux de données sont donc intéressants pour cette seconde expérimentation. Ils permettent en effet d'évaluer si notre méthode et son implémentation dans le système *Activelec* permettent aux participants d'apporter leurs propres connaissances sur l'utilisation des appareils afin de trouver des modifications concrètes qui leur permettent d'économiser de l'énergie.

5.2.3 Protocole

Pour cette expérimentation nous avons utilisé un protocole similaire à celui de l'expérimentation précédente (voir 5.1.3). La tâche était précédée par la même phase d'apprentissage de 25 minutes. Cette phase d'apprentissage était effectuée sur des appareils différents des jeux de données des participants afin d'éviter tout biais. Ces appareils étaient les mêmes que ceux utilisés pour la première expérimentation : un ordinateur et un lave-linge. Les participants devaient également appliquer sur ces appareils les deux mêmes modifications qui leur étaient données en guise d'exercice.

Pendant la tâche, les participants étaient libres d'utiliser le système comme ils le désiraient. Nous leur demandions de tenter d'économiser de l'énergie, sans toutefois leur donner un objectif d'économie précis. Nous ne donnions pas non plus de limite de temps pour l'utilisation du système. Nous demandions aux participants d'évaluer chaque modification en termes d'effort requis pour l'appliquer en réalité, sur une échelle allant de 1 à 5. Lorsque les participants avaient fini d'utiliser le système, il leur était demandé de remplir le même questionnaire que celui de l'expérimentation précédente. Puis nous leur demandions ce qu'ils avaient aimé ou non aimé dans l'utilisation de *Activelec*.

5.2.4 Résultats

Modifications appliquées

Les deux participants ont passé environ 15 minutes à utiliser le système, jusqu'à ce qu'ils jugent leurs modifications comme étant satisfaisantes. La Figure 5.11 présente les modifications appliquées par les deux participants sur leurs appareils respectifs. Les participants ont appliqué un total de 9 modifications sur les appareils. Ils ont analysé l'utilisation de tous les appareils, même celle des appareils sur lesquels aucune modification n'a été appliquée.

Le Participant 1 a appliqué 6 modifications qui économiseraient 31.54% de l'énergie totale, avec un effort estimé à 2 en moyenne.

Appareil	Modification(s)	Économie	Effort
	Participant 1		
Ordinateur	/	0.00%	/
Télévision (salon)	*en veille* →*éteint*	51.06%	1
Télévision (chambre)	*en veille* →*éteint*	60.00%	1
Lumières	Éteindre entre 13h et 14h	23.53%	3
Plaques électriques	*chauffage fort* →*chauffage moyen*	26.47%	1
	Éteindre le vendredi	13.24%	5
	Total	39.71%	/
Chauffe-eau	Éteindre après 13h	32.43%	1
	Participant 2		
Four	/	0.00%	/
Lave-vaisselle	/	0.00%	/
Lave-linge	1 *lavage standard* sur 2 →*lavage économique*	13.56%	2
Lumières	Éteindre entre 0h et 5h	11.00%	1
Plaques électriques	Limiter à 30 minutes	15.48%	2
Chauffe-eau	/	0.00%	/

Figure 5.11 – *Modifications appliquées par les participants sur les appareils au cours de la seconde expérimentation. "→" représente une modification d'état. "/" signifie qu'aucune modification n'a été appliquée à l'appareil. L'économie des modifications (troisième colonne) est exprimée en pourcentage de la consommation de l'appareil sur lequel a été appliquée la modification.*

- Le Participant 1 s'est particulièrement intéressé au chauffe-eau, appareil le plus consommateur pour ce participant. Elle / il a remarqué que celui-ci était allumé durant l'après-midi, alors qu'il n'était pas utilisé, ni pour le chauffage ni pour l'eau chaude sanitaire. Ce participant a donc indiqué que le chauffe-eau pourrait être réglé pour éviter cette consommation, et a supprimé les périodes de chauffage au cours de l'après-midi. Nous pouvons toutefois noter que cette modification semble peu réaliste car le chauffe-eau chauffait probablement de l'eau en prévision d'une utilisation. Nous évoquons cette limitation dans la discussion (voir 5.2.5).

- Ce participant n'a pas appliqué de modifications sur l'ordinateur. Il a en effet indiqué que son utilisation était indispensable, et l'ordinateur n'était jamais mis en veille.

- Les plaques électriques, le second appareil le plus consommateur, ont fait l'objet de deux modifications. Le Participant 1 a indiqué qu'elle / il utilisait les plaques à la température maximale pour les faire chauffer plus rapidement, et qu'il était donc possible de les utiliser à une température plus basse. Les instances *chauffage fort*

ont donc été modifiées en instances *chauffage moyen* par ce participant, ce qui a induit une économie conséquente. Aussi au vu de la consommation importante des plaques électriques, ce participant a mentionné la possibilité de faire un repas froid le vendredi afin d'éviter leur utilisation. Cette modification réclamerait toutefois beaucoup d'efforts pour être appliquée en réalité.

- Le Participant 1 a remarqué que la lumière restait allumée pendant de longues périodes l'après-midi ; ce participant a en effet indiqué que la lumière était utilisée pour lire entre 13h et 14h. Toutefois elle / il a également indiqué que les volets étaient fermés et qu'ils pouvaient être ouverts afin d'éviter l'utilisation de la lumière. Ce participant a donc supprimé les utilisations correspondantes de la lumière.

- Bien que les télévisions soient les appareils les moins consommateurs dans le jeu de données de ce participant, celui-ci a estimé que ces appareils restaient inutilement en veille pendant de longues périodes. Le Participant 1 a donc décidé de supprimer ces périodes de veille en éteignant les télévisions, une modification jugée comme étant facile à appliquer en vrai.

Le Participant 2 a appliqué 3 modifications sur les appareils et a économisé 7.47% de l'énergie totale, avec un effort évalué moyen de 1.67 pour appliquer ces modifications.

- Bien qu'étant le deuxième appareil le plus consommateur, le lave-vaisselle n'a pas été modifié par le Participant 2. Son utilisation a été jugée indispensable, et un mode économique n'était pas disponible pour modifier les types de lavage de cet appareil.

- De même, le four n'a pas été modifié par le Participant 2, qui a indiqué ne pas vouloir diminuer son utilisation. Ce participant a également indiqué que diminuer sa température n'était pas pertinent.

- Le mode économique était déjà utilisé pour certains lavages du lave-linge, mais ce participant a noté qu'il pourrait être d'avantage utilisé. Ce participant a donc modifié un lavage standard sur deux du lave-linge en lavage économique, une modification relativement peu coûteuse en termes d'effort.

- Le Participant 2 a reconnu laisser occasionnellement la lumière allumée au cours de la nuit. Au vu de la consommation non négligeable de celle-ci, elle / il a indiqué qu'il serait facile d'économiser en éteignant la lumière la nuit.

- En analysant l'utilisation des plaques électriques, ce participant a remarqué qu'elles étaient souvent utilisées plus de 30 minutes. Or selon ce participant aucune cuisson ne nécessitait plus de 30 minutes pendant la période de récolte des données. Elle / il a alors déduit de cette analyse que les plaques électriques étaient

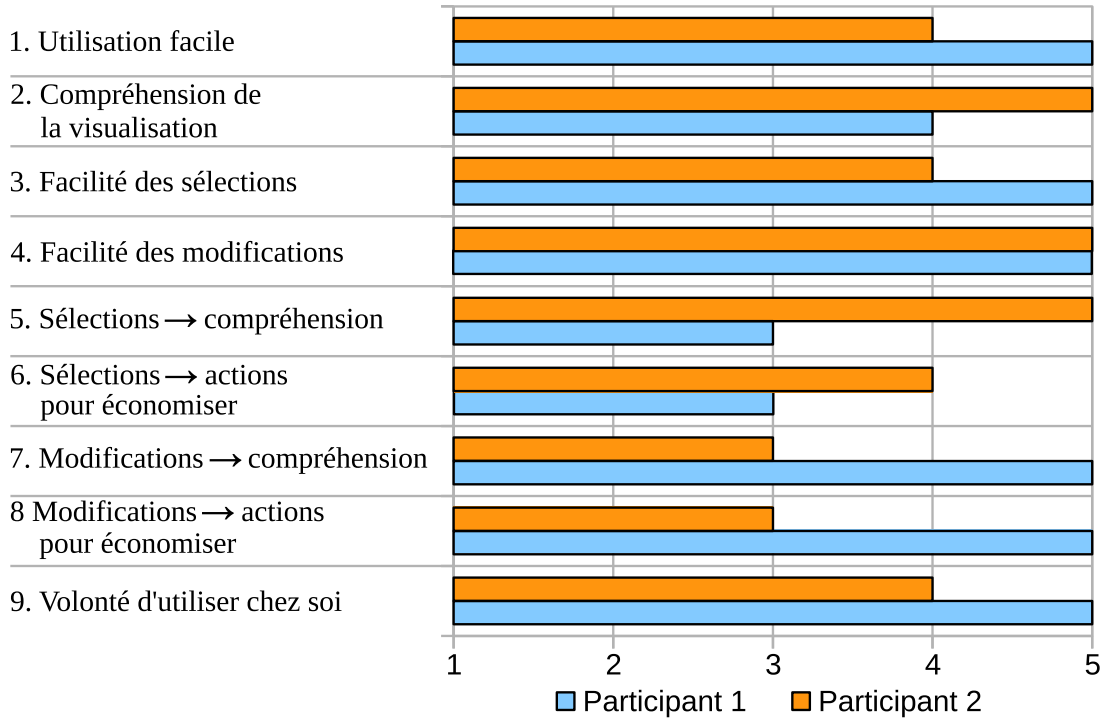


Figure 5.12 – *Résultats du questionnaire rempli par les participants à la fin de l'expérimentation. Le questionnaire est basé sur une échelle de Likert et évalue l'utilisabilité du système.*

en fait oubliées en étant allumées. Le Participant 2 a donc décidé d'appliquer une modification limitant l'utilisation des plaques électriques à 30 minutes.

- Le chauffe-eau n'a pas été modifié par ce participant, car sa consommation est faible en comparaison des autres appareils. Cet appareil n'a été utilisé qu'environ 5 minutes par jour pour prendre une douche.

Ressenti utilisateur

La Figure 5.12 montre les réponses des participants au questionnaire sur l'utilisabilité du système. Nous pouvons voir que les deux participants ont trouvé *Activelec* facile à utiliser. Les résultats indiquent également que le système était utile pour comprendre l'utilisation des appareils et leur consommation. *Activelec* a également été jugé utile pour trouver des actions qui permettent d'économiser de l'énergie. Ces résultats vis à vis du ressenti des participants sont similaires à ceux de la première expérimentation. Notons que le Participant 1 a accordé une note de 3 aux deux questions relatives à la capacité des sélections à rendre les données compréhensibles, et également à permettre de trouver des actions concrètes à appliquer. Le Participant 2 a accordé la même note

aux deux questions similaires à propos des modifications, c'est à dire leur capacité à aider à comprendre les données et à trouver des actions à appliquer sur les appareils. L'explication à ces notes est que les sélections et modifications ne sont pas utilisées indépendamment, tel que mentionné par un participant. Les sélections et modifications sont utilisées ensemble pour comprendre les données et trouver des modifications qui permettent d'économiser.

Lors de l'entretien final, nous avons demandé quelles fonctionnalités de l'outil les participants avaient le plus apprécié et également ce qu'ils n'avaient pas aimé. Les deux participants ont indiqué qu'ils avaient apprécié la visualisation qui permet une exploration détaillée et fournit un retour pour les sélections et les modifications. Les participants ont également apprécié la possibilité d'explorer la consommation des appareils avec leur utilisation. En particulier ils ont tous deux indiqué qu'il était très utile de pouvoir explorer la consommation à n'importe quelle échelle de temps grâce au zoom. Les participants ont indiqué que les "détails sur demande" fournis par le système étaient utiles, par exemple pour obtenir le détail des instances. Un des deux participants a reporté comme point positif le retour rapide lorsqu'une modification est appliquée. Selon ce participant, ce retour rapide permet d'évaluer le résultat d'une modification rapidement et de la peaufiner si nécessaire. Comme points négatifs, les participants ont seulement mentionné des améliorations possibles pour l'interface. Par exemple un participant aurait apprécié que des statistiques supplémentaires sur les appareils soient disponibles, par exemple la consommation relative de leurs états. Ces améliorations ont été appliquées au système avant l'expérimentation *in-situ* présentée dans le Chapitre 6.

5.2.5 Discussion

Efficacité de la méthode

Similairement à la première expérimentation, les participants ont pu analyser efficacement l'utilisation des appareils et également mettre cette utilisation en relation avec la consommation d'énergie. Les participants ont réussi à appliquer facilement et rapidement plusieurs modifications sur leurs appareils. Les économies réalisées dans le système par les participants (respectivement 31.54% et 7.47%) s'inscrivent dans la lignée des études sur l'*eco-feedback*. Même si nous n'avons pas étudié l'application réelle de ces modifications, ces chiffres sont plus réalistes que ceux obtenus lors de la première expérimentation. Les états des appareils ont en effet pu être vérifiés auprès des participants, avant et pendant l'expérimentation. De plus, les jeux de données des participants ne montrent pas de consommation importante, ce qui met d'avantage en valeur les économies réalisées par les modifications. L'entretien final montre que les participants ont apprécié l'utilisation du système, en particulier de la méthode *what if*. Cet intérêt pour cette méthode d'interaction montre un bon potentiel d'acceptation de la méthode auprès des utilisateurs.

Bien que les ensembles d'appareils étaient différents entre les participants, nous pouvons remarquer que le Participant 2 a appliqué plus de modifications. Ce participant est également parvenu à économiser plus d'énergie que le Participant 1. Les modifications ont été également évaluées par ce participant avec un effort moyen supérieur. Bien que le Participant 1 n'a pas souhaité modifier l'utilisation de certains appareils jugés indispensables, elle / il est tout de même parvenu à trouver des changements dans l'utilisation des appareils qui permettraient d'économiser 7.47% de l'énergie. Ce résultat montre l'efficacité de la méthode pour contrer le problème des "pratiques non négociables", c'est à dire la difficulté rencontrée par les utilisateurs pour trouver des changements de comportement ne diminuant pas leur confort (voir 3.3).

Modèle d'interaction

Lors de cette seconde expérimentation nous avons observé le même modèle d'interaction que dans la première expérimentation. Les participants sélectionnaient un appareil, exploraient ses données, appliquaient des sélections puis peaufinaient la sélection ou le type de modification selon le résultat obtenu. Au vu des modifications appliquées, les participants ont choisi de se concentrer sur les appareils les plus consommateurs. Par exemple, les deux participants ont appliqué des modifications sur les plaques électriques, appareil certes indispensable mais très consommateur. Ils ont parfois choisi des appareils pour lesquels les modifications semblaient faciles à appliquer. Le Participant 1 a ainsi supprimé les périodes de veille des deux télévisions, même si ces dernières sont les appareils les moins consommateurs, car ces modifications ont été jugées faciles à appliquer en vrai.

Apport des informations personnelles

Nous avons observé que les participants étaient plus impliqués dans les données, ce qui a induit un temps d'utilisation plus long en moyenne que pour la première expérimentation. Cela est expliqué par le fait que les participants ont utilisé leurs propres données dans cette étude, à l'opposition de la première. Ils ont ainsi été capables de lier les données à leurs habitudes. Par exemple ils ont facilement identifié leurs actions quotidiennes telles que prendre une douche ou cuisiner grâce aux évolutions respectives des états du chauffe-eau et des plaques électriques. Les participants ont également pu identifier des consommations anormales qui ont pu être supprimées pour économiser de l'énergie. Par exemple le Participant 2 a remarqué que les lumières restaient parfois allumées la nuit. Ce participant a donc supprimé ces utilisations inutiles, ce qui a permis d'économiser une quantité non négligeable d'énergie.

Nous avons également remarqué que les participants ont appliqué des modifications que nous n'envisagions pas nous-même avant l'expérimentation. En d'autres termes, seuls les participants ont pu trouver des modifications en apportant leurs connaissances

personnelles concernant leur comportement. Cela montre que notre système a aidé les utilisateurs à formuler des scénarios *what if*, leur permettant de découvrir des comportements inattendus qui pourraient être modifiés. Ainsi ces résultats appuient notre hypothèse selon laquelle les utilisateurs sont plus impliqués dans l'analyse de leurs données grâce à notre méthode. Cette implication leur permet de trouver des modifications pertinentes qui conviennent à leur comportement tout en leur permettant d'économiser de l'énergie.

Limitations

Les participants auraient souhaité tester des modifications qui ne sont pas actuellement possibles. Par exemple le Participant 2 a noté que deux lavages en machine avaient été faits le même jour. Ce participant aurait voulu vérifier si un seul lavage en machine plein aurait consommé moins d'énergie que deux lavages à moitié plein. Les participants auraient également souhaité tester si les appareils de cuisson comme les plaques électriques ou le four consomment moins d'énergie lorsqu'ils sont utilisés plus longtemps mais à une température plus basse. Ces scénarios ne sont actuellement pas applicables dans notre outil car ils requièrent de pouvoir comparer les deux cas de façon précise. Aussi, le Participant 1 a supprimé les périodes de chauffage du chauffe-eau ayant lieu l'après-midi, car celui-ci n'était pas utilisé. Toutefois le chauffe-eau était probablement en train de chauffer de l'eau en prévision d'une utilisation future. Cette modification montre la complexité de la modélisation des appareils de chauffage, dont l'utilisation directe par le participant peut être décalée par rapport à la consommation d'énergie. Nous discutons de l'application de scénarios plus précis ainsi que de la modélisation des appareils de chauffage en tant que perspectives (voir 8.2.1).

5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux études menées en laboratoire à partir de données réelles. Ces deux études avaient pour but d'étudier l'efficacité de notre méthode *what if*, implémentée dans le système *Activelec*, pour trouver des modifications dans l'utilisation des appareils permettant d'économiser de l'énergie. Les deux études montrent que notre méthode est efficace pour cet objectif. En effet, tous les participants ont réussi à analyser l'utilisation des appareils, leur consommation et également à appliquer des modifications efficaces. De plus les modifications trouvées par les participants ont dans l'ensemble été jugées comme étant faciles à appliquer en réalité. Ces appréciations de l'effort à fournir montrent la capacité du système à aider les utilisateurs dans la balance du compromis entre les économies d'énergie et le maintien du confort. Aussi les entretiens menés à la fin des expérimentations font ressortir une appréciation de la méthode d'interaction par les utilisateurs. Les participants ont en effet aimé

pouvoir appliquer des sélections et des modifications, dont l'impact est immédiatement évaluable sur la visualisation. Ces résultats montrent que l'approche *what if* est efficace pour trouver des modifications concrètes permettant d'économiser de l'énergie, tout en évitant à l'utilisateur de fournir trop d'effort.

Lors de la première expérimentation, les participants n'ont pas utilisé leurs propres données. Cette étude a en effet été élaborée pour tester l'utilisabilité de la méthode, avec succès. Toutefois cette première étude n'a pas permis d'étudier l'apport des connaissances des participants sur leurs propres données. Cette limitation a été comblée par la seconde expérimentation, dans laquelle les participants utilisaient leurs propres données de consommation. Cette expérimentation a montré que notre méthode permet aux utilisateurs de s'approprier leurs données, en particulier grâce à l'interaction. Les participants ont en effet trouvé des modifications dans l'utilisation des appareils que seuls eux pouvaient découvrir.

Les deux expérimentations présentées dans ce chapitre ont été menées de façon contrôlée en laboratoire. Ces deux expérimentations sont un succès mais montrent toutefois des limitations. Tout d'abord, le contexte d'utilisation en laboratoire est différent d'une utilisation à domicile. Cette différence de contexte peut influencer l'utilisation du système par les utilisateurs, ainsi que les résultats obtenus en termes de modifications appliquées ou ressenti utilisateur. Aussi le temps d'utilisation du système était de 30 minutes environ au cours des expérimentations menées, et ce en une seule fois. Nous n'avons ainsi pas pu évaluer les conséquences d'une utilisation répétée du système sur les modifications trouvées, ainsi que sur la manière dont le système était utilisé. Enfin nous n'avons pas pu étudier l'application des modifications en vrai par les utilisateurs, ou même leur volonté de les appliquer. Une expérimentation *in-situ* dans les logements des participants est donc nécessaire pour combler ces limitations. Le chapitre suivant présente ainsi une étude de terrain dans laquelle nous avons déployé le système *Activelec* dans des logements privés.

Chapitre 6

Déploiement et évaluation du système *Activelec* dans des logements personnels

Le système *Activelec* et avec lui l'approche *what if* appliquée à la visualisation de la consommation électrique ont été testés avec succès lors de deux expérimentations en laboratoire, présentées dans le Chapitre 5. Ces deux expérimentations étaient nécessaires afin d'évaluer l'utilisabilité du système, mais elles montrent des limitations. Il est donc nécessaire d'évaluer notre méthode et le système *Activelec* qui l'implémente dans des conditions domestiques réelles. En particulier nous souhaitons évaluer l'utilisation au quotidien du système et la possibilité d'appliquer les modifications en vrai par les participants sur leurs appareils. Dans ce chapitre nous présentons ainsi le déploiement *in-situ* du système *Activelec* dans des logements privés. Ce déploiement a pour but l'évaluation de notre approche *what if* en contexte domestique réel.

Nous commençons ce chapitre par la présentation des objectifs de l'expérimentation (6.1). Nous détaillons ensuite le matériel utilisé (6.2). Nous poursuivons par la présentation du protocole de l'expérimentation (6.3). Puis nous présentons le contexte de l'expérimentation, plus précisément les logements, participants et leurs appareils (6.4). Nous exposons ensuite les résultats quantitatifs (6.5) et qualitatifs (6.6). Enfin nous discutons des résultats obtenus et de leurs implications (6.7).

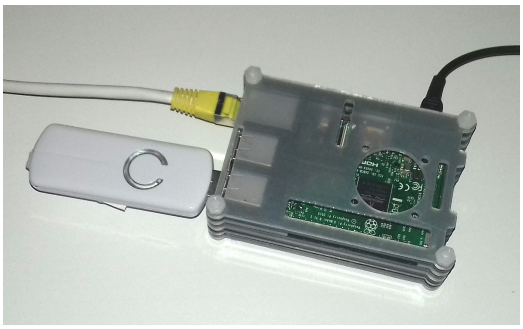
6.1 Objectifs

6.1.1 Évaluation de l'approche *what if* en contexte réel

Le premier objectif de cette expérimentation *in-situ* est de recueillir les impressions des utilisateurs sur notre approche *what if*. Même si nous évaluons également le système *Activelec* lui-même comme nous le présentons par la suite (6.1.2), notre priorité est l'évaluation de l'application d'un paradigme *what if* en conditions domestiques réelles. Notre approche devrait permettre aux utilisateurs d'analyser leur comportement ainsi que la consommation de leurs appareils électriques. Elle devrait également les aider à trouver des actions de comportement concrètes afin de diminuer la consommation. Prouver un changement de comportement nécessite une étude de long terme et relève d'avantage de la psychologie environnementale que de l'IHM [57]. Ainsi dans cette expérimentation nous ciblons avant tout l'étude de l'interaction permise par notre approche. Toutefois nous commentons les modifications trouvées par les utilisateurs et les mettons en relation avec les utilisations observées dans les données réelles. Lors d'un entretien final nous demandons également aux utilisateurs s'ils ont appliqué en réalité des modifications trouvées dans le système, ou s'ils comptent en appliquer. Ce déploiement du système en conditions réelles permet également d'évaluer la pertinence du modèle de données utilisé. En particulier cette expérimentation illustre le potentiel du modèle de données pour la modélisation d'appareils divers.

6.1.2 Évaluation du système *Activelec*

L'expérimentation *in-situ* permet l'évaluation de la conception du système en lui-même. La conception des systèmes *eco-feedback* a en effet une grande influence sur leur efficacité [100], c'est donc un point clé à évaluer. Nous avons déjà évalué avec succès la conception de *Activelec* lors d'études en laboratoire. Toutefois les utilisations répétées et potentiellement plus longues du système permettent d'évaluer d'avantage l'interaction avec le système que nos études précédentes. Nous évaluons particulièrement la visualisation et les moyens d'interaction, qui doivent permettre aux utilisateurs de trouver et d'appliquer des scénarios de changement dans l'utilisation des appareils. Cette expérimentation sert aussi à étudier le type d'utilisations du système par les participants. Soit le système est utilisé de manière répétée et les utilisateurs trouvent des modifications au fur et à mesure de l'expérimentation, soit les modifications sont principalement découvertes lors des premières utilisations. Enfin nous évaluons la capacité du système à être utilisé en pratique avec du matériel ne nécessitant ni un investissement important ni une installation complexe.



(a)

(b)

(c)

Figure 6.1 – *Matériel déployé chez les participants pour la récolte des données de consommation lors de l'expérimentation.* **(a)** Raspberry Pi 3 *[109] associé à une clé* Z-Wave *[145], et raccordé à un câble d'alimentation et un câble Ethernet.* **(b)** *Prise de mesure* Fibaro Wall Plug *[54].* **(c)** *Prise de mesure* Aeon Smart Switch *[5].*

6.2 Matériel

Dans les expérimentations que nous avons précédemment menées en laboratoire, nous utilisons des données ayant été récoltées au préalable. Dans cette expérimentation *in-situ*, il est nécessaire de récolter les données des utilisateurs dans leur propre logement. Non seulement nous récoltons les données de l'utilisateur avant l'utilisation du système, mais nous récoltons également les données pendant la période d'utilisation du système. En effet, afin de présenter à l'utilisateur une version des données de consommation à jour, ces données doivent être téléchargées par le système *Activelec*. Nous utilisons donc un ensemble de dispositifs qui permettent la récolte des données de consommation des appareils électriques d'un logement ainsi que la transmission de ces données au système. Le matériel ainsi utilisé est prêté aux participants durant l'expérimentation. Le système *Activelec* est quant à lui installé sur un ordinateur personnel des participants.

Nous utilisons un nano-ordinateur *Raspberry Pi 3* [109] en guise de système domotique (voir 1.2.2). Ce nano-ordinateur est associé à un récepteur utilisant le protocole *Z-Wave* [145], permettant de recevoir les données d'appareils connectés utilisant ce protocole. Cet ensemble, visible sur la Figure 6.1a, est connecté par câble Ethernet à l'ordinateur personnel des participants sur lequel est installé *Activelec*. Le logiciel libre *DomotiGa* [42] est installé sur le *Raspberry Pi*. Ce logiciel permet l'association et la paramétrisation de prises de mesure *Z-Wave*, la réception de leurs données et le stockage de ces données dans une base de données *MySQL*. Nous utilisons des prises de mesure *Fibaro Wall Plug* [54] (Figure 6.1b) qui transmettent la puissance instantanée des appareils au *Raspberry Pi 3* via le protocole *Z-Wave*. Nous avons choisi ces prises en raison de leur facilité d'installation et de leur précision. La puissance maximale de ces prises est toutefois limitée à 2500 watts, ce qui est insuffisant pour la récolte des données de consommation des lave-linges. Ces appareils peuvent en effet montrer des pics de puis-

sance instantanée allant jusqu'à 3000 watts lors du chauffage de l'eau. Nous utilisons donc une prise de mesure supplémentaire *Aeon Smart Switch* [5] (Figure 6.1c), dont la puissance maximale est de 3000 watts, pour mesurer la consommation des lave-linges. La capture de données se fait avec une fréquence d'environ 5 secondes.

6.3 Protocole

Nous présentons ici le protocole de l'expérimentation qui comprend trois étapes principales. Nous effectuons tout d'abord une récolte de données initiales d'une durée d'environ un mois. Cette phase de récolte est suivie de la phase d'utilisation du système, comprise entre un et deux mois. Enfin nous conduisons un entretien final avec les participants à la fin de cette phase d'utilisation. Au total la durée de l'expérimentation est comprise entre deux et trois mois.

6.3.1 Récolte de données initiale

La première étape du protocole est une visite effectuée chez les participants par un expérimentateur. Suite à la découverte du logement des participants ainsi que de leurs appareils électriques, un ensemble d'appareils à instrumenter est choisi par l'expérimentateur. Le matériel de récolte de données est ensuite installé et testé, afin d'enregistrer les données de consommation à partir de cette première visite. Nous conduisons également un entretien avec les participants, identique à celui des études précédentes en laboratoire (voir 5.1.1), afin de recueillir leurs connaissances en visualisation et en énergie. Des questions portant sur les types d'utilisation des appareils sont ensuite posées aux participants afin de pouvoir définir leurs états dans le système *Activelec*. Afin d'éviter tout biais, nous ne posons pas de questions relatives ni à la fréquence d'utilisation des appareils ni à leur durée d'utilisation. La définition des états des appareils est effectuée par l'expérimentateur. Ces états ne sont pas notifiés aux participants qui les découvrent lors de l'installation du système dans la phase suivante. Pour que les participants puissent effectuer une analyse efficace et aussi pour pouvoir appliquer des modifications dans le système *Activelec*, il est nécessaire de récolter une quantité minimale de données. Ainsi lors de cette première phase, nous installons uniquement le matériel de récolte et les participants n'ont pas accès aux données de consommation mesurées. Cette phase de récolte des données dure trois semaines. Nous demandons aux participants de ne pas tenter d'accéder à ces données, qui sont protégées par mot de passe. Les données récoltées pendant cette période sont présentées dans la Section 6.4.

6.3.2 Installation de *Activelec*

A la fin de la première phase le système *Activelec* est installé par un expérimentateur sur un ordinateur personnel des participants. L'installation est suivie d'une étape d'apprentissage d'environ 25 minutes, qui est identique à la phase d'apprentissage des études menées en laboratoire (voir 5.1.3). Nous utilisons des données de consommation d'appareils électriques ne provenant pas du logement lors de cette phase. Durant la première partie de cette étape d'apprentissage les participants découvrent le système et ses fonctionnalités grâce aux explications de l'expérimentateur. Puis les participants reproduisent deux modifications données par l'expérimentateur sur deux appareils différents en guise d'exercice. Avant de conclure l'étape d'apprentissage nous demandons aux participants s'ils ont des questions supplémentaires. Afin d'éviter tout biais l'expérimentateur n'assiste pas à la première utilisation réelle du système par les participants, dans laquelle ceux-ci découvrent leurs données pour la première fois.

6.3.3 Utilisation de *Activelec*

Les participants sont ensuite libres d'utiliser le système à leur souhait pendant la phase d'utilisation. Nous demandons aux participants d'utiliser au moins deux fois le système pendant cette phase. Comme pour la phase de récolte les participants ont pour consigne de ne pas tenter d'accéder aux données brutes récoltées sur le *Raspberry Pi 3*, mais d'utiliser uniquement le système *Activelec* pour analyser leurs données. La durée de la phase d'utilisation est comprise entre un et deux mois. Au cours de cette phase, nous enregistrons toutes les interactions réalisées par les utilisateurs dans le système, comprenant notamment les temps d'utilisation, les appareils sélectionnés et les sélections et modifications appliquées.

6.3.4 Entretien final

Lorsque la phase d'utilisation du système est terminée, un entretien semi-structuré d'une durée d'environ une heure est conduit avec les participants. Cet entretien porte sur les modifications appliquées dans le système *Activelec* et sur le ressenti des utilisateurs vis à vis de la méthode *what if*. En particulier nous demandons aux participants si des modifications trouvées grâce au système ont été appliquées au quotidien, ou s'ils envisagent leur application. Nous recueillons également l'avis des participants sur la méthode *what if* telle qu'ils l'ont utilisée, en particulier s'ils ont apprécié cette approche et si l'interaction leur a permis une meilleure analyse que la visualisation seule. Nous leur demandons également leur avis sur chaque élément de conception du système : décomposition des données des appareils en états et instances, visualisation, techniques de sélection et modifications. Nous analysons ensuite les réponses des participants. En particulier nous récoltons les modifications que les participants souhaiteraient appliquer

Logement	Participants	Situation familiale	Appareils instrumentés
Logement 1	P1 et P2	Couple	Ordinateur Télévision Lave-linge Cafetière
Logement 2	P3	Seul(e)	Ordinateur Enceintes Four micro-ondes Lampe de chevet
Logement 3	P4 et P5	Couple	Ordinateur fixe Télévision Lave-linge Lampes de bureau Bouilloire Four

Figure 6.2 – *Nombre de participants et appareils instrumentés pour chaque logement de l'expérimentation.*

en réalité, les éléments de conception qu'ils ont le plus appréciés et les limitations du système qu'ils ont indiquées.

6.4 Logements, participants et appareils

6.4.1 Logements

Trois logements comprenant au total cinq participants (deux couples et une personne seule) ont participé à l'expérimentation. Les logements sont tous des appartements situés en ville, dont la superficie est inférieure à 50m^2. Tous les logements possèdent une chambre séparée du salon. Aucun des participants n'est propriétaire de son logement. Dans chaque logement, les appareils instrumentés sont situés dans au moins deux pièces. Par exemple la cafetière du logement 1 est située dans la cuisine, qui est séparée du salon.

6.4.2 Participants

De même que pour les expérimentations conduites en laboratoire (voir 5.1.1), nous ciblons une population d'utilisateurs habitués à l'utilisation de moyens informatiques et

ayant un minimum de capacités en visualisation. Toutefois nous ciblons des participants qui ne sont experts ni en visualisation ni en consommation électrique. Les participants sont des doctorants recrutés à l'université qui correspondent à la population ciblée. Selon le questionnaire préalable effectué lors de la première visite, les participants sont motivés par les économies d'énergie mais n'ont pas de connaissances approfondies du domaine de la consommation d'électricité. Plus précisément, ils savent différencier puissance et énergie et peuvent classer des appareils communs selon leur consommation mais ne connaissent pas leurs ordres de grandeur de consommation, ni en kWh ni en euros.

6.4.3 Appareils et données

Nous choisissons un sous-ensemble d'appareils électriques à instrumenter dans chaque logement. Les compositions des logements et les appareils instrumentés sont présentés sur la Figure 6.2. Les appareils instrumentés sont des lumières, appareils de cuisine, lave-linges et appareils multimédia. Nous n'instrumentons pas les systèmes de chauffage et les réfrigérateurs qui ne sont pas supportés par le système *Activelec*. En effet leur consommation dépend de paramètres externes, principalement la température, qui ne sont pas pris en compte dans le modèle de données utilisé. Le but étant d'étudier l'interaction avec les appareils individuels instrumentés, nous ne récoltons pas la consommation totale du logement. Les Figures 6.3, 6.4 et 6.5 présentent les appareils respectifs des trois logements, leurs consommations totales, leurs états ainsi qu'une description de leurs utilisations au cours de la période de récolte.

Logement 1

Dans le logement 1 nous avons instrumenté 4 appareils : l'ordinateur fixe, la télévision, le lave-linge et la cafetière. A l'exception de l'ordinateur, les appareils de ce logement sont peu consommateurs. Les états de veille de l'ordinateur et de la télévision sont peu consommateurs d'énergie, ce qui limite l'application de modifications simples se résumant à la suppression de périodes de veille. L'ordinateur n'est presque jamais mis en veille, il est laissé dans l'état *allumé non utilisé* lorsqu'il n'est pas utilisé. La télévision est quant à elle toujours en veille lorsqu'elle n'est pas utilisée. Dans ce logement, nous avons pu modéliser les différences d'utilisation de l'ordinateur lorsqu'il est allumé. En plus d'une utilisation classique qui correspond par exemple à une navigation sur internet, l'ordinateur peut en effet être allumé sans être utilisé. Il peut également réaliser des calculs en utilisant la carte graphique, ce qui correspond à une consommation d'énergie importante. Les deux états *allumé non utilisé* et *calcul* correspondent à eux seuls à 73% environ de la consommation d'énergie de l'ordinateur, ce qui montre l'importance de les séparer de l'état *allumé*, correspondant à une utilisation classique. A noter que le lave-linge consomme relativement peu d'énergie, en comparaison de l'ordinateur et de la télévision. Les participants utilisent principalement le lavage à 30°, bien moins consom-

Appareil	Coût par mois (€)	États	Cons. rel. de l'état	Utilisation de l'état
Ordinateur	2.72	Calcul	31.8%	1h / jour
		Allumé	24.0%	2h 30min. / jour
		Allumé non utilisé	41.6%	6h / jour
		En veille	2.4%	30min. / jour
		Éteint	0.2%	14h / jour
Télévision	0.98	Allumée	96.5%	6h 30min. / jour
		En veille	3.5%	17h 30min. / jour
		Éteinte	0.0%	Jamais
Lave-linge	0.49	Lavage 40°	41.3%	0.4 lavage / semaine
		Lavage 30°	46.7%	1.3 lavages / semaine
		Éteint	0.0%	Le reste du temps
Cafetière	0.47	Allumée	70.2%	20min. / jour
		Éteinte	29.8%	23h 40min. / jour

Figure 6.3 – *Description des données des appareils du logement 1 pendant la période de récolte, précédent la mise en place du système. La seconde colonne contient le coût mensuel de l'énergie consommée par l'appareil, exprimé en euros. La troisième colonne présente les différents états de l'appareil, et la quatrième la consommation relative de l'état par rapport à la consommation de l'appareil. Cette consommation correspond à la proportion d'énergie consommée par l'appareil lorsqu'il est dans cet état. Enfin la dernière colonne présente l'utilisation moyenne des états des appareils pendant la période de récolte des données.*

mateur que le lavage à 40°. Enfin nous pouvons remarquer que la cafetière consomme une proportion non négligeable d'énergie lorsqu'elle est éteinte, avec environ 30% de la consommation de cet appareil. Nous avons en effet modélisé avec l'état *éteint* les périodes où la cafetière n'était pas utilisée, mais celle-ci consomme tout de même de l'énergie en raison d'un affichage de l'heure. La cafetière étant peu utilisée, cet affichage même peu consommateur correspond alors à une proportion importante de l'énergie de la cafetière.

Logement 2

Nous avons instrumenté 4 appareils dans le logement 2 : l'ordinateur fixe, les enceintes, le four micro-ondes et la lampe de chevet. Aucune télévision n'est présente dans ce logement. Les enceintes sont raccordées à l'ordinateur et sont utilisées à des périodes de temps similaires. Ces deux appareils sont toujours laissés en veille lorsqu'ils ne sont pas utilisés. Si l'état de veille de l'ordinateur est peu consommateur avec environ 3% de consommation relative, celui des enceintes correspond en revanche à 26% de l'énergie

Appareil	Coût par mois (€)	États	Cons. rel. de l'état	Utilisation de l'état
Ordinateur	6.11	Allumé	97.1%	9h 30min. / jour
		En veille	2.9%	14h 30min. / jour
		Éteint	0.0%	Jamais
Enceintes	0.98	Allumées fort	61.2%	9h 30min. / jour
		Allumées	12.7%	3h / jour
		En veille	26.1%	11h 30min. / jour
		Éteintes	0.0%	Jamais
Four micro-ondes	0.58	Chauffage	17.2%	1 min. / jour
		En veille	82.8%	Le reste du temps
		Éteint	0.0%	Jamais
Lampe	0.07	Allumée	100.0%	20 min. / jour
		Éteinte	0.0%	23h 40min. / jour

Figure 6.4 – *Description des données des appareils du logement 2 pendant la période de récolte, précédent la mise en place du système. Voir la Figure 6.3 pour une description des colonnes.*

de cet appareil. Le four micro-ondes est peu utilisé, ce qui explique que son état de veille consomme la quasi totalité de l'énergie de cet appareil. Enfin la lampe de chevet est peu utilisée.

Logement 3

6 appareils ont été instrumentés dans le logement 3 : l'ordinateur fixe, la télévision, le lave-linge, les lampes de bureau, la bouilloire et le four. Comme dans les autres logements, l'ordinateur est l'appareil le plus consommateur en raison de sa durée d'utilisation importante. Lorsqu'il n'est pas utilisé, il est laissé en veille mais cet état de veille représente une consommation peu importante, avec 3% de consommation relative. La télévision quant à elle est toujours laissée en veille, et sa consommation dans cet état est significative car elle représente 72% de la consommation de cet appareil. Comme pour le logement 1, le lave-linge consomme moins d'énergie que l'ordinateur et la télévision. Nous n'avons pu modéliser qu'un seul type de lavage du lave-linge, qui est le seul utilisé par les participants du logement 3. Nous avons instrumenté deux lampes présentes dans le bureau de ce logement, proches de l'ordinateur. Les participants utilisent une lampe ou deux selon le niveau de luminosité souhaité. Nous avons donc modélisé ces deux lampes comme un seul appareil, dont l'état correspond au niveau de luminosité souhaité (une ou deux lampes). Enfin la bouilloire et le four sont les deux appareils les moins consommateurs de ce logement. Le four est principalement utilisé pour réchauffer des plats, ce qui explique ses utilisations courtes.

Appareil	Coût par mois (€)	États	Cons. rel. de l'état	Utilisation de l'état
Ordinateur	6.34	Allumé	97.0%	16h / jour
		En veille	3.0%	8h / jour
		Éteint	0.0%	Jamais
Télévision	2.77	Allumée	28.0%	1h 30min. / jour
		En veille	72.0%	22h 30min. / jour
		Éteinte	0.0%	Jamais
Lave-linge	0.46	Lavage	100.0%	1.8 lavages / semaine
		Éteint	0.0%	Le reste du temps
Lampes	0.19	Deux lampes	58.8%	1h / jour
		Une lampe	40.9%	1h 15 min. / jour
		Éteintes	0.3%	21h 45 min. / jour
Bouilloire	0.18	Remplissage haut	15.2%	0.5 chauffage / semaine
		Remplissage moyen	22.6%	1 chauffage / semaine
		Remplissage bas	62.2%	6.6 chauffages / semaine
		Éteinte	0.0%	Jamais
Four	0.12	Fort	85.8%	40sec. / jour
		Moyen	11.3%	20sec. / jour
		Faible	1.8%	1min. / jour
		Éteint	1.1%	Le reste du temps

Figure 6.5 – *Description des données des appareils du logement 3 pendant la période de récolte, précédent la mise en place du système. Voir la Figure 6.3 pour une description des colonnes.*

6.5 Résultats quantitatifs

Nous présentons dans cette section les résultats quantitatifs de l'expérimentation. Ceux-ci sont tirés des logs d'utilisation depuis lesquels nous extrayons les modifications appliquées ainsi que toutes les interactions réalisées. Ces données sont ensuite confirmées par les utilisateurs lors de l'entretien final.

6.5.1 Utilisations

A partir des logs d'utilisation du système, nous extrayons le nombre d'utilisations ainsi que les durées d'utilisation du système. Dans le logement 1, le système a été utilisé quatre fois. La première fois pour une durée d'environ une heure, puis les autres fois pour une durée comprise entre 15 et 20 minutes. Dans le logement 2, le système a été utilisé trois fois, pour une durée de 45 minutes la première fois et d'une durée comprise

entre 15 minutes et 20 minutes pour les autres fois. Dans le logement 3 le système a également été utilisé trois fois pour des durées respectives de 5, 15 et 20 minutes. Les participants du premier logement ont donc utilisé le système plus longtemps au total. Comme nous l'expliquons par la suite (6.5.2), ces participants se sont montrés plus impliqués dans l'analyse de leurs données.

Les participants des deux premiers logements ont utilisé le système plus longtemps lors de la première utilisation. En effet, les participants de ces logements ont passé du temps lors de cette première utilisation pour découvrir l'application et leurs données. Ils ont tout d'abord découvert la modélisation de leurs appareils en états, avant de tester l'application des sélections et des modifications. Toutefois les participants du logement 3 ont utilisé le système rapidement une première fois pour le découvrir, puis ont recherché des modifications lors de l'utilisation suivante. Dans tous les logements, les modifications trouvées par les participants l'ont été lors des deux premières utilisations. Lors des utilisations suivantes les participants ne trouvent que peu de modifications. Comme dit par P3 : "J'avais trouvé toutes mes modifications lors de la première utilisation. Je l'ai utilisé une ou deux fois ensuite pour essayer d'en trouver d'autres, mais je n'en ai pas ajoutée."

6.5.2 Analyse des appareils

Temps d'analyse

La Figure 6.6 présente les statistiques d'analyse des appareils par les participants, pendant la phase d'utilisation du système. Ces statistiques sont tirées des logs d'utilisation du système. Nous pouvons noter que les appareils les plus consommateurs ont été d'avantage analysés par les participants que les autres. Les participants ont ainsi passé la majorité du temps sur l'analyse des ordinateurs, qui étaient les appareils les plus consommateurs de chaque logement. Les participants ont toutefois passé relativement peu de temps sur les lave-linges. Dans le logement 1, la modification appliquée sur cet appareil (changement de la température de lavage) a été rapidement trouvée par les participants. L'appareil n'a ensuite été que peu analysé. Dans le logement 3, un seul type de lavage était disponible et les participants n'ont pas voulu supprimer de lavages, qu'ils ont jugé nécessaires. De plus les lave-linges sont moins consommateurs que les ordinateurs et télévisions de ces logements. Au contraire des appareils consommateurs, les appareils relativement peu consommateurs comme le four du logement 3 ont été peu analysés. Cette différence montre la capacité du système à aider les utilisateurs à choisir les appareils intéressants sur lesquels se concentrer. Le four est en effet un appareil dont la puissance instantanée est supérieure à la majorité des autres appareils, mais dont la consommation totale est faible s'il est peu utilisé.

Logement	Appareil	Coût / mois (€)	Nb. d' analyses	% de temps	Nb. de sélections	Nb. de modif.
1	Ordinateur	2.72	26	66%	141	13
	Télévision	0.98	9	6%	18	4
	Lave-linge	0.49	9	6%	2	3
	Cafetière	0.47	18	22%	12	1
2	Ordinateur	6.11	6	52%	18	5
	Enceintes	0.98	6	38%	33	2
	Four micro-ondes	0.58	2	9%	1	1
	Lampe	0.07	2	1%	0	0
3	Ordinateur	6.34	5	34%	4	3
	Télévision	2.77	5	24%	79	5
	Lave-linge	0.46	5	4%	4	0
	Lampes	0.19	4	10%	1	1
	Bouilloire	0.18	3	27%	0	0
	Four	0.12	3	$< 1\%$	0	0

Figure 6.6 – *Statistiques d'analyse des appareils par les participants lors de l'expérimentation. La troisième colonne présente le coût moyen mensuel de l'énergie consommée par chaque appareil. La quatrième colonne contient le nombre de fois où cet appareil a été sélectionné par les participants afin d'être analysé en mode* instances *(voir 4.2.1). La colonne suivante présente la proportion du temps passé sur l'appareil, par rapport au temps total passé en mode* instances*. Les deux dernières colonnes présentent les nombres totaux respectifs de modifications et de sélections par critères appliquées sur l'appareil. Le nombre de sélections est équivalent au nombre de modifications de critères de sélection dans le système.*

Nombre de sélections

Le nombre de sélections par critères appliquées sur chaque appareil est variable selon les appareils. Par exemple dans le logement 1 les participants ont appliqué 141 sélections sur l'ordinateur, tandis qu'ils n'en ont appliqué que 2 sur le lave-linge. Ce nombre représentant le nombre de modifications de critères de sélections, ces chiffres montrent que les sélections ont été utilisé par les participants à des fins d'analyse des données. Les participants ont en effet beaucoup modifié les critères afin d'analyser l'utilisation de leurs appareils au cours du temps. C'est également le cas des enceintes du logement 2, et de la télévision du logement 3. A noter que les sélections directes n'ont été que peu utilisées par les participants. Ceux-ci les ont utilisé au début de la phase d'utilisation afin d'étudier l'application des modifications.

Nombre de modifications

Le nombre de modifications appliquées sur les appareils semble lié à leur consommation totale. Les appareils les plus consommateurs ont ainsi fait l'objet de plus de modifications. Par exemple, l'ordinateur du logement 1 a fait l'objet de 13 modifications différentes. La consommation de cet appareil représente en effet environ un tiers de la consommation totale des appareils instrumentés de ce logement. A noter que dans le logement 3, les participants ont appliqué plus de modifications sur la télévision que sur l'ordinateur, alors que ce dernier est plus consommateur. Ceci est explicable par le fait que les modifications appliquées sur l'ordinateur et voulant être conservées ont été trouvées plus rapidement par les participants. Certains appareils n'ont fait l'objet d'aucune modification, même si dans certains cas les participants ont passé un certain temps à leur analyse. C'est par exemple le cas de la bouilloire du logement 3. Comme indiqué lors de l'entretien final, l'utilisation de ces appareils est optimale du point de vue des participants et aucune modification ne peut alors être appliquée.

Différences d'engagement

Les statistiques d'analyse des appareils montrent un engagement plus important de la part des participants du logement 1, par rapport aux autres logements. Comme nous l'avons présenté auparavant, ces participants ont utilisé d'avantage le système en termes de nombre et de temps d'utilisations. Ils ont sélectionné plus d'appareils à analyser, avec un total de 62 sélections d'appareils contre 16 et 25 sélections pour les logements 2 et 3 respectivement. Ils ont également appliqué plus de sélections et de modifications que les participants des autres logements. Cet engagement ne semble pas lié à la consommation totale des appareils, qui est inférieure pour le logement 1 à celles des logements 2 et 3. La consommation de l'ordinateur de ce logement est toutefois supérieure à celle des autres appareils de l'expérimentation. Selon l'entretien final ces participants ont d'avantage utilisé l'unité environnementale de *Activelec* que les autres participants. Nous pouvons donc supposer que ces participants ont une motivation environnementale, ce qui entraîne un engagement plus important pour les économies d'énergie.

6.5.3 Modifications

Nous extrayons toutes les modifications testées dans le système *Activelec* à partir des logs d'utilisation. Lors de l'entretien final nous demandons aux participants si certaines de ces modifications ont été ou seront potentiellement appliquées en vrai sur leurs appareils. Ces dernières sont présentées sur la Figure 6.7. Des exemples d'autres modifications appliquées dans le système sont présentés sur la Figure 6.8. Cette figure ne présente que des modifications que les participants ne souhaitent pas appliquer en vrai, à l'exception des appareils pour lesquels seules des modifications voulant être appliquées en vrai ont

Logement	Appareil	Modifications	Gain relatif	Gain / mois (€)
1	Ordinateur	*Calcul* →*Allumé non utilisé*	38%	1.72
		Calcul limité à deux heures	46%	2.08
		Allumé non utilisé →*Éteint*	32%	1.47
	Cafetière	*Allumée* limité à 10 minutes	28%	0.14
	Lave-linge	*Lavage à 40°* →*Lavage à 30°*	22%	0.17
2	Ordinateur	*En veille* →*Éteint* si durée > 3 heures	3%	0.16
	Enceintes	*En veille* →*Éteintes*, 22h à 8h (semaine)	14%	0.36
		En veille →*Éteintes* si durée > 3 heures	25%	0.66
3	Ordinateur	*En veille* →*Éteint*	8%	0.39
	Télévision	*En veille* →*Éteinte*, 0h à 17h (semaine)	46%	1.28
		En veille →*Éteinte*, 0h à 12h (week-end)	12%	0.34

Figure 6.7 – *Modifications appliquées dans le système par les participants lors de l'expérimentation et déclarées appliquées ou voulant être appliquées en vrai sur les appareils. "→" représente une modification d'état des instances de l'appareil. "(semaine)" et "(week-end)" représentent les jours choisis pour la sélection des instances modifiées, accompagnés des heures de la journée sélectionnées. Chaque modification est associée à ses gains potentiels en termes de prix par mois et de pourcentage de l'énergie de l'appareil. Ces gains sont estimés dans le système* Activelec *sur les données récoltées avant l'utilisation du système.*

été testées. C'est le cas du lave-linge du logement 1 et des enceintes du logement 2. Les gains des modifications présentées sur les Figures 6.7 et 6.8 sont estimés dans le système *Activelec*. Ces gains sont calculés sur les données récoltées avant la période d'utilisation du système afin d'éviter un impact d'éventuels changements de comportement. Les modifications dont l'application réelle n'est pas considérée par les participants sont parfois proches d'une modification souhaitant être appliquée réellement, ce qui montre que les participants ont parfois raffiné leurs modifications. Les autres modifications, qui sont différentes des modifications retenues, montrent que les participants ont abandonné ces modifications car elles n'étaient pas jugées rentables en termes de ratio entre effort à fournir et économies réalisées.

Logement 1

Dans le logement 1, 21 modifications différentes ont été testées. Parmi ces modifications, 5 ont été identifiées comme voulant être ou étant appliquées en vrai. Dans ce logement, P2 utilisait l'ordinateur pour des calculs scientifiques au moment de l'expérimentation (état *calcul* dans le tableau), ce qui consomme beaucoup d'énergie. Les participants ont donc voulu estimer le gain réalisé si ces calculs n'étaient pas effectués sur l'ordinateur. Les participants se sont également rendu compte du potentiel d'économie de l'extinc-

Logement	Appareil	Modifications	Gain relatif	Gain / mois (€)
1	Ordinateur	*Éteint* et *Allumé non utilisé* →*En veille*	30%	4.61
	Télévision	*Allumée* →*Éteinte* à 21h	11%	0.32
	Lave-linge	*Lavage à 40°* →*Lavage à 30°* *	22%	0.17
	Cafetière	*Allumée* limité à 15 minutes	20%	0.34
2	Ordinateur	*En veille* →*Éteint* si durée > 3 heures	3%	0.16
	Enceintes	*En veille* →*Éteintes* si durée > 3 heures *	25%	0.66
	Four micro-ondes	*En veille* →*Éteint*	83%	0.48
3	Ordinateur	*En veille* limité à une heure	7%	0.36
	Télévision	*En veille* →*Éteinte*	61%	1.70
	Lampes	*Deux lampes* →*Une lampe*	19%	0.04

Figure 6.8 – *Exemples de modifications testées dans le système par les participants lors de l'expérimentation. Les participants ont déclaré ne pas vouloir appliquer ces modifications en vrai, à l'exception des appareils pour lesquelles seules des modifications dont les participants considèrent l'application réelle ont été appliquées (symbole *). Seuls les appareils sur lesquels des modifications ont été appliquées sont présents dans ce tableau. Chaque modification est associée à ses gains potentiels en termes de prix par mois et de pourcentage de l'énergie de l'appareil. Ces gains sont estimés dans le système* Activelec *sur les données récoltées avant l'utilisation du système.*

tion (ou même de la mise en veille) de l'ordinateur lorsque celui-ci est allumé sans être utilisé. Ces modifications n'ont pas été appliquées pendant l'expérimentation mais les participants ont déclaré vouloir les appliquer en vrai par la suite. A noter que les participants n'envisagent pas l'application de toutes les modifications de l'ordinateur, mais d'un sous-ensemble d'entre elles. Par exemple, les modifications *calcul* →*allumé non utilisé* et *allumé non utilisé* →*éteint* engendrent une ambiguïté si elles sont appliquées ensemble. Il est alors possible d'appliquer soit uniquement la première modification, soit les deux dernières de ce logement sur la Figure 6.7. Enfin les participants ont déclaré avoir appliqué la modification sur le lave-linge qui implique un passage de *lavage à 30°* à *lavage à 40°*.

Les participants de ce logement ont testé un nombre important de modifications sans vouloir les appliquer en vrai, 16 au total. Ils ont par exemple évalué l'impact qu'aurait une utilisation quasi permanente de l'état *en veille* de l'ordinateur sur sa consommation, à la place des états *éteint* et *allumé non utilisé*. Bien que remplacer l'état *éteint* par l'état *en veille* est plus consommateur, la modification permet d'économiser environ 30% de l'énergie de l'ordinateur car l'état *allumé non utilisé* est consommateur et cet état est très souvent présent (voir Figure 6.3). Les participants ont toutefois préféré retenir

comme modification une extinction de l'ordinateur, car son démarrage est rapide. Ils ont également évalué l'impact d'une extinction de la télévision après 21 heures, mais n'ont pas retenu son application en raison de l'effort nécessaire pour appliquer cette modification en réalité. Aussi la modification limitant l'utilisation de la cafetière à 15 minutes n'a pas été retenue, au contraire de celle limitant son utilisation à 10 minutes, qui permet d'économiser d'avantage d'énergie avec un effort similaire.

Logement 2

Dans le logement 2, P3 a testé un total de 8 modifications sur les appareils, parmi lesquelles 3 ont été déclarées ayant été appliquées lors de l'expérimentation. Ces modifications ciblent l'ordinateur et les enceintes, qui restent en veille en permanence lorsqu'ils ne sont pas utilisés. Or si l'ordinateur consomme peu en veille, ce n'est pas le cas de la chaîne hi-fi. P3 a déclaré avoir appliqué ces modifications en vrai sur ses appareils. Comme nous le présentons par la suite (6.5.4) l'impact des modifications appliquées en vrai sur les enceintes est visible sur les données de consommation de cet appareil.

5 modifications dont l'application réelle n'est pas considérée ont été testées dans le système par ce participant. Une modification supprimant les périodes de veille du micro-ondes a été testée et les économies qu'elle permettrait de réaliser sont non négligeables. Le participant n'a toutefois pas retenu cette modification car elle demanderait trop d'effort pour être appliquée en vrai. Le four micro-ondes ne peut en effet pas être totalement éteint sans être débranché. Le participant de ce logement a également testé plusieurs modifications sur l'ordinateur (5), qui sont proches de la modification retenue. Ces modifications montrent un raffinement progressif de la modification finale présentée sur la Figure 6.7.

Logement 3

Dans le logement 3, les participants ont testé un total de 9 modifications sur les appareils. Parmi ces modifications, les participants ont déclaré avoir l'intention d'en appliquer 3 par la suite sur leurs appareils. Ces modifications visent la télévision et l'ordinateur fixe, qui sont en veille en permanence lorsqu'ils ne sont pas utilisés. Comme visible sur la Figure 6.5, les périodes de veille de l'ordinateur ne représentent pas une proportion importante de la consommation de cet appareil avec 3%, mais la consommation de cet appareil est toutefois importante comparée aux autres appareils. De plus cette modification a été jugée facile à appliquer en réalité car selon les participants l'ordinateur démarre rapidement. Au contraire de l'ordinateur de ce logement, les périodes de veille de la télévision correspondent à une proportion d'énergie importante (72%). Même si éteindre la télévision au lieu de la laisser en veille est jugé plus difficile par les participants de ce logement, cette proportion importante d'énergie les a motivés à

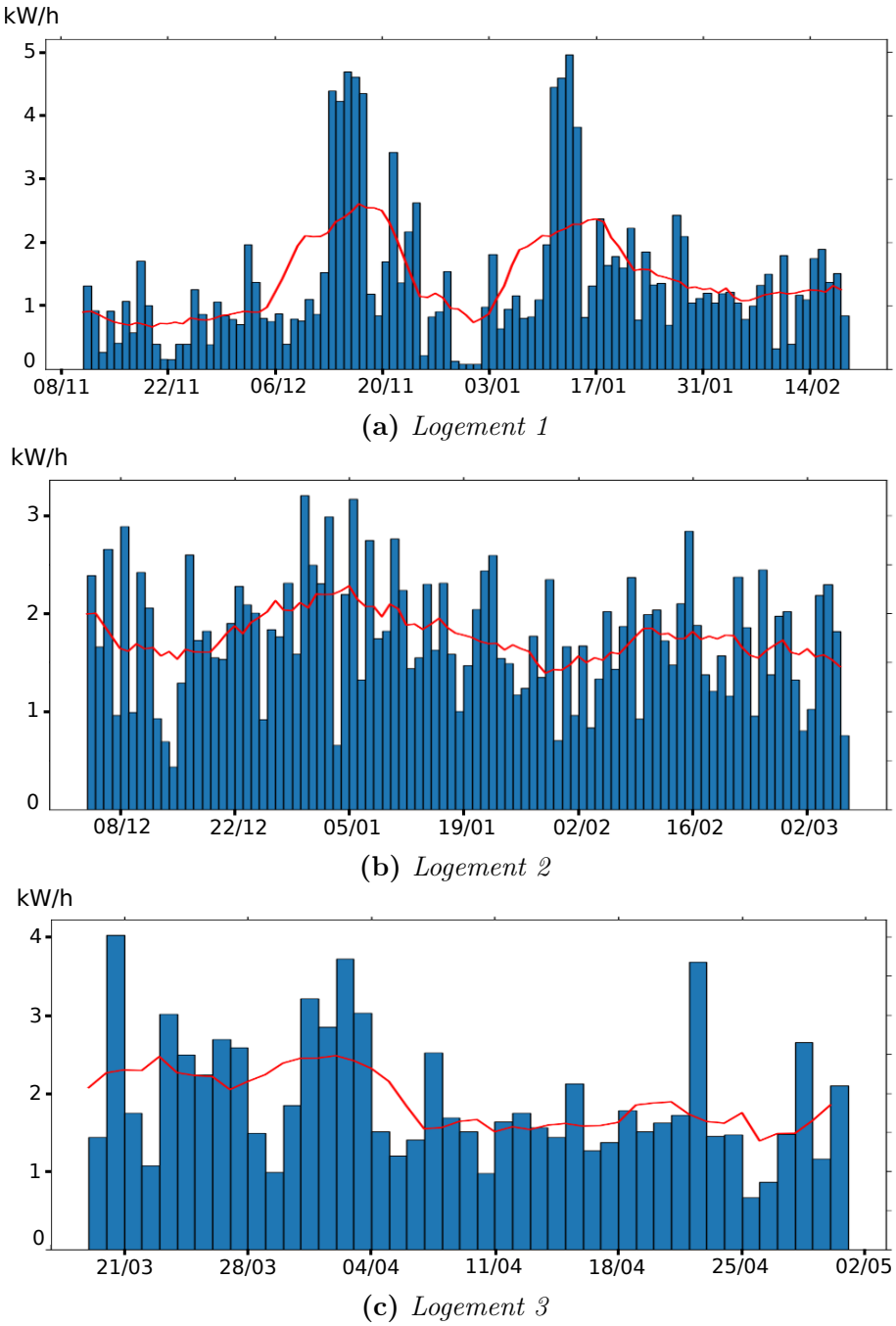
appliquer cette modification en vrai. En particulier les participants envisagent l'installation d'un programmateur permettant d'éteindre automatiquement la télévision pour éviter les périodes de veille.

Dans ce logement, 6 modifications dont l'application n'est pas considérée ont été testées. Par exemple, les participants ont testé l'application d'une modification limitant les périodes de veille de l'ordinateur à une heure. Toutefois ils ont jugé que la suppression totale de ces périodes de veille ne réclamait pas d'effort supplémentaire, et ont donc décidé d'appliquer cette modification. Les participants ont également testé la suppression de toutes les périodes de veille de la télévision, mais au contraire de l'ordinateur, celle modification a été jugée trop contraignante. Ils ont donc appliqué deux modifications plus spécifiques, en utilisant des critères temporels pour cibler certaines heures du week-end et de la semaine. Les exemples de ces deux appareils montrent ainsi que les participants de ce logement ont appliqué des modifications qu'ils ont ensuite raffinés selon leur rentabilité. Enfin, les participants ont évalué l'économie réalisée si une seule des deux lampes était utilisée, mais cette économie est faible en comparaison de la perte de luminosité induite par cette modification.

6.5.4 Consommation

Les modifications choisies par les participants et dont l'application est considérée permettraient d'économiser une moyenne de 30% de l'énergie des logements. Cette économie serait de 54% pour le logement 1, si l'on considère que les deux dernières modifications de l'ordinateur sur la Figure 6.7 sont appliquées (voir 6.5.3). Les économies des logements 2 et 3 seraient respectivement de 6% et 24%. Ces résultats sont relativement importants, même si nous devons insister sur le fait que ces modifications ne seront pas forcément appliquées réellement. Pour rappel, les pourcentages d'économies réalisables obtenus lors des deux expérimentations précédentes que nous avons menées en laboratoire sont respectivement de 36% et 14%. Rappelons que les systèmes *eco-feedback* permettent une économie réelle comprise entre 5% et 23% (voir 3.2). La différence d'économies réalisables entre les logements semble liée à leurs différences dans l'utilisation du système. Les participants du logement 1 ont ainsi utilisé le système plus de fois et plus longtemps, et ont appliqué plus de modifications, ce qui pourrait expliquer une économie supérieure aux autres logements.

La Figure 6.9 présente l'évolution de la consommation d'énergie cumulée des appareils instrumentés pour chaque logement, agrégée à la journée. Comme visible sur ces graphes, les consommations des logements sont variables et ont par exemple tendance à augmenter ou diminuer pendant les périodes de vacances. Pour le logement 1, la consommation est d'avantage variable en raison de la proportion importante de la consommation de l'ordinateur par rapport aux autres appareils. Les deux pics visibles correspondent en effet aux périodes où l'état *calcul* de l'ordinateur est utilisé. Aucune diminution de consommation significative n'est visible sur l'évolution des consomma-

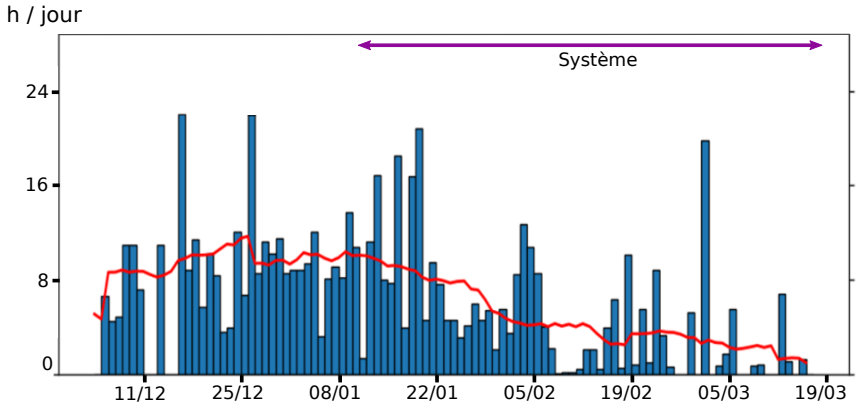


(a) *Logement 1*

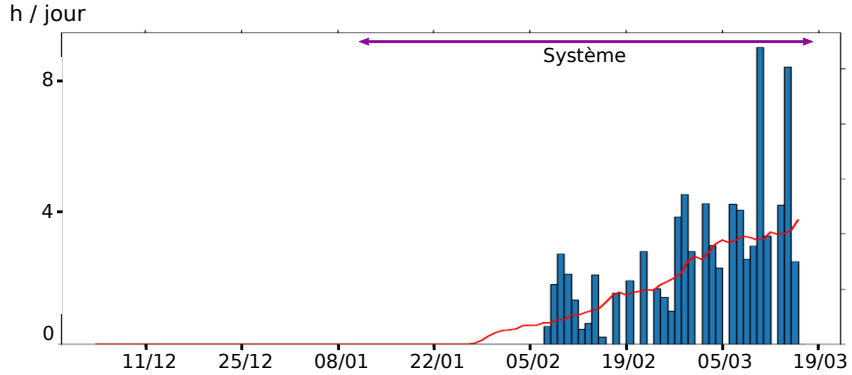
(b) *Logement 2*

(c) *Logement 3*

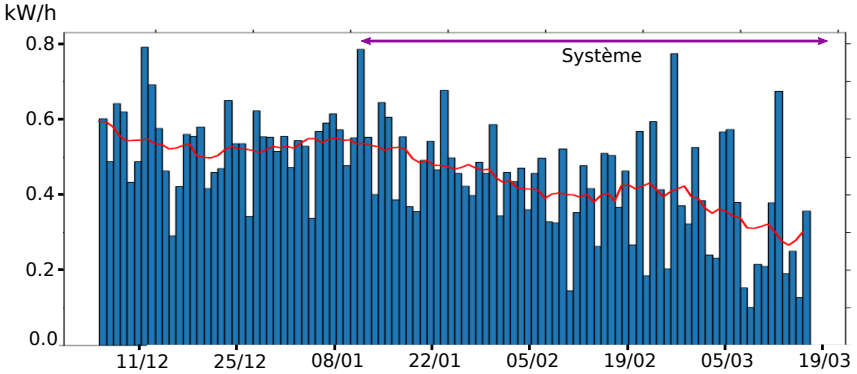
Figure 6.9 – *Consommation totale par jour des appareils instrumentés de chaque logement au cours de l'expérimentation. La ligne rouge représente la tendance de cette consommation au cours du temps, calculée avec une moyenne glissante sur 7 jours.*



(a) *Évolution de la durée des périodes de veille des enceintes.*



(b) *Évolution de la durée des périodes d'extinction des enceintes.*



(c) *Évolution de la consommation des enceintes.*

Figure 6.10 – *Signes visibles de la modification appliquée dans le logement 2 sur les enceintes, réduisant l'utilisation de l'état* en veille *de cet appareil. La ligne rouge représente la tendance des données au cours du temps, calculée avec une moyenne glissante sur 7 jours. La période d'utilisation du système est indiquée par la flèche violette.* **(a)** *et* **(b)** *Durée totale par jour des instances des états considérés, respectivement* en veille *et* éteintes. **(c)** *Consommation agrégée par jour de l'appareil.*

tions des logements. L'étude de la variation de consommation n'est toutefois pas le but de cette expérimentation.

Les modifications appliquées ne sont dans l'ensemble pas détectables sur la consommation des appareils instrumentés. Cependant les modifications appliquées par P3 sur les enceintes dans le logement 2 entraînent une diminution de consommation visible sur les données. Les Figures 6.10a et 6.10b présentent la durée des instances respectivement *en veille* et *éteintes* des enceintes au cours de l'expérimentation. Sur ces graphes, nous pouvons remarquer que la durée des instances de veille diminue pendant la phase d'utilisation du système, tandis que la durée d'extinction des enceintes augmente. Les enceintes n'étaient jamais éteintes par P3 avant l'utilisation du système. L'application de cette modification a de plus été confirmée par le participant au cours de l'entretien final. La Figure 6.10c présente l'évolution de la consommation d'énergie par jour des enceintes pendant l'expérimentation. Nous pouvons remarquer que cette consommation diminue avec l'augmentation de la durée d'extinction des enceintes. Nous notons une baisse d'environ 40% de la consommation des enceintes par rapport au début de l'expérimentation, ce qui est similaire aux économies estimées des deux modifications appliquées sur cet appareil dans le système (voir Figure 6.7).

6.6 Ressenti utilisateur

Nous analysons ici les réponses des participants concernant leur ressenti sur la méthode *what if* et les moyens d'interaction. Tous les participants ont trouvé le système utile. En particulier, le système *Activelec* leur a permis de trouver des modifications à appliquer et d'évaluer les économies potentielles de ces modifications. Selon les réponses au questionnaire, le système a permis aux participants d'analyser leur utilisation des appareils, leur consommation ainsi que les liens entre ces deux éléments.

6.6.1 Méthode *what if*

De manière générale, la méthode *what if* a été appréciée par les participants. Tout d'abord, ceux-ci ont apprécié la décomposition des données des appareils en données brutes et états au cours du temps, permise par le modèle de données de notre méthode. Ce modèle leur a en effet permis une meilleure analyse de leur comportement et de la consommation des appareils, selon les discussions menées lors de l'entretien final. En particulier, grâce à la visualisation des états des appareils les participants ont pu se rappeler la raison de certaines utilisations des appareils. Les participants ont apprécié la visualisation, mais les sélections par critères et modifications ont été jugées d'avantage utiles pour trouver des modifications pertinentes que la visualisation seule. Selon les réponses aux questions de l'entretien final les sélections ont été utiles aux uti-

lisateurs pour faire le lien entre leur comportement et la consommation des appareils. Enfin l'application de modifications sur les sélections a permis d'évaluer l'impact des modifications sur les données, ce qui n'est pas faisable avec les sélections seules. Au delà de la conception du système elle-même que nous évoquons par la suite (6.6.4), ces résultats montrent l'utilité de notre approche *what if* et l'appréciation de son paradigme d'interaction par les utilisateurs.

6.6.2 Découvertes

Certains participants ont été surpris de la consommation de leurs appareils. Par exemple les habitants du logement 1 ont constaté que la télévision consommait peu, tandis que l'ordinateur consommait en comparaison une quantité d'énergie considérable lorsqu'il était allumé et non utilisé. Les participants ont également insisté sur l'utilité des comparaisons entre les différents appareils. Celles-ci leur ont permis de se représenter les ordres de grandeur de consommation, et de se concentrer sur les appareils les plus consommateurs. Par exemple P3 a remarqué que l'état *veille* de son micro-ondes consommait 40% de l'énergie de ce dernier, mais cette consommation est négligeable à côté de celle de l'ordinateur. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus lors des expérimentations précédentes menées en laboratoire, dans lesquelles les participants avaient également trouvé des changements pertinents et appliqué d'avantage de modifications sur les appareils les plus consommateurs. Toutefois le fait d'utiliser le système dans leur logement a permis aux participants une meilleure analyse des utilisations des appareils. Ceux-ci pouvaient en effet mettre à jour les données dans le système et ainsi visualiser l'impact des utilisations récentes des appareils sur les données de consommation.

6.6.3 Utilisation du système

Les participants des logements 1 et 2 ont déclaré qu'ils n'auraient pas pensé à installer et utiliser le système par eux-mêmes, tandis que ceux du logement 3 ont déclaré qu'ils l'auraient installé par eux-mêmes. P1 et P2 (logement 1) étaient motivés pour utiliser le système au début de l'expérimentation. Ils ont déclaré : "nous étions motivés au début car il y a avait un effet de nouveauté. Mais ensuite nous n'avions pas beaucoup de temps pour l'utiliser, et aussi nous avions trouvé toutes les modifications possibles." Selon les réponses à une question spécifique de l'entretien final, tous les participants ont eu l'impression d'avoir peu utilisé le système par manque de temps. Ce problème de motivation et surtout de maintien de la motivation est toutefois connu et inhérent au domaine de l'eco-feedback [15, 52, 101]. Les participants n'ont pas vérifié dans le système si leur consommation avait évolué depuis la dernière utilisation. Ils auraient en effet pu appliquer une modification réelle et vérifier son impact sur la consommation. Cette absence de vérification est explicable par le caractère court de l'expérimentation, ainsi que par le manque de support du système pour cette tâche spécifique. Nous dis-

cutons d'une amélioration permettant le suivi des modifications appliquées en tant que perspectives (voir 8.1).

A noter que les participants des logements 1 et 3, qui étaient deux dans chaque logement, ont utilisé le système ensemble. Ils ont également discuté du système et des modifications de comportement qu'ils pourraient appliquer réellement en dehors de l'utilisation du système. Les participants du logement 1 ont évoqué l'expérimentation et les économies d'énergie de manière générale avec des personnes étrangères au logement et à l'expérimentation. Ceci confirme l'impact social potentiel des systèmes *eco-feedback*, qui peuvent avoir un effet indirect sur des personnes ne disposant pas d'un tel système.

6.6.4 Conception du système

La durée d'utilisation du système, plus longue que lors des expérimentations en laboratoire, ainsi que les utilisations répétées ont permis d'obtenir plus d'informations sur l'appréciation du système par les participants. Dans l'ensemble la conception du système a été appréciée. Par exemple, P3 a déclaré : "Ça fait le job. L'interaction est bien pour trouver les modifications, je ne vois pas trop ce qui pourrait être amélioré." P4 et P5 ont en particulier apprécié la sélection par critères et l'affichage des instances sélectionnées en temps réel. Toutefois, P1 et P2 ont trouvé que ce système de sélection par critères pouvait devenir complexe : "C'est très bien pour appliquer des sélections simples, par exemple un lavage sur trois. Mais si on combine plusieurs critères ça peut devenir complexe pour se le représenter." La sélection directe a été quant à elle très peu utilisée ; les participants ne l'ont utilisée que pour tester le fonctionnement des modifications. Pouvoir choisir l'unité d'énergie utilisée a aidé les participants, qui ont dans l'ensemble préféré utiliser le prix. Ceci indique une tendance pour la motivation économique parmi les participants. Les participants du logement 1 ont toutefois indiqué que l'unité écologique utilisée dans le système était d'avantage motivante. Ils ont en effet noté que les économies financières étaient faibles, et que la réduction de l'impact écologique était plus importante.

6.7 Discussion

6.7.1 Application du *What if*

Les participants ont testé un nombre relativement important de modifications (31 au total) lors de la phase d'utilisation du système *Activelec*. Cela montre que les participants ont pu facilement tester des modifications, tout comme lors des études précédentes que nous avons menées en laboratoire. Les participants ont également pu évaluer l'impact de ces modifications sur leur consommation, et ainsi jauger le compromis entre effort à

fournir pour appliquer la modification en vrai et économie réalisée. Par exemple, dans le logement 1 les participants ont renoncé à éteindre la télévision au lieu de la laisser en veille, ce qui réclame un effort conséquent alors que la veille de cette télévision consomme peu. En revanche dans le logement 3 les participants ont décidé d'appliquer les modifications trouvées sur la télévision en raison des économies importantes. Cette différence montre l'importance de la prise en compte des appareils et des préférences des utilisateurs pour trouver des modifications efficaces et acceptées. *Activelec* s'est également montré utile pour évaluer des modifications déjà envisagés par les participants. Ceux-ci envisageaient par exemple d'éteindre les appareils en veille mais n'avaient pas conscience des économies réalisables. Comme déclaré par les participants, certaines des modifications testées dans le système seront potentiellement appliquées en pratique. Ces résultats montrent que le système et au-delà la méthode *what if* sont une solution à la limitation la plus importante des systèmes eco-feedback, qui est la difficulté à trouver des changements de comportement concrets [15, 21, 125].

6.7.2 Appréciation des participants

Dans l'ensemble, les appréciations des participants sont similaires à celles obtenues en laboratoire, mais l'utilisation prolongée du système nous a permis d'obtenir des informations détaillées sur son utilisation et son appréciation par les utilisateurs. Les résultats de l'expérimentation montrent que le paradigme *what if* utilisé a été apprécié par les participants. En particulier le caractère interactif de la méthode a permis d'engager les participants dans l'analyse de leurs données. Ceux-ci ont en effet trouvé utile les visualisations, les méthodes de sélection ainsi que l'application des modifications sur les utilisations des appareils. Les méthodes de sélection pourraient toutefois être améliorées, comme nous l'évoquons dans le Chapitre 8. Les participants ont explicitement indiqué que la possibilité de tester des modifications apportait un plus par rapport à la visualisation seule. De plus les appareils les plus consommateurs ont été davantage analysés par les participants. Par exemple les ordinateurs ont fait l'objet d'un temps d'interaction et d'un nombre de modifications plus important que les lumières. Ce résultat confirme que le système *Activelec* permet aux utilisateurs de comparer les appareils et de se concentrer sur les plus consommateurs.

6.7.3 Déploiement de *Activelec*

Le déploiement de *Activelec* dans les logements est une réussite en soi. Le système a pu récupérer les données de consommation directement. Les utilisations des appareils ont été extraites à partir des données brutes, et peu d'erreurs d'extraction ont été reportées par les participants. *Activelec* est donc utilisable dans un contexte domestique sans installation complexe ou coûteuse. De plus le modèle de données utilisé par le système s'est révélé adapté à une utilisation réelle. Nous devons toutefois noter que le modèle actuel

n'a pas permis d'incorporer les réfrigérateurs ou congélateurs dans l'expérimentation, alors qu'ils font partie des appareils les plus consommateurs. Nous n'avons pas non plus incorporé d'appareils de chauffage dans notre méthode. La consommation de ces appareils est en effet complexe à modéliser dans une approche nécessitant l'extraction des utilisations et leur simulation. Nous discutons d'améliorations permettant la prise en compte de ces appareils en tant que perspectives (voir 8.1.2.

6.7.4 Limitations

L'expérimentation que nous avons présentée dans ce chapitre avait pour but principal la récolte de données qualitatives concernant notre méthode *what if*. L'analyse des interactions réalisées dans le système ainsi que le ressenti des utilisateurs recueilli lors de l'entretien final ont montré le potentiel de notre méthode. Toutefois nous n'avons pas pu récolter de données quantitatives sur les économies réelles réalisées par les utilisateurs. Une telle analyse nécessiterait en effet un temps d'expérimentation plus long. Les modifications trouvées par les participants et dont ils envisagent l'application réelle n'ont en effet pour la plupart pas été appliquées au cours de l'expérimentation. De plus un plus grand nombre de logements instrumentés serait nécessaire afin d'obtenir des variations de consommation significatives.

Les modifications trouvées par les participants l'ont toutes été dans les premières utilisations du système, et n'ont été par la suite que peu modifiées. De plus les participants n'ont pas vérifié l'application de modifications réelles dans le système, par exemple en comparant la consommation. Il serait possible de fournir aux utilisateurs le suivi des modifications dans le système, et en particulier la comparaison des modifications virtuelles avec les mêmes modifications appliquées en réalité.

Troisième partie

Perspectives

Chapitre 7

Généralisation de la méthode à la visualisation personnelle

Les chapitres précédents de cette thèse ont présenté notre système *Activelec* ainsi que des évaluations, en laboratoire et en contexte réel, dans lesquelles le système s'est montré efficace. Ce système et la méthode *what if* qu'il implémente ont été conçus pour le domaine de l'*eco-feedback*, et en particulier la consommation domestique d'électricité. Dans ce chapitre, nous présentons des perspectives de généralisation de notre méthode *what if* pour la visualisation personnelle. L'application réussie de notre méthode à la consommation d'électricité montre en effet son potentiel pour la visualisation personnelle de manière générale, et donc sa possible application à d'autres types de données personnelles. Ces généralisations potentielles sont présentées comme perspectives. En effet leur validation nécessite un travail complémentaire d'implémentation et surtout d'évaluation qui reste à faire.

La visualisation personnelle au sens de Huang *et al.* [72] est l'analyse de données concernant l'utilisateur dans le but d'en tirer des modifications de comportement positifs (voir 2.3.1). Ces modifications de comportement impactent les données récoltées, qui peuvent alors permettre d'évaluer les améliorations réalisées par l'utilisateur. Notre méthode de visualisation personnelle est basée sur l'application de scénarios de type *what if* permettant à l'utilisateur de modifier virtuellement son comportement, puis d'évaluer l'impact de ces modifications sur les données. L'avantage principal de cette méthode est l'évaluation de modifications réalisées virtuellement, sans besoin de les appliquer en vrai sur le comportement.

Dans ce chapitre nous définissons tout d'abord notre approche *what if* pour la visualisation personnelle (7.1). Cette approche repose principalement sur l'interaction avec les données personnelles, et l'utilisation d'un modèle de données spécifique permettant cette interaction. Puis nous appliquons de manière théorique notre approche à plusieurs types de données personnelles (7.2). Nous présentons ensuite les avantages de cette approche pour l'analyse de données personnelles (7.3), en particulier en comparaison des approches existantes. Enfin nous concluons ce chapitre par une discussion sur la généralisation de la méthode (7.4).

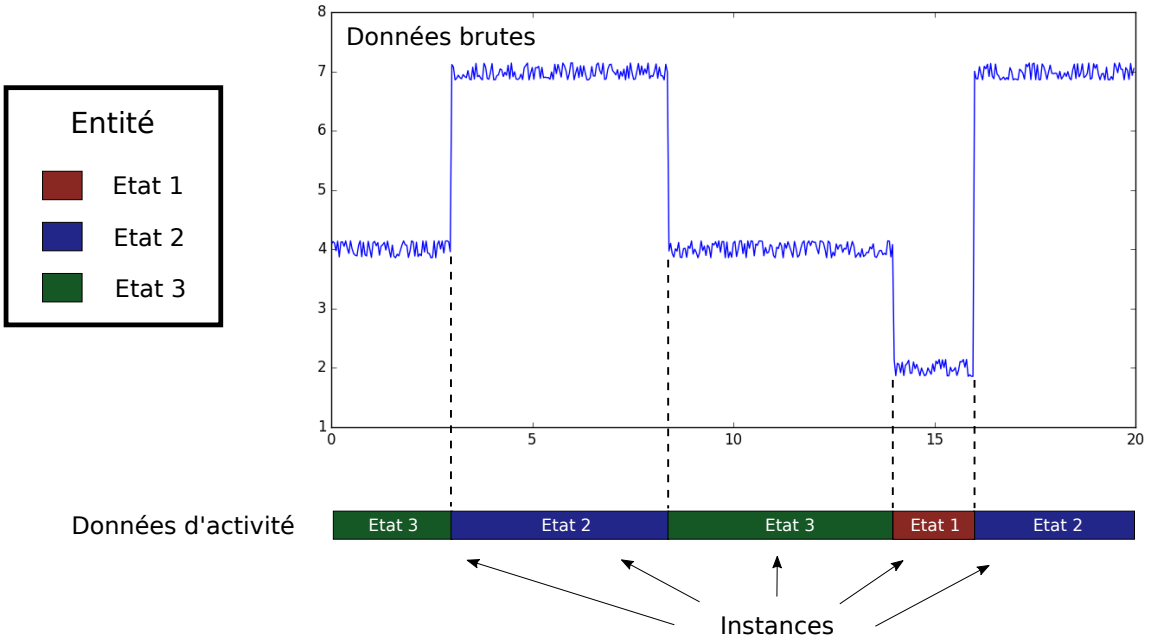


Figure 7.1 – *Modèle de données de notre méthode* what if *généralisée. Une entité est associée à des états, dont l'évolution au cours du temps forme les données d'activités de l'entité. Une variable mesurée de l'entité, permettant l'analyse de son comportement au cours du temps, représente une série temporelle que l'on nomme les données brutes.*

7.1 Conception d'applications *what if* pour la visualisation personnelle

Dans cette section nous fournissons des règles de conception permettant l'implémentation de notre approche *what if* pour une application à d'autres types de données que l'électricité. Ces règles sont basées sur le raisonnement de conception du système *Activelec* (voir 4.1), qui est lui-même basé sur l'état de l'art de la visualisation personnelle.

7.1.1 Modèle de données

Dans le modèle généralisé nous considérons une ou plusieurs *entités* sur lesquelles l'activité de l'utilisateur a une influence. Dans une application à l'activité physique de l'utilisateur par exemple, l'entité serait l'utilisateur lui-même. Les entités sont associées à une variable mesurable dont l'analyse présente un intérêt pour l'utilisateur. L'évolution de cette variable au cours du temps constitue une série temporelle, que nous appelons *données brutes*. Au contraire de la définition de Chloe *et al.* [28] qui ne considère que des données strictement personnelles telles que le poids de l'utilisateur ou son rythme cardiaque, notre méthode inclut des données personnelles ne provenant pas di-

rectement de l'utilisateur. Ce serait par exemple le cas dans une application à la finance, dans laquelle les entités seraient les comptes en banque de l'utilisateur.

Les entités font l'objet de l'objectif principal de l'utilisateur, qui veut en effet trouver des changements de comportement permettant d'optimiser l'évolution de la variable mesurée. Par exemple dans une application à l'activité physique, l'utilisateur peut vouloir augmenter sa propre dépense énergétique, qui est l'intégrale de sa consommation de calories au cours du temps. Afin de faciliter l'interaction avec les données, et en particulier les modifications, nous supposons que les entités possèdent des états discrets. Toujours pour une application à l'activité physique, les états de l'utilisateur seraient par exemple *inactif*, *marche* et *vélo*. L'évolution de l'état d'une entité au cours du temps correspond aux *données d'activité* du modèle. En particulier nous définissons les *instances* d'un état d'une entité comme les intervalles de temps pendant lesquels l'entité est dans cet état. Pour que les changements de comportement de l'utilisateur aient un effet sur les entités considérées, et ainsi sur les données brutes qui caractérisent les entités, l'évolution de ces données brutes doit dépendre au moins en partie de l'activité de l'utilisateur. Ainsi le modèle est basé sur la supposition que l'évolution de l'état au cours du temps d'une entité dépend des actions réelles de l'utilisateur.

Pour notre approche, il est important de fournir aux utilisateurs des informations sur les éléments qui composent le modèle de données. Ils doivent ainsi pouvoir accéder aux informations des entités, de leurs états et des instances. En pratique ces informations complètent la visualisation des données et ont été appréciés par les participants au cours de nos expérimentations. Des participants ont également réclamé la possibilité d'obtenir d'avantage de statistiques détaillées sur les éléments du modèle. C'est également le cas dans certaines autres études *eco-feedback* [34]. Des infos descriptives sur les entités et leurs états permettent en effet aux utilisateurs d'obtenir une vue d'ensemble rapide du modèle, ce qui leur évite l'analyse complète des données à ces fins. Ils peuvent ensuite focaliser directement leur analyse et leurs modifications sur les parties les plus importantes des données.

7.1.2 Boucle d'interaction

Notre méthode *what if* est basée sur une boucle d'interaction comprenant analyse des données, sélection d'un comportement, modification et évaluation. Cette boucle est présentée sur la Figure 7.2 avec une entité dont les données brutes et d'activité sont fictives. Tout d'abord, les utilisateurs explorent les données du modèle. Ils découvrent éventuellement les états des entités, et comparent ces entités dans le cas où le modèle en comporte plusieurs. En particulier les utilisateurs choisissent tout d'abord une entité à analyser en détail, et sur laquelle des modifications seront testées. Lorsque l'utilisateur a appliqué une modification, la méthode permet l'évaluation de ses résultats. Mais surtout elle permet la mise en relation du résultat de la modification et de l'effort que doit fournir l'utilisateur pour l'appliquer en vrai. Les modifications appliquées dans le

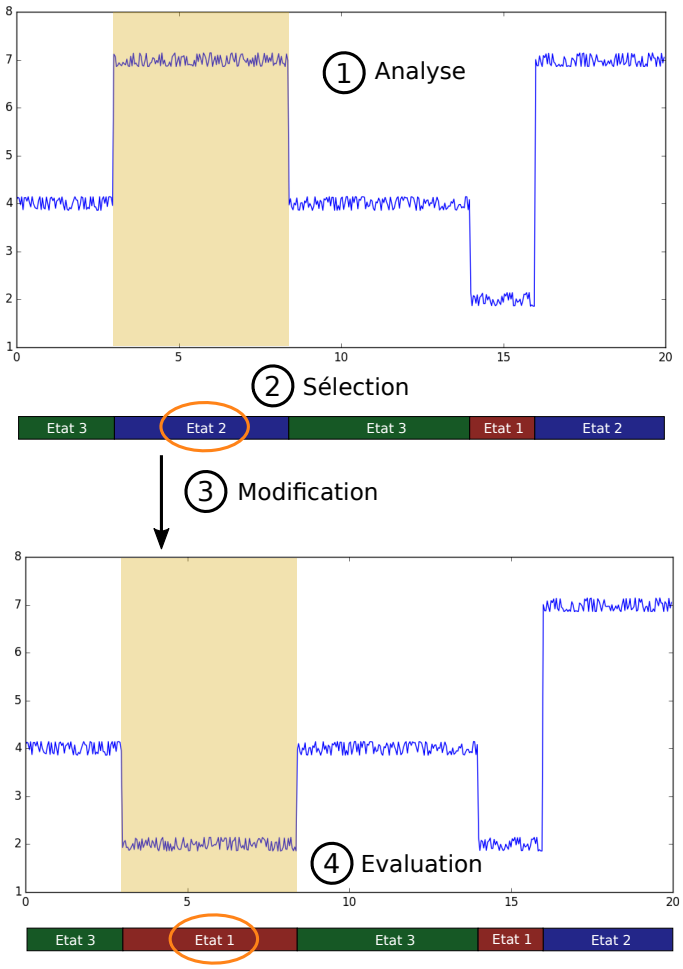


Figure 7.2 – *Boucle d'interaction de notre méthode* what if *généralisée. Celle-ci est composée de l'analyse des données, suivie de sélections puis de modifications des données. L'utilisateur évalue ensuite l'impact de la modification appliquée, avant d'appliquer à nouveau la boucle.*

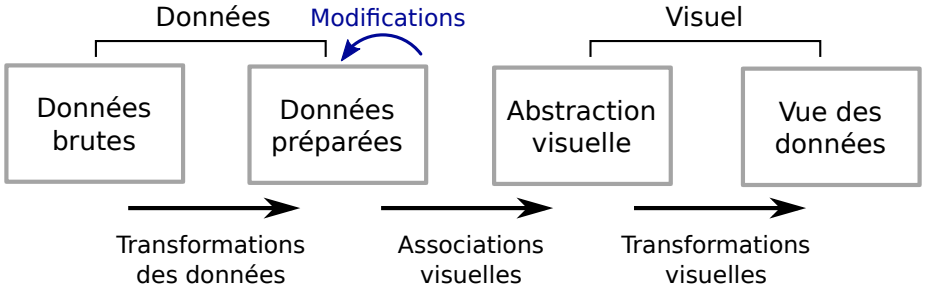


Figure 7.3 – *Pipeline de visualisation comprenant les modifications de notre méthode what if. Ces modifications permettent aux utilisateurs de modifier les données préparées.*

système ont en effet vocation à être transformées en changement de comportement réel par l'utilisateur.

7.1.3 Visualisation

La visualisation est au cœur de notre méthode car elle permet à l'utilisateur d'analyser ses données à tout moment de la boucle d'interaction. Notre méthode se base sur deux types de visualisations, qui sont la visualisation des données brutes (graphiques en courbes dans *Activelec*), et la visualisation de l'agrégation des données (graphiques en bâtons dans *Activelec*). Tout d'abord, la visualisation des données brutes est essentielle pour trouver des habitudes qui seraient intéressantes à modifier, grâce à la visualisation des instances au cours du temps. Il est nécessaire de pouvoir interagir avec ces instances pour obtenir des informations détaillées. La visualisation des données brutes permet également de mettre en valeur les instances sélectionnées, et ainsi faire le lien entre la sélection des données d'activité et les données brutes. Ensuite, la visualisation et la comparaison de l'agrégation des données, par exemple l'intégrale des données brutes, est également essentielle. Cette visualisation permet en effet d'évaluer directement l'impact des modifications appliquées. Comme nous le montrons dans la section suivante (7.2), les visualisations utilisées dans *Activelec* peuvent être directement réutilisées pour d'autres applications, en particulier le mode *instances* qui permet de visualiser les états des entités au cours du temps.

7.1.4 Sélections

Le système de sélections par critères permet aux utilisateurs une analyse plus poussée des données. Ces sélections permettent en effet d'obtenir des informations détaillées sur un ensemble d'instances de l'entité. Grâce à la visualisation, les utilisateurs peuvent lier les instances sélectionnées avec leurs données brutes correspondantes. Lors de l'expérimentation *in-situ* que nous avons menée (Chapitre 6), les sélections par critères ont été beaucoup utilisées par les participants afin d'analyser leurs données avant d'appliquer des modifications. Les sélections permettent également la définition d'un comportement à modifier (étape 2 sur la Figure 7.2). Ce comportement est typiquement défini par les utilisateurs selon les habitudes qu'ils ont distingué dans leurs données.

Les critères de sélection utilisés dans le système *Activelec* (voir 4.2.3) sont applicables aux autres applications, car ils sont basés sur les propriétés temporelles des instances. La sélection des instances selon le critère d'état permet de s'adapter de manière générique à l'application. Pour rappel, ce critère permet de sélectionner toutes les instances d'un certain état. Il permettrait par exemple de sélectionner des instances *course à pied* pour une application à l'activité physique, ou les instances de *restaurant* qui correspondent à un paiement au restaurant pour une application financière.

7.1.5 Modifications

Une fois que l'utilisateur a sélectionné un ensemble d'instances, une modification peut leur être appliquée (étape 3 sur la Figure 7.2). Les données brutes correspondant à ces instances sont alors modifiées afin de correspondre aux nouvelles données d'activité. La visualisation est ensuite mise à jour et un récapitulatif de la modification est affiché. A noter que notre méthode, contrairement aux méthodes habituelles de visualisation, permet aux utilisateurs d'interagir directement avec les données en les modifiant. Vis à vis du pipeline de visualisation (voir 2.1.1), notre méthode permet donc l'interaction au niveau des données préparées, qui sont alors modifiées par les scénarios *what if* (Figure 7.3).

Notre méthode nécessite la définition de scénarios simples à appliquer par les utilisateurs, qui sont potentiellement novices dans le domaine considéré. Ainsi dans *Activelec* nous avons limité les types de modifications disponibles dans un souci de simplicité. Ces modifications sont applicables par le biais de widgets dédiés, en comparaison à des systèmes complexes de scénarios via un langage dédié (voir 2.2.2). Les expérimentations que nous avons menées ont montré que les modifications les plus appliquées étaient les changements d'états. Ce type de modification permettrait par exemple de supprimer des dépenses dans une application financière, ou de modifier des trajets effectués en voiture pour des trajets en vélo. Pour d'autres applications toutefois, d'autres types de modifications importants doivent être ajoutés comme nous l'expliquons dans la prochaine section.

7.2 Domaines d'application

La première application de notre méthode est la consommation domestique d'électricité, pour laquelle le système *Activelec* a été conçu (Chapitre 4) et avec laquelle la méthode a été évaluée (Chapitres 5 et 6). Dans cette application le modèle de données représente les appareils électriques d'un logement, ainsi que leurs utilisations et leur consommation. Toutefois d'autres applications de notre approche *what if* généralisée sont envisageables dans un contexte personnel. Le cadre théorique de la méthode est approprié pour les applications que nous présentons dans cette section. Ces exemples ne sont pas des applications abouties, mais des illustrations de l'application de notre méthode à d'autres domaines. Il serait de plus possible de réutiliser tout ou partie du système *Activelec* pour ces applications. Par exemple le mode *instances* qui implémente le cœur de la méthode est réutilisable dans toutes les applications. Certaines d'entre elles nécessitent des modifications du modèle de données ou du système, auquel cas nous les détaillons.

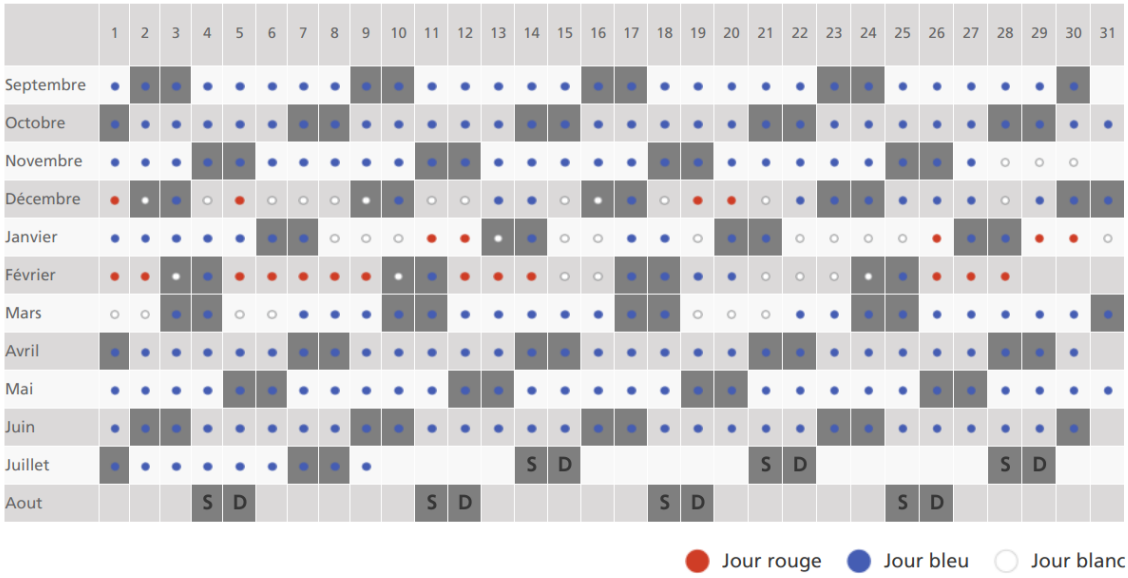


Figure 7.4 – *Prix variable selon le jour avec l'option* Tempo *de* EDF *[45]. Chaque jour est associé à une couleur en fonction du prix de l'énergie : bleu, blanc ou rouge, du moins cher au plus cher.*

7.2.1 Consommation d'électricité avec tarification dynamique

Une des applications les plus proches de la réduction de consommation d'électricité que nous avons présenté dans cette thèse serait une application à la tarification dynamique de l'énergie. Dans cette application, le prix de l'électricité varie au cours du temps. Ce prix peut par exemple être attribué par heure de la journée, comme c'est le cas avec le contrat *Heures Creuses* en France [44]. Il peut également être attribué par jour, en fonction des pics de consommation, comme c'est le cas avec le contrat *Tempo* du fournisseur EDF [45] (Figure 7.4). Nous considérons que dans cette application, l'objectif de l'utilisateur est différent par rapport à notre application initiale. Dans notre application initiale, les utilisateurs veulent en effet réduire la consommation totale d'énergie. Avec la tarification dynamique, les utilisateurs ont pour objectif d'optimiser les périodes d'utilisation de leurs appareils électriques selon le coût de l'énergie. Les utilisateurs n'ont donc pas forcément pour objectif la réduction de la quantité d'énergie totale consommée. A noter toutefois que si l'objectif des utilisateurs dans le cadre de la tarification dynamique semble principalement économique, c'est également un enjeu écologique important. En effet la tarification dynamique est l'un des moyens utilisés pour réduire les pics de consommation (voir 1.2.3). Ces derniers nécessitent l'ajout de ressources de production d'électricité supplémentaires, émettrices de gaz à effet de serre.

Pour cette application, il n'est pas nécessaire de modifier le modèle de données utilisé précédemment pour les appareils électriques (voir 4.1.2). Pour rappel, dans ce

modèle les entités considérées sont les appareils électriques du logement, auxquels sont associés des états correspondant à leur utilisation. Contrairement au calcul avec prix fixe actuellement implémenté dans le système *Activelec*, la tarification dynamique nécessite la modélisation d'un prix variable au cours du temps. Ce prix variable implique que l'équivalence qui existait entre énergie consommée et coût de cette énergie n'est plus valable.

Pour la conception de l'application, il est nécessaire d'ajouter dans la visualisation une indication sur le prix au cours du temps. Celle-ci permettrait à l'utilisateur de visualiser les périodes optimales pendant lesquelles utiliser ses appareils. Nous pouvons par exemple envisager l'utilisation d'un fond coloré donc la couleur est associée au prix au cours du temps. Aussi il est envisageable d'ajouter un critère de sélection permettant à l'utilisateur de sélectionner des utilisations d'appareils en fonction du prix de l'énergie au moment de l'utilisation. Cette application nécessiterait également un type de modification supplémentaire permettant de déplacer des instances. Ces deux fonctionnalités permettraient à l'utilisateur de sélectionner des utilisations ayant lieu à des périodes coûteuses, dans le but de les déplacer à des périodes où l'énergie est moins chère. Un exemple de modification serait alors le déplacement des lavages en machine ayant lieu pendant la période de la journée la plus chère, à la période de la journée la moins chère.

7.2.2 Consommation de gaz et d'eau

L'analyse des consommations de gaz et d'eau partage des points communs avec celle de l'électricité. Ce sont en effet des ressources dont la gestion est importante d'un point de vue écologique, mais également économique car une baisse de leur consommation entraîne une économie financière pour les consommateurs. Ainsi tout comme pour l'électricité, le but de l'utilisateur dans cette application est de diminuer la quantité totale de gaz ou d'eau consommée. Les entités considérées ne sont toutefois pas les appareils électriques, ce qui entraîne des modifications dans la représentation des données d'activité.

Pour la consommation d'eau, les entités seraient les dispositifs de consommation, par exemple les robinets du logement et le lave-linge. Cette application présente une différence avec la consommation d'électricité, car l'utilisation d'un robinet peut correspondre à plusieurs activités, telles que faire la vaisselle, prendre une douche ou cuisiner. De plus un même robinet peut correspondre à plusieurs activité dont la consommation diffère, par exemple prendre une douche ou prendre un bain pour une baignoire. Au contraire, dans l'application à l'électricité les appareils sont directement liés à l'activité de l'utilisateur. Par exemple une télévision allumée est équivalente à une activité dans laquelle l'utilisateur regarde la télévision. Il semble alors nécessaire d'associer aux dispositifs de consommation des états directement associés aux activités de l'utilisateur. Dans ce modèle de données, le robinet de la douche serait par exemple associé à des états *douche* et *bain*. Celui de la cuisine pourrait être associé aux états *faire la vais-*

selle ou *servir un verre d'eau*. En pratique il est possible de récolter la consommation totale d'eau d'un logement via un compteur connecté, mais à notre connaissance aucun capteur simple ne permet la mesure et la transmission de la consommation par robinet. Un algorithme se basant sur des motifs de consommation pourrait toutefois permettre d'extraire les instances correspondant aux utilisations de l'eau. Par exemple nous pouvons imaginer que l'instance *prendre une douche* correspond à un motif d'utilisation continue, et *faire la vaisselle* à plusieurs utilisations plus courtes et discontinues.

Le gaz domestique est essentiellement utilisé pour le chauffage du logement et l'eau chaude sanitaire. Il semble donc logique de séparer ces deux types d'utilisations en deux entités. Les états du chauffage seraient alors le réglage de température. Ceux de l'eau chaude sanitaire seraient similaires aux états précédemment évoqués pour la consommation d'eau, et correspondraient alors à l'activité de l'utilisateur. Il serait même possible de combiner la consommation de gaz liée à l'eau chaude sanitaire avec la consommation d'eau. Ces deux consommations pourraient alors être visualisées sur le même graphe en réutilisant le mode *appareils* de *Activelec*. L'application au gaz semble toutefois plus compliquée à mettre en œuvre en pratique. Tout d'abord, mesurer la consommation de gaz nécessite l'installation d'un dispositif spécialisé, qui est plus compliqué à installer et coûteux par rapport au simple branchement de prises de mesure. Mais surtout, la modélisation du chauffage nécessite des algorithmes élaborés de simulation. La consommation de gaz ne dépend en effet pas uniquement du réglage de l'utilisateur, mais aussi de variables externes telles que la température extérieure ou l'isolation du logement.

7.2.3 Activité physique

Un autre domaine où l'approche est directement applicable est l'activité physique. Dans les applications de ce domaine, l'objectif de l'utilisateur est généralement de maximiser le nombre de calories dépensées. Cette dépense calorique dépend du type et de la durée des activités physiques de l'utilisateur. D'autres utilisateurs d'avantage sportifs peuvent également vouloir étudier d'autres métriques spécifiques, par exemple le temps par kilomètre parcouru pour la course à pied, mais nous ne considérons pas ce cas de figure plus spécifique et plus complexe. Dans les applications liées à l'activité physique que nous envisageons, l'entité est l'utilisateur lui-même, et la variable mesurée (ou estimée) que nous considérons est le nombre de calories dépensées au cours du temps. Comme la consommation de calories peut sembler abstraite pour l'utilisateur, tout comme pour la consommation électrique nous devons proposer à l'utilisateur une unité concrète. Nous pourrions ainsi exprimer le nombre de calories dépensées sous forme d'équivalent en nombre de morceaux de sucre. Nous considérons deux applications différentes dans le domaine de l'activité physique. La première est l'activité liée aux déplacements de l'utilisateur, et la seconde les sports pratiqués par l'utilisateur. Le type de données d'activité dépend de l'application, et serait respectivement les moyens de transport utilisés et les sports pratiqués, comme nous allons le présenter par la suite. Ces deux

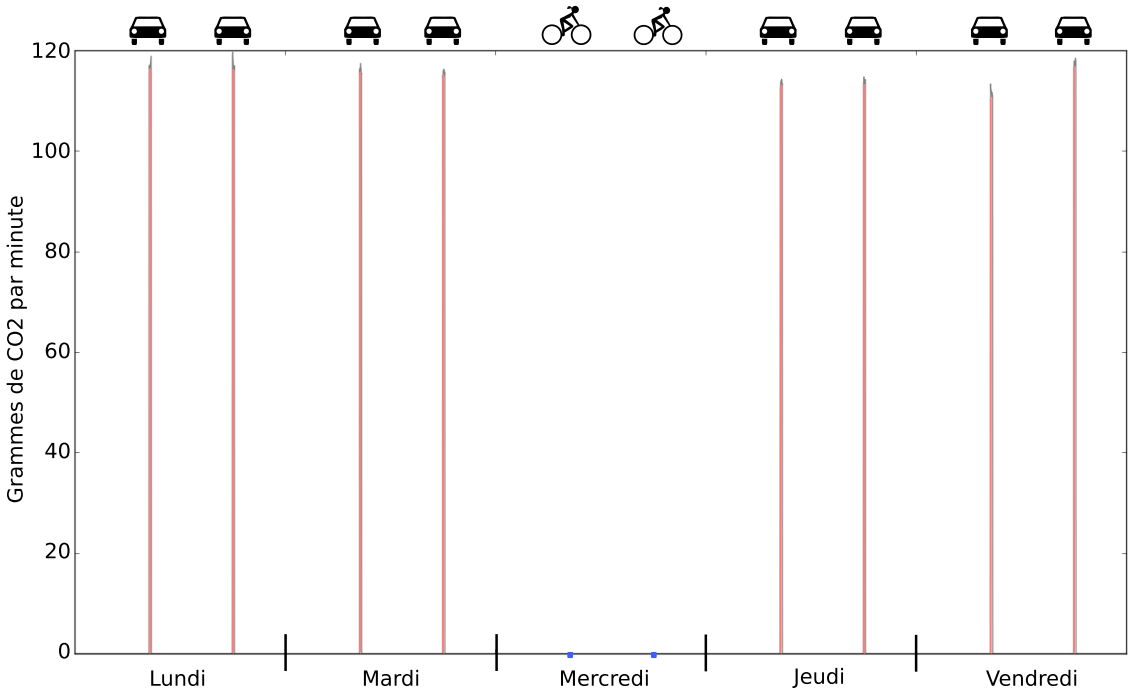


Figure 7.5 – *Exemple d'application potentielle de notre méthode what if généralisée à des données de transport. La courbe affichée représente les émissions de CO_2 au cours du temps imputés aux déplacements de l'utilisateur, sur cinq jours. Tous les déplacements sont d'une durée comprise entre 15 et 40 minutes, ce qui explique la forme de pic des données. Les déplacements réalisés en vélo ne sont pas visibles sur la courbe car leurs émissions de CO_2 sont nulles, nous les repérons donc grâce à des marques bleues.*

applications ne nécessiteraient que peu de modifications à l'implémentation actuelle du système *Activelec*.

Dans la première application possible, l'utilisateur analyserait le nombre de calories dépensées selon les trajets réalisés. Les états de l'utilisateur représenteraient alors les moyens de transport utilisés par l'utilisateur, par exemple *à pied*, *à vélo* ou *en voiture*. Un état *aucun déplacement* servirait à représenter les périodes d'inactivité. S'il est envisageable d'utiliser également le nombre de pas réalisés pour la marche, l'utilisation du nombre de calories dépensées permet d'utiliser la même unité pour les différents types de déplacements. En plus de la consommation de calories, il serait également possible d'incorporer les émissions de CO_2 ou le coût induits par les trajets. La Figure 7.5 présente ainsi un exemple de visualisation affichant les émissions de CO_2 en fonction du trajet et du moyen de transport de l'utilisateur. Cette application est proche du prototype présenté par Li *et al.* [85] pour l'activité physique (voir 2.3.3), mais qui serait alors basé sur notre approche *what if*. Celle-ci permettrait à l'utilisateur d'évaluer l'impact de modifications dans les déplacements réalisés au quotidien sur sa consommation de calories, sur les émissions de CO_2 ou sur le coût des trajets au cours du temps. Par

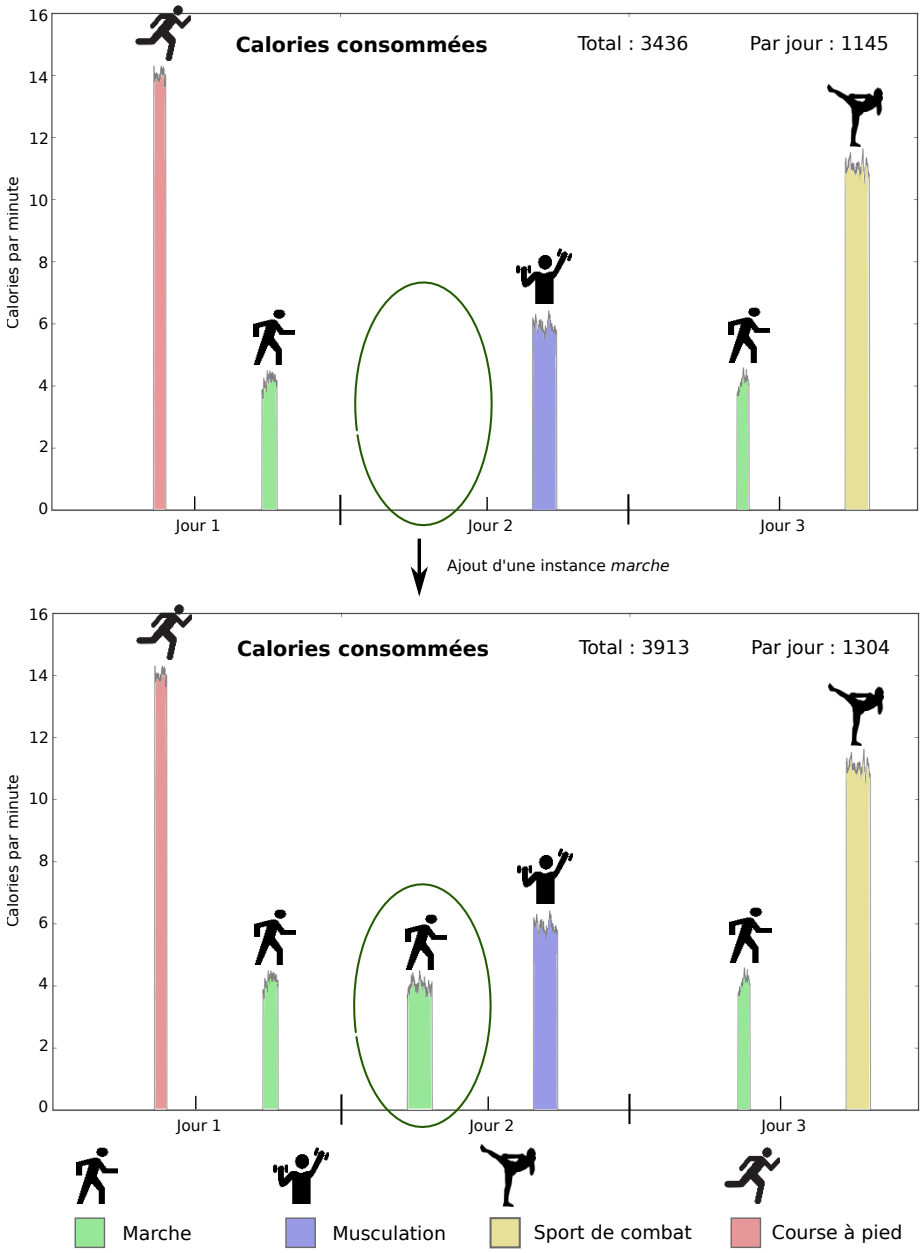


Figure 7.6 – *Exemple d'application de notre méthode what if généralisée à des données d'activité physique. La courbe affichée représente la consommation de calories au cours du temps de l'utilisateur, sur trois jours. Les différentes activités physiques pratiquées sont représentées sur la courbe grâce à des couleurs ainsi que des pictogrammes. L'utilisateur a ici appliqué une modification en ajoutant une instance de marche (en bas), et le nombre de calories consommées ainsi que la visualisation ont été mis à jour.*

exemple l'utilisateur pourrait modifier les déplacements réalisés pour se rendre au travail de *en voiture* à *à vélo*. Nous devons toutefois remarquer que les modifications d'état appliquées entraîneraient également des modifications de durée des instances. Un trajet réalisé à vélo est en effet probablement plus long que le même trajet réalisé en voiture.

La seconde application envisageable est la modélisation des activités sportives de l'utilisateur. Les états correspondraient alors directement aux types d'activités physiques pratiquées. Par exemple un utilisateur pourrait être associé à un ensemble d'états *marche à pied*, *course à pied* et *musculation*. De même que pour l'application précédente, l'utilisateur pourrait alors modifier ses activités afin d'obtenir une meilleure dépense calorique selon ses propres objectifs. La Figure 7.6 présente une visualisation fictive illustrant cette application, sur laquelle est affichée la courbe de consommation de calories de l'utilisateur. Cette courbe est associée à des couleurs et des pictogrammes en fonction des activités. La consommation calorique de ces activités est variable, mais la moyenne de consommation par minute des instances est similaire. En pratique, l'utilisation d'un bracelet connecté tel que *Fitbit Charge 2* [56] permet d'obtenir précisément et automatiquement les types et durées des activités physiques de l'utilisateur. Il est ensuite possible de calculer la dépense calorique de ces activités selon leur type, leur durée ainsi que le poids de l'utilisateur.

7.2.4 Finance

Une autre application possible est la gestion des finances personnelles. Dans cette application, les entités modélisés seraient le ou les comptes en banque de l'utilisateur. Il serait alors possible d'appliquer des modifications sur les transactions réalisées et d'en évaluer l'impact sur les finances. Cette application partage un point commun avec la consommation électrique, car les données financières ne proviennent pas directement de l'utilisateur mais leur évolution découle de son comportement. Elles sont composées d'événements réguliers, tels que le salaire ou le paiement d'un loyer, mais aussi d'événements irréguliers, par exemple une sortie au restaurant Cette association des données rend l'approche *what if* pertinente car elle permettrait d'évaluer l'impact de changements de comportement dans les dépenses sur le montant des comptes. En particulier il serait intéressant pour l'utilisateur d'évaluer l'impact d'une modification minime mais répétée au cours du temps en termes de montant.

Toutefois cette application diffère par la nature des données d'activité. Les transactions sont en effet des événements ponctuels et non des intervalles de temps comme c'est le cas pour les autres applications. L'application aux données bancaires nécessiterait alors la modification de la visualisation de *Activelec* afin de proposer une visualisation d'événements ponctuels, et non d'intervalles. Afin d'éviter qu'une modification d'une instance impacte toutes les données brutes situées après cette instance, les données brutes considérées et visualisées seraient les dépenses et recettes au cours du temps, et non le montant du compte en banque. La Figure 7.7 présente un exemple de visua-

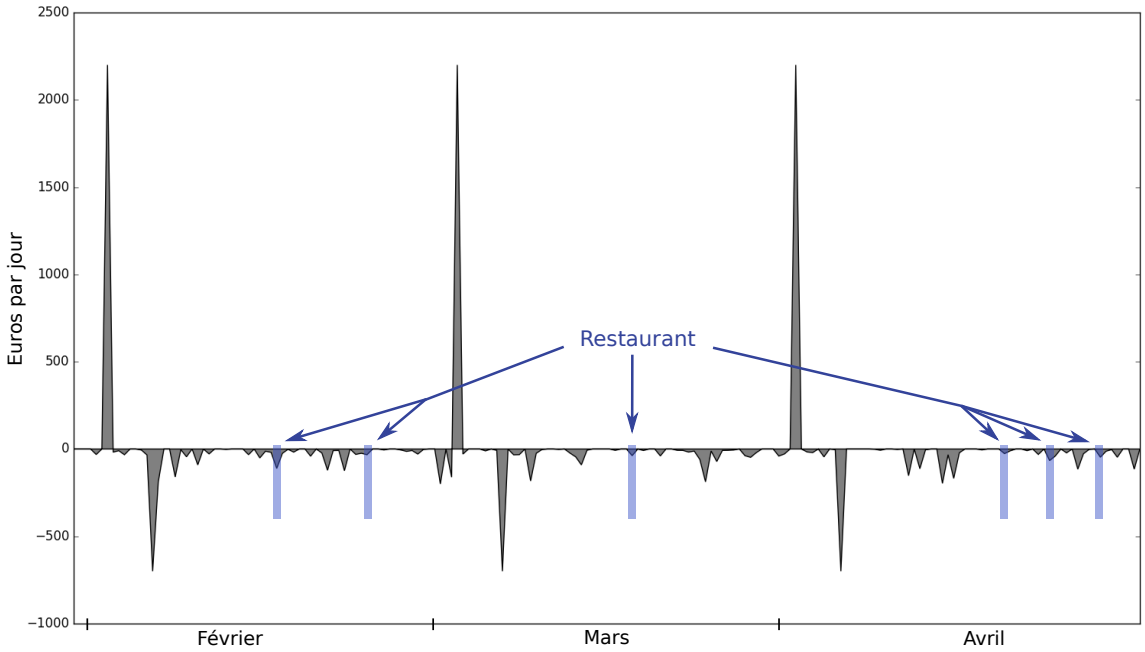


Figure 7.7 – *Exemple d'application de notre méthode what if généralisée à des données financières. La courbe représente l'évolution des recettes et dépenses de l'utilisateur. Les pics de recettes correspondent aux salaires, et les pics de dépenses aux paiements de loyer. Ici l'utilisateur a sélectionné toutes les instances correspondant à un paiement au restaurant, mises en surbrillance bleue.*

lisation pour une telle application. En pratique, tout comme l'application *Mint* (voir Section 2.3), une synchronisation de l'application avec le compte bancaire de l'utilisateur permettrait d'obtenir les transactions réalisées. Cette synchronisation pourrait toutefois être difficile à mettre en œuvre dans un prototype de recherche pour des raisons de sécurité des données.

7.3 Avantages de l'approche

Certains des avantages de notre approche pour l'*eco-feedback* s'appliquent également à la généralisation de la méthode pour la visualisation personnelle. Notre méthode permet en particulier l'*expérimentation par soi-même*, peu supportée en visualisation personnelle. Elle permet également d'engager les utilisateurs dans ses données, ainsi que la prise en compte de leurs choix personnels.

7.3.1 Support de l'*expérimentation par soi-même*

L'*expérimentation sur soi* est l'utilisation des outils de visualisation personnelle dans le but d'évaluer l'impact de changements de comportement potentiels (voir 2.3.2). Chloe *et al.* [29] notent que ce type d'interaction est peu supporté dans le domaine de la visualisation personnelle. Les outils existants ne permettent en effet pas de suivre l'évolution des données lors d'un changement de comportement de l'utilisateur, qui doit alors comparer lui-même ses données passées avec les nouvelles données récoltées. Pire, les systèmes existants nécessitent un changement de comportement réel de l'utilisateur. Or ce changement de comportement peut être non rentable, dans le sens où il demande peut-être un effort important mais n'apporte que peu de bénéfices. Appliquer des changements de comportement virtuels avec les outils de visualisation personnelle actuels requière le calcul manuel, de la part de l'utilisateur, de ses habitudes et de leur impact sur les données récoltées. Cette méthode de calcul devient très complexe, voire impossible, lorsque le comportement à modifier se répète au cours du temps.

Notre méthode *what if* permet précisément l'application de l'*expérimentation sur soi*. Les utilisateurs peuvent en effet modifier virtuellement leur comportement et en évaluer l'impact sur des données simulées. Cette méthode permet ainsi de combler une fonctionnalité manquante du domaine de la visualisation personnelle, mais qui est réclamée par les utilisateurs [29]. En particulier, elle permet aux utilisateurs de définir explicitement un comportement à modifier via le système de sélections. Puis elle offre un retour clair et direct sur l'impact des changements de comportement appliqués virtuellement. Elle évite ainsi aux utilisateurs des calculs complexes sur leurs données, ou le test réel des changements de comportement afin d'évaluer leur rentabilité.

7.3.2 Engagement

Plutôt qu'une simple visualisation des données, notre méthode est basée sur l'interaction avec les données personnelles. Cette interaction est à l'œuvre non seulement via l'application de scénarios *what if*, mais aussi au cours de l'étape d'analyse des données. Les utilisateurs peuvent en effet interagir avec les données d'activité, par exemple en sélectionnant un ensemble d'activités au cours du temps afin d'analyser leur impact sur les données récoltées. Grâce à cette interaction, les utilisateurs sont d'avantage impliqués dans l'analyse de leurs données, qui est alors plus efficace. Au cours des expérimentations que nous avons mené et qui sont présentées dans les chapitres précédents, les utilisateurs ont particulièrement apprécié l'interaction avec les données. Cette intérêt pour le paradigme d'interaction de notre méthode est explicable par son côté ludique. Celle-ci peut en effet être vue comme un jeu sérieux dans lequel l'objectif est d'optimiser les bénéfices obtenus via l'application de modifications. Par exemple pour notre application à la consommation d'électricité, le but est de maximiser les économies réalisées sur les appareils électriques. Ce côté ludique est renforcé par la minimisation de

l'effort requis pour appliquer les changements de comportement testés via la méthode *what if*. Les utilisateurs cherchent en effet les modifications qui leur sont bénéfiques, mais dont l'application ne demande pas un effort conséquent. Cette contrainte supplémentaire est un challenge pour les utilisateurs, ce qui peut leur apporter une motivation supplémentaire.

7.3.3 Choix personnels

Les données personnelles de l'utilisateur dépendent de facteurs personnels, qui ne sont souvent connus que via une récolte et une analyse de données personnelles. Si des suggestions généralisées peuvent se montrer efficaces, par exemple via des campagnes médiatiques, les bénéfices induits par les changements de comportement d'un utilisateur dépendent de facteurs personnels. Ainsi seuls les utilisateurs peuvent analyser leurs données et découvrir les modifications de comportement qui sont efficaces dans leur contexte. Notre méthode permet également la prise en compte des choix personnels des utilisateurs. Ceux-ci sont en effet libres de tester et d'appliquer les modifications qu'ils choisissent. Ils peuvent par exemple décider d'appliquer les modifications de comportement qui ne sont pas les plus bénéfiques, mais qui leur conviennent d'avantage. Il est probable que les meilleurs changements de comportement, au sens où l'impact sur les données serait optimal, requièrent un effort conséquent à l'utilisateur pour être appliqués dans la vie de tous les jours.

7.4 Discussion

Dans ce chapitre nous avons présenté une généralisation de notre méthode *what if*, qui est une méthode de visualisation personnelle basée sur l'interaction avec les données. En particulier elle permet aux utilisateurs de sélectionner et de modifier un comportement repéré pendant la phase d'analyse de données. Cette interaction, appréciée au cours des évaluations menées à partir du système *Activelec*, permet l'engagement des utilisateurs dans leurs données. Notre méthode ainsi généralisée est applicable à des données personnelles issues de domaines divers. Nous présentons dans cette section les limitations de cette approche, avant d'évoquer la possible réutilisation du système *Activelec* pour d'autres types de données puis d'éventuelles expérimentations basées sur les exemples d'applications que nous avons présenté.

7.4.1 Limitations

Tout d'abord, notre méthode nécessite l'utilisation d'un système de simulation afin de calculer de nouvelles données lorsqu'un scénario *what if* est appliqué. Cette limitation

est inhérente aux systèmes de type *what if*, dont les modifications sont restreintes à celles permises par cette simulation. Toutefois cette limitation est surmontable par l'utilisation d'un algorithme de simulation précise, dont les résultats sont suffisamment cohérents pour permettre à l'utilisateur d'évaluer correctement les résultats d'un changement de comportement.

Une autre limitation de notre méthode est la nécessité de récolter des données précises. Cette nécessité provient en partie de l'utilisation de deux algorithmes de traitement de données, l'extraction des instances et la simulation des modifications. Les instances sont de plus visuellement liées aux données brutes, leurs limites doivent alors être précises pour permettre une analyse efficace. Il n'est par exemple pas envisageable d'utiliser des données agrégées à la journée. Aussi notre méthode peut nécessiter des données concernant l'activité de l'utilisateur, qui sont parfois difficiles à obtenir. Nous avons par exemple présenté une application à l'application physique, dans laquelle un bracelet connecté serait nécessaire pour récolter les activités physiques de l'utilisateur. Notre méthode n'est donc pas applicable à tous les types de données brutes.

Un engagement est requis de la part de l'utilisateur pour que la méthode soit efficace. Notre méthode est en effet basée sur une analyse des données et sur l'interaction. Elle nécessite donc du temps de la part de l'utilisateur afin de trouver des changements de comportement pertinents. En comparaison, certaines applications mobiles sont conçues afin d'être utilisées en peu de temps. Cette limitation est toutefois inhérente aux *dashboards* de visualisation personnelle [15]. Nous choisissons toutefois de baser notre méthode sur un *dashboard* de visualisation car ce type d'application permet l'application d'interactions plus élaborées, qui sont nécessaires à l'analyse des données [72]. De plus l'interaction de type *what if* n'étant pas répandue dans les applications de visualisation personnelle, un certain temps d'apprentissage est alors nécessaire pour l'utilisation efficace de la méthode. Toutefois ce temps était limité à une vingtaine de minutes dans nos expérimentations, au delà desquelles les participants réussissaient à utiliser la méthode efficacement.

7.4.2 Réutilisation de *Activelec*

Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, il serait possible de réutiliser les éléments de conception utilisés pour le système *Activelec*. La méthode généralisée repose en effet sur les mêmes principes que ceux ayant conduit à la conception de ce système. Les évaluations que nous avons menées montrent de plus que ce système s'est avéré efficace et a permis aux utilisateurs de trouver facilement des changements de comportement pertinents. Nous avons donc toutes les raisons de penser que le raisonnement ayant mené à sa conception serait également efficace pour l'application à d'autres domaines. Afin d'appliquer le système à d'autres types de données, nous avons vu que la visualisation et les sélections pouvaient être conservés. Les éléments devant être mis à jour sont le modèle de données ainsi que les algorithmes de traitement de données,

qui eux dépendent du type de données considéré. Les types de modifications doivent éventuellement être modifiées selon l'application considérée. Pour s'adapter à d'autres domaines de la visualisation personnelle, la solution triviale est de concevoir un système pour chaque type de données possible. Mais nous pouvons également envisager un système générique implémentant notre approche *what if*, qui serait alors paramétré selon l'application.

7.4.3 Évaluation

Dans les Chapitres 5 et 6, nous avons évalué notre méthode en l'appliquant à la consommation d'électricité. Ces évaluations étant réussies, nous pouvons supposer que la méthode sera également efficace pour les autres applications, qui sont proches de l'application initiale à la consommation d'électricité. En particulier les interactions au cœur de la méthode ne changent pas. Toutefois des évaluations avec d'autres applications sont nécessaires afin de montrer que la généralisation de la méthode à d'autres domaines de données est aussi efficace. Cette évaluation permettrait de montrer que notre méthode est bénéfique pour la visualisation personnelle de manière générale. Il est en effet possible que le domaine d'application influence les résultats, et que ceux-ci soient différents de ceux obtenus précédemment. En pratique cette évaluation serait facilement mise en œuvre pour la plupart des applications, pour lesquelles nous avons présenté les moyens de récolte des données. L'application aux finances semble la plus difficile à mettre en œuvre en raison du caractère sensible des données considérées.

Chapitre 8

Autres perspectives

Ce chapitre présente les perspectives ouvertes par la thèse pour les domaines de l'*eco-feedback* et de la visualisation personnelle. Dans le Chapitre 4, nous avons présenté le système *Activelec* qui implémente notre méthode *what if*. Son déploiement présenté dans le Chapitre 6 a de plus montré sa capacité à être utilisé dans un contexte domestique réel. Dans ce chapitre, nous discutons particulièrement des améliorations possibles de la méthode *what if* (8.1) et du système *Activelec* (8.2).

8.1 Améliorations de la méthode

Cette section présente des améliorations envisagées pour notre méthode *what if*, indépendamment de l'implémentation du système *Activelec*.

8.1.1 Système ambiant et application mobile

Si des études précédentes ont montré que les visualisations de consommation d'énergie avec de l'interaction mènent à de meilleurs résultats que les systèmes ambiants [55], celles-ci demandent un engagement de la part des utilisateurs. Ainsi dans l'expérimentation *in-situ* tous les participants ont indiqué ne pas avoir utilisé davantage le système par manque de temps. Aussi, les participants n'ont pas vérifié si les modifications appliquées en pratique sur leurs appareils avaient entraîné une baisse effective de leur consommation. Ces deux observations nous amènent à envisager un affichage ambiant placé dans l'environnement de l'utilisateur. Celui-ci serait relié au système *Activelec* et permettrait de rappeler les modifications de comportement envisagées. Cet affichage pourrait également montrer les économies réalisées depuis l'application des modifications par l'utilisateur. Aussi nous envisageons un nouveau mode d'interaction pour *Activelec* qui permettrait de suivre l'évolution des données depuis l'application d'un changement d'utilisation des appareils.

Pour faciliter son développement, son évolution et son évaluation *Activelec* fonctionne dans un environnement de bureau. Le système pourrait toutefois être facilement adapté sur tablette, ce qui permettrait aux utilisateurs d'analyser leur consommation n'importe où. En particulier les utilisateurs pourraient tester des modifications sur les appareils dont ils sont proches physiquement, ce qui leur fournirait d'avantage de contexte sur leur utilisation. Les moyens d'interaction rendent difficilement concevable le portage de *Activelec* en tant qu'application mobile. Toutefois nous pouvons envisager une application mobile permettant de récapituler les modifications choisies et de comparer rapidement l'évolution des données avec les modifications. Cette application serait alors similaire au système ambiant précédemment décrit.

8.1.2 Modèle de données

Le modèle de données de notre méthode ne permet pas la prise en compte des appareils de chauffage, car leur simulation est complexe et dépend de diverses paramètres tels que la température extérieure ou l'isolation du logement. Dans la première expérimentation menée (voir 5.1) nous avons toutefois modélisé le chauffage du logement, car les données ne provenaient pas des utilisateurs. L'imprécision de la modélisation du chauffage n'avait alors que peu d'impact sur les résultats. Toutefois par la suite nous souhaiterions incorporer des algorithmes de simulation plus élaborés afin de modéliser le chauffage, qui est la source de consommation d'énergie la plus importante des logements. Pour les mêmes raisons le modèle de données ne permet pas la prise en compte des réfrigérateurs et congélateurs.

Actuellement, les paramètres d'extraction des appareils sont entrés manuellement par nos soins. Nous choisissons également les états de tous les appareils modélisés. À l'avenir, pour une diffusion réelle du système *Activelec*, nous souhaiterions permettre aux utilisateurs de modéliser facilement leurs appareils. Pour cela nous envisageons de modéliser les appareils de façon automatique, en utilisant par exemple une base de données d'appareils et de leurs états possibles. Les paramètres d'extraction des instances seraient également définis de façon automatique.

8.1.3 Alternatives à l'utilisation de données passées

Le système *Activelec* que nous avons présenté puis évalué lors des chapitres précédents de cette thèse repose sur la modification de données passées. Cette interaction permet d'appliquer des scénarios pour évaluer quelle aurait été l'évolution des données si le comportement de l'utilisateur avait été différent. En complément de ce paradigme basé sur le passé, nous pouvons imaginer des paradigmes basées sur le présent ou le futur. Ces paradigmes sont tous basés sur la modélisation des données de l'utilisateur en prenant en compte le caractère répétitif des données personnelles. Ces données présentent en effet les habitudes des utilisateurs, accompagnées de certains événements inhabituels. Le paradigme basé sur le passé a toutefois l'avantage de permettre la modification de ces événements inhabituels, contrairement aux autres paradigmes reposant sur une extraction de la répétition des instances au cours du temps.

Il semble intéressant de permettre à l'utilisateur de modifier son comportement type, qui serait défini par le biais des activités habituelles de l'utilisateur. Une analyse des données peut en effet permettre d'extraire les instances récurrentes présentes dans les données d'activité. Ce comportement type de l'utilisateur serait alors associé à l'évolution correspondante des données brutes. La modification des données d'activité correspondrait alors directement à une modification des habitudes de l'utilisateur. Il serait par exemple possible de présenter à l'utilisateur une semaine type en termes

d'utilisation des appareils électriques, associée à la consommation d'énergie induite par ces utilisations. L'utilisateur pourrait alors directement modifier ses habitudes d'utilisation, par exemple modifier le lavage en machine habituel ayant lieu le dimanche en lavage économique.

Un paradigme d'utilisation envisageable, similaire au précédent, serait de permettre à l'utilisateur de créer entièrement un comportement virtuel. Cette application permettrait aux utilisateurs de créer leurs propres données d'activité. Les données brutes associées seraient calculées et présentées à l'utilisateur. A la place de la modification de leurs activités, ce type d'application permettrait aux utilisateurs d'évaluer le résultat d'un comportement qui serait entièrement défini dans le système.

Enfin il est possible d'imaginer une extrapolation des données au futur. Cette application permettrait à l'utilisateur d'évaluer l'impact au cours du temps des modifications réalisées sur des données passées. Plus simple à mettre en place que les deux autres, ce nouveau type d'interaction pourrait être une extension du système *Activelec* actuel. Dans ce paradigme, une extrapolation des données serait calculée, permettant l'évaluation du résultat des modifications réalisées sur une plus longue période que celle fournie par les données récoltées. Tout comme le paradigme basé sur un comportement type, il est envisageable d'extraire les habitudes des utilisateurs en termes d'instances des entités au cours du temps, afin de les extrapoler au futur.

8.2 Améliorations du système *Activelec*

Dans cette section nous présentons des améliorations possibles pour l'implémentation du système *Activelec*.

8.2.1 Précision des données

Dans notre approche, deux algorithmes de traitement de données sont indispensables : l'extraction des instances des états et la génération de nouvelles données lorsqu'une modification est appliquée. Dans notre application, nous avons utilisé des algorithmes simples qui donnaient des résultats suffisants pour les expérimentations menées. Il serait toutefois possible d'utiliser des algorithmes plus aboutis afin d'obtenir plus de précision. Les instances des appareils sont extraits en utilisant des seuils empiriques, ce qui nécessite une mise au point manuelle pour trouver des seuils appropriés. Des algorithmes plus avancés pourraient être utilisés pour segmenter les données d'entrée automatiquement et de manière plus précise.

Lorsqu'une modification est appliquée, il est nécessaire de calculer de nouvelles données brutes correspondant aux instances modifiées. La solution que nous avons choisi,

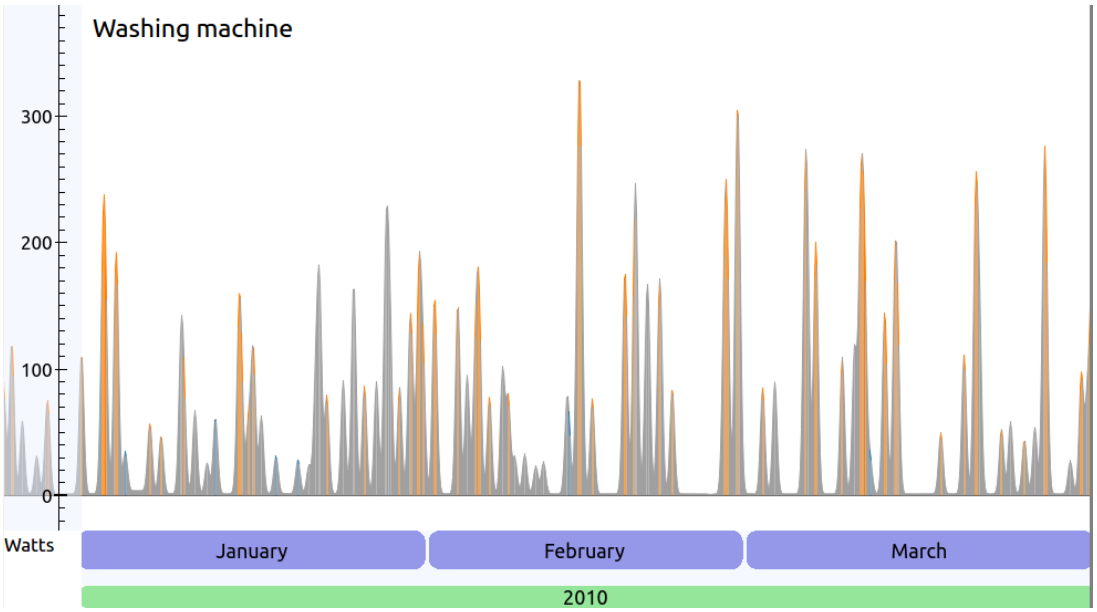


Figure 8.1 – *Données d'un lave-linge associé aux états* lavage standard *(orange),* lavage économique *(bleu) et* éteint *(gris) visualisées dans le mode* instances *de* Activelec. *Les instances de l'état éteint apparaissent sur la courbe avec une aire non vide en raison du lissage.*

.

basée sur une copie des données des instances de même état, donne des résultats satisfaisants. Dans l'hypothèse où les données brutes associées aux instances d'un même état sont de moyenne similaire, cette méthode fournit en effet des résultats cohérents. Nous pourrions toutefois envisager des algorithmes de simulation plus élaborés, éventuellement basés sur des paramètres supplémentaires. Il est également envisageable d'utiliser des bases de données pré-remplies, comportant des données correspondant aux états à simuler.

8.2.2 Visualisation

Dans le mode *appareils* du système, tous les appareils sont affichés sur le même graphe. Les utilisateurs peuvent retirer des appareils afin de se focaliser sur les courbes des appareils choisis, si bien que pendant les expérimentations cette visualisation a été appréciée des participants. Toutefois nous pouvons envisager une seconde visualisation basée sur plusieurs graphiques en courbes parallèles (*small multiples*, voir 2.1.3). Les utilisateurs pourraient alors choisir entre avoir toutes les courbes sur le même graphe ou avoir des graphes parallèles. Cette visualisation pourrait également permettre de visualiser les consommations d'un grand nombre d'appareils simultanément.

Dans le mode *instances*, le lissage des données peut parfois gêner la distinction des états des appareils lorsque l'intervalle des données visualisé est large, par exemple sur plusieurs mois. En raison du lissage, certaines périodes où les appareils sont éteints et où la courbe de consommation est alors censée être à 0 apparaissent en effet avec une aire non vide (Figure 8.1). Ce problème n'a pas gêné les participants des expérimentations, car un simple zoom fait disparaître cette ambiguïté. Nous souhaiterions toutefois explorer d'avantage la visualisation de la consommation et des utilisations au cours du temps. Le filtre actuellement implémenté dans le système est un filtre gaussien, qui a l'avantage de conserver l'aire de la courbe et donc la quantité d'énergie consommée par les appareils. Nous pourrions toutefois envisager l'utilisation d'autres filtres, et notamment de filtres qui conserveraient les bornes temporelles des instances.

8.2.3 Interaction

Tout d'abord, la sélection directe des instances a été peu utilisée par les participants, il semble donc nécessaire de revoir cette sélection. Aussi un participant de l'expérimentation *in-situ* a indiqué que les sélections par critères pouvaient devenir complexes en cas de combinaisons de plusieurs critères. Nous envisageons donc une fonctionnalité permettant d'inférer les critères de sélection à partir d'une sélection d'instances manuelle. L'utilisateur pourrait par exemple sélectionner manuellement les instances de lavage en machine le week-end, ce qui mènerait à une sélection dont les critères seraient *lavage standard* et *week-end*. Ceci permettrait à la fois de simplifier la sélection par critères et de conserver les avantages de la sélection directe, car les utilisateurs définiraient directement le comportement à sélectionner de manière graphique.

Les appareils ainsi que les choix des utilisateurs représentent une grande diversité (voir 3.3). Ainsi la perspective d'avoir un système automatique qui trouve les meilleures modifications pour tous les utilisateurs semble inatteignable. En effet seuls les utilisateurs possèdent la connaissance de pourquoi et comment ils utilisent leurs appareils, et quel est l'effort requis pour modifier ces utilisations. De plus visualiser et interagir avec les données est crucial pour que les utilisateurs se rendent compte de l'impact des modifications. Nous pensons que les utilisateurs sont plus enclins à appliquer des modifications qu'ils ont trouvé eux-mêmes. Cependant il pourrait être utile de suggérer des modifications qui semblent appropriées en termes d'économies et d'effort estimé. Par exemple modifier des instances de *lavage standard* à *lavage économique* pour un lave-linge semble nécessiter un effort raisonnable. Ces suggestions pourraient également servir d'exemples lors de la phase d'apprentissage de notre outil.

8.2.4 Intégration dans un système domotique

Nous envisageons d'incorporer notre outil *Activelec* dans un système domotique tel que *Jeedom* [77]. Dans ce système, *Activelec* pourrait directement récupérer les données des capteurs en entrée, sans passer par un logiciel intermédiaire nécessaire lors de notre expérimentation *in-situ*. Les utilisateurs pourraient également exporter les modifications choisies sous forme de règles qui s'appliqueraient automatiquement sur les appareils. Par exemple l'utilisateur pourrait choisir d'éteindre la télévision après 22 heures pendant la semaine. Pour cela une règle qui éteindrait automatiquement la télévision pourrait être générée à partir de cette modification. Dans un système domotique *Activelec* pourrait également bénéficier d'autres sources de données, par exemple la température ou le niveau de luminosité. Visualiser toutes ces sources de données, comme dans l'outil de Castelli *et al.* [24], pourrait apporter du contexte et ainsi mener à une meilleure analyse des données. Par exemple les utilisateurs mettraient en relation la consommation du chauffage avec la température extérieure, et tester une diminution du chauffage si la température est suffisamment élevée.

Conclusion

Pour conclure cette thèse, nous commençons par résumer nos contributions avant de lister les travaux publiés au cours de la thèse.

Résumé des contributions

Approche *what if* et *Activelec*

Nous avons en premier lieu présenté une méthode *what if* permettant aux utilisateurs de tester des changements de comportements virtuels et d'évaluer leur impact sur la consommation d'énergie (Chapitre 4). Cette méthode, basée sur un modèle de données conçu spécifiquement, a été implémentée dans le système *Activelec* qui utilise des données réelles.

Expérimentations en laboratoire

Afin d'évaluer l'utilisabilité de la méthode et du système, nous avons conduit deux expérimentations en laboratoire (Chapitre 5). Ces deux expérimentations ont montré que les participants arrivent à trouver rapidement des modifications efficaces en termes d'économies d'énergie, et qui ne nécessitent que peu d'effort pour être appliquées. De plus les participants ont efficacement apporté leurs propres connaissances sur leur comportement lors de la seconde expérimentation.

Déploiement et évaluation de la méthode en contexte domestique personnel

Le contexte des deux expérimentations menées en laboratoire diffère d'une utilisation en contexte domestique réel. L'expérimentation *in-situ* au cours de laquelle nous avons déployé le système *Activelec* a donc comblé cette limitation (Chapitre 6). Ce déploiement a permis de montrer que notre méthode est utilisable en contexte domestique réel. Les participants ont apprécié la méthode, et ont tous souhaité appliquer dans leur logement des modifications trouvées grâce à notre méthode. Cette expérimentation a également abouti à plusieurs améliorations possibles pour notre méthode.

Publications

Les travaux présentés dans cette thèse ont fait l'objet de trois publications :

- Activelec: an Interaction-Based Visualization System to Analyze Household Electricity Consumption
  Jérémy Wambecke, Georges-Pierre Bonneau, Renaud Blanch, Romain Vergne
  Workshop Vis in Practice - Visualization Solutions in the Wild, IEEE VIS 2017, Oct 2017, Phoenix, United States. 2017

- What if we use the "What if" Approach for Eco-Feedback? Designing an Electricity Consumption Analysis for Layman Users
  Jérémy Wambecke, Georges-Pierre Bonneau, Renaud Blanch, Romain Vergne
  EnvirVis 2018 - Workshop on Visualisation in Environmental Sciences, Jun 2018, Brno, Czech Republic. pp.1-8, 2018

- *(à paraître)* Evaluation in-situ d'une approche "What if" pour l'eco-feedback.
  Jérémy Wambecke, Georges-Pierre Bonneau, Renaud Blanch, Romain Vergne
  IHM 2018 - 30ième conférence francophone sur l'interaction Homme machine, Octobre 2018, Brest, France. 2018

Bibliographie

[1] R. Acas, E. Barquissau, Y.-M. Boulvert, E. Dosquet, F. Dosquet, J. Pirotte, and O. Ezratty. *Objets connectés : la nouvelle révolution numérique*. Saint-Herblain : Éditions ENI, 2016.

[2] ADEME. Chiffres clés climat, air et energie. `https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf`, 2015.

[3] ADEME. Réduire sa facture d'électricité. `https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-reduire-facture-electricite.pdf`, 2017.

[4] ADEME / Daniel Boy. Les représentations sociales de l'effet de serre et du réchauffement climatique. `https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/representations-sociales-effet-de-serre-et-du-rechauffement-climatique-rapport-final-2014.pdf`, 2014.

[5] Aeon. Aeon smart switch. `https://aeotec.com/z-wave-plug-in-switch`.

[6] S. Afzal, R. Maciejewski, and D. S. Ebert. Visual analytics decision support environment for epidemic modeling and response evaluation. In *2011 IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology (VAST)*, pages 191–200, Oct 2011. doi :10.1109/VAST.2011.6102457.

[7] C. Ahlberg and B. Shneiderman. Visual information seeking : Tight coupling of dynamic query filters with starfield displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '94, pages 313–317, New York, NY, USA, 1994. ACM. doi :10.1145/191666.191775.

[8] W. Aigner, S. Miksch, H. Schumann, and C. Tominski. *Visualization of Time-Oriented Data*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1st edition, 2011.

[9] R. Albert, I. Albert, and G. L. Nakarado. Structural vulnerability of the north american power grid. *Phys. Rev. E*, 69 :025103, Feb 2004. doi :10.1103/PhysRevE.69.025103.

[10] Amazon. Amazon echo. https://www.amazon.com/all-new-amazon-echo-speaker-with-wifi-alexa-dark-charcoal/dp/B06XCM9LJ4, 2015.

[11] Amiqual4Home. Smart home of amiqual4home project. https://amiqual4home.inria.fr/tools/smart-home/, 2017.

[12] Amphiro. Amphiro b1 connect. https://www.amphiro.com/fr/produkt/amphiro-b1-connect/, 2016.

[13] S. K. Badam, J. Zhao, S. Sen, N. Elmqvist, and D. Ebert. Timefork : Interactive prediction of time series. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pages 5409–5420, New York, NY, USA, 2016. ACM. doi :10.1145/2858036.2858150.

[14] M. Bang, C. Torstensson, and C. Katzeff. The powerhouse : A persuasive computer game designed to raise awareness of domestic energy consumption. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, volume 3962 LNCS, pages 123–132, 2006. doi :10.1007/11755494_18.

[15] L. Bartram. Design Challenges and Opportunities for Eco-Feedback in the Home. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 35(4) :52–62, 2015. doi :10.1109/MCG.2015.69.

[16] L. Berry and T. Munzner. Binx : Dynamic exploration of time series datasets across aggregation levels. In *IEEE Symposium on Information Visualization*, pages p2–p2, Oct 2004. doi :10.1109/INFVIS.2004.11.

[17] C. Bird, T. Zimmermann, and T. Zimmermann. Assessing the value of branches with what-if analysis. In *Proceedings of the 20th International Symposium on Foundations of Software Engineering (FSE 2012)*. Association for Computing Machinery, Inc., November 2012. URL https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/assessing-the-value-of-branches-with-what-if-analysis/.

[18] M. Boudellal. *Smart Home. Habitat connecté, installations domotiques et multimédia*. Dunod, Aug. 2014.

[19] J. Boy, R. A. Rensink, E. Bertini, and J.-D. Fekete. A principled way of assessing visualization literacy. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 20(12) :1963–1972, 2014. doi :doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/TVCG.2014.2346984.

[20] C. A. Brewer. Colorbrewer. http://www.ColorBrewer.org, 2003.

[21] K. Buchanan, R. Russo, and B. Anderson. Feeding back about eco-feedback : How do consumers use and respond to energy monitors ? *Energy Policy*, 73 :138–146, 2014. doi :10.1016/j.enpol.2014.05.008.

[22] G. Calvary, T. Delot, F. Sèdes, and J.-Y. Tigli. *Informatique et Intelligence Ambiante : des Capteurs aux Applications (Traité Informatique et Systèmes d'Information, IC2)*. Hermes Science, July 2012.

[23] S. K. Card, J. D. Mackinlay, and B. Shneiderman, editors. *Readings in Information Visualization : Using Vision to Think*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1999.

[24] N. Castelli, C. Ogonowski, T. Jakobi, M. Stein, G. Stevens, and V. Wulf. What happened in my home ? : An end-user development approach for smart home data visualization. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pages 853–866, New York, NY, USA, 2017. ACM. doi :10.1145/3025453.3025485.

[25] Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie. Données statistiques du ceren. `https://www.ceren.fr/publications/`, 2015.

[26] M. Chetty, D. Haslem, A. Baird, U. Ofoha, B. Sumner, and R. Grinter. Why is my internet slow ? : Making network speeds visible. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pages 1889–1898, New York, NY, USA, 2011. ACM. doi :10.1145/1978942.1979217.

[27] E. H.-H. Chi and J. T. Riedl. An operator interaction framework for visualization systems. In *Proceedings IEEE Symposium on Information Visualization (Cat. No.98TB100258)*, pages 63–70, Oct 1998. doi :10.1109/INFVIS.1998.729560.

[28] E. K. Choe, B. Lee, and m. schraefel. Characterizing visualization insights from quantified selfers' personal data presentations. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 35(4) :28–37, July-Aug. 2015. doi :10.1109/MCG.2015.51.

[29] E. K. Choe, N. B. Lee, B. Lee, W. Pratt, and J. A. Kientz. Understanding quantified-selfers' practices in collecting and exploring personal data. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pages 1143–1152, New York, NY, USA, 2014. ACM. doi :10.1145/2556288.2557372.

[30] Commission Européenne. Paquet sur le climat et l'énergie à l'horizon 2020. `https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_fr`, 2008.

[31] Commission Européenne. Directive 2009/72/ce du parlement européen et du conseil du 13 juillet 2009 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité et abrogeant la directive 2003/54/ce. `http://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX\%3A32009L0072`, 2009.

[32] Commission Européenne. Benchmarking smart metering deployment in the eu-27 with a focus on electricity. `http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014SC0188&from=EN`, 2014.

[33] Commission Européenne. Cadre pour le climat et l'énergie à l'horizon 2030. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_fr, 2014.

[34] E. Costanza, S. D. Ramchurn, and N. R. Jennings. Understanding domestic energy consumption through interactive visualisation : a field study. *Proceedings of the 2012 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp '12)*, pages 216–225, 2012. doi :10.1145/2370216.2370251.

[35] J. Coutaz and J. Crowley. Plan "intelligence ambiante" : Défis et opportunités. Document de réflexion conjoint du comité d'experts " Informatique Ambiante " du département ST2I du CNRS et du Groupe de Travail " Intelligence Ambiante " du Groupe de Concertation Sectoriel (GCS3) du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, DGRI A3., 2008.

[36] Credoc. Enquête Habitants, habitats et modes de vie pour Promotelec. http://www.credoc.fr/pdf/Sou/Enquete_N1_Habitants_Habitats_Modes%20de%20vies_Promotelec_Octobre%202013.pdf, 2014.

[37] J. Cumin, G. Lefebvre, F. Ramparany, and J. L. Crowley. A dataset of routines of daily living in an instrumented smart home. In *Proceedings of the 11th International Conference on Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence (UCAmI)*, Cham, Switzerland, 10 2017. Springer International Publishing.

[38] S. Darby. The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption. *Environmental Change Institute University of Oxford*, 22(April) :1–21, 2006, arXiv :1011.1669v3. doi :10.4236/ojee.2013.21002.

[39] Department of Energy and Climate Change, Intertek Testing and Certification Ltd. Household electricity survey, 2010-2011. uk data service [data collection]. https://www.gov.uk/government/collections/household-electricity-survey, 2014.

[40] S. S. S. R. Depuru, L. Wang, V. Devabhaktuni, and N. Gudi. Smart meters for power grid - challenges, issues, advantages and status. In *2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, pages 1–7, March 2011.

[41] E. Dimara, A. Bezerianos, and P. Dragicevic. Conceptual and methodological issues in evaluating multidimensional visualizations for decision support. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(1) :749–759, Jan 2018. doi :10.1109/TVCG.2017.2745138.

[42] DomotiGa. https://www.domotiga.nl/projects/domotiga/wiki/Home, 2015.

[43] P. Dragicevic and S. Huot. SpiraClock : a continuous and non-intrusive display for upcoming events. In *CHI '02 extended abstracts on Human factors in computer systems*, pages 604–605, Minneapolis, MN, United States, 2002. ACM Press. doi :10.1145/506443.506505.

[44] EDF. Heures creuses : un prix avantageux 8h par jour. https://particulier.edf.fr/fr/accueil/contrat-et-conso/options/heures-creuses.html.

[45] EDF. Tempo : suivez le rythme ! https://particulier.edf.fr/fr/accueil/contrat-et-conso/options/tempo.html.

[46] A. K. Ehrhardt-martinez and K. a. Donnelly. Advanced Metering Initiatives and Residential Feedback Programs : A Meta-Review for Household Electricity-Saving Opaportunities. *Energy*, 123(6) :128, 2010.

[47] C. Eid, E. Koliou, M. Valles, J. Reneses, and R. Hakvoort. Time-based pricing and electricity demand response : Existing barriers and next steps. *Utilities Policy*, 40 :15 – 25, 2016. doi :https ://doi.org/10.1016/j.jup.2016.04.001.

[48] Enedis. Linky, le compteur communicant. https://www.enedis.fr/linky-compteur-communicant.

[49] Enedis. 5 millions de compteurs communicants. http://www.enedis.fr/actualites/5-millions-de-compteurs-communicants, 2017.

[50] Energy Star. Energy star clothes washer tips. https://www.energystar.gov/products/laundry_best_practices.

[51] Engie. Calculer la consommation électrique de vos appareils. https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/prix-electricite/comment-calculer-consommation-electrique.html, 2015.

[52] T. Erickson, M. Li, Y. Kim, A. Deshpande, S. Sahu, T. Chao, P. Sukaviriya, and M. Naphade. The Dubuque Electricity Portal : Evaluation of a City-Scale Residential Electricity Consumption Feedback System. *Chi 2013*, pages 1203–1212, 2013. doi :10.1145/2470654.2466155.

[53] S. Faisal, A. Blandford, and H. W. Potts. Making sense of personal health information : Challenges for information visualization. *Health Informatics Journal*, 19(3) :198–217, 2013, https ://doi.org/10.1177/1460458212465213. doi :10.1177/1460458212465213. PMID : 23981395.

[54] Fibaro. Fibaro wall-plug. https://www.fibaro.com/fr/products/wall-plug/.

[55] C. Fischer. Feedback on household electricity consumption : a tool for saving energy ? *Energy Efficiency*, 1(1) :79–104, Feb 2008. doi :10.1007/s12053-008-9009-7.

[56] Fitbit. Fitbit charge 2. https://www.fitbit.com/fr/charge2.

[57] J. Froehlich, L. Findlater, and J. Landay. The design of eco-feedback technology. In *Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems - CHI '10*, page 1999, 2010. doi :10.1145/1753326.1753629.

[58] J. Frost and B. Smith. Visualizing health practice to treat diabetes. In *CHI '02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '02, pages 606–607, New York, NY, USA, 2002. ACM. doi :10.1145/506443.506506.

[59] F. Gangale, A. Mengolini, and I. Onyeji. Consumer engagement : An insight from smart grid projects in Europe. *Energy Policy*, 60 :621–628, 2013. doi :10.1016/j.enpol.2013.05.031.

[60] Gapminder. Trendalyzer. `https://www.gapminder.org/tag/trendalyzer/`, 2006.

[61] M. Golfarelli, S. Rizzi, and A. Proli. Designing what-if analysis : Towards a methodology. In *Proceedings of the 9th ACM International Workshop on Data Warehousing and OLAP*, DOLAP '06, pages 51–58, New York, NY, USA, 2006. ACM. doi :10.1145/1183512.1183523.

[62] S. Goodwin, J. Dykes, S. Jones, I. Dillingham, G. Dove, A. Duffy, A. Kachkaev, A. Slingsby, and J. Wood. Creative user-centered visualization design for energy analysts and modelers. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(12) :2516–2525, 2013. doi :10.1109/TVCG.2013.145.

[63] Google. Google home. `https://store.google.com/fr/product/google\_home`, 2016.

[64] GRDF. Gazpar, le compteur communicant gaz. `https://www.grdf.fr/dossiers/gazpar-le-compteur-communicant`, 2016.

[65] GreenFlex / Ethicity / ADEME. Les français et la consommation responsable. `https://www.greenflex.com/wp-content/uploads/2016/05/2016_GF-ETUDE-ETHICITY-2016-Livret.pdf?lp_redirect_1610`, 2017.

[66] A. Grinsted, J. C. Moore, and S. Jevrejeva. Projected atlantic hurricane surge threat from rising temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(14) :5369–5373, 2013, http ://www.pnas.org/content/110/14/5369.full.pdf. doi :10.1073/pnas.1209980110.

[67] A. Gustafsson and M. Gyllenswärd. The power-aware cord : Energy Awareness through Ambient Information Display. *CHI '05 extended abstracts on Human factors in computing systems - CHI '05*, page 1423, 2005. doi :10.1145/1056808.1056932.

[68] A. Gustafsson, C. Katzeff, and M. Bang. Evaluation of a pervasive game for domestic energy engagement among teenagers. *Computers in Entertainment*, 7(4) :1, 2009. doi :10.1145/1658866.1658873.

[69] T. Hargreaves, M. Nye, and J. Burgess. Making energy visible : A qualitative field study of how householders interact with feedback from smart energy monitors. *Energy Policy*, 38(10) :6111–6119, 2010. doi :10.1016/j.enpol.2010.05.068.

[70] H. He, S. Greenberg, and E. Huang. One size does not fit all : applying the transtheoretical model to energy feedback technology design. *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '10*, pages 927–936, 2010. doi :10.1145/1753326.1753464.

[71] T. G. Holmes. Eco-visualization : combining art and technology to reduce energy consumption. *Proceedings of the 6th ACM SIGCHI conference on Creativity and Cognition*, pages 153–162, 2007. doi :10.1145/1254960.1254982.

[72] D. Huang, M. Tory, B. A. Aseniero, L. Bartram, S. Bateman, S. Carpendale, A. Tang, and R. Woodbury. Personal visualization and personal visual analytics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 21(3) :420–433, March 2015. doi :10.1109/TVCG.2014.2359887.

[73] Hydrao. Hydrao shower first. `https://www.hydrao.com/fr/store/shower-coach/hydrao-shower-first`.

[74] Institute for Climate Economics / Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer. Chiffres clés du climat france et monde. `https://www.i4ce.org/wp-core/wp-content/uploads/2016/11/Chiffres-cl%C3%A9s-du-Climat-2017-FR-BD-4.pdf`, 2017.

[75] International Agency for Research on Cancer. Air pollution and cancer. `http://www.iarc.fr/en/publications/books/sp161/AirPollutionandCancer161.pdf`, 2013.

[76] W. Javed, B. McDonnel, and N. Elmqvist. Graphical perception of multiple time series. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16(6) :927–934, nov 2010. doi :10.1109/TVCG.2010.162.

[77] Jeedom. `https://www.jeedom.com/site/fr/`.

[78] W. Kempton and L. L. Layne. The consumer's energy analysis environment. *Energy Policy*, 22(10) :857–866, 1994. doi :10.1016/0301-4215(94)90145-7.

[79] A. Kendel, N. Lazaric, and K. Maréchal. What do people 'learn by looking' at direct feedback on their energy consumption ? Results of a field study in Southern France. *Energy Policy*, 108 :593–605, 2017. doi :10.1016/j.enpol.2017.06.020.

[80] A. Khosrowpour, Y. Xie, J. E. Taylor, and Y. Hong. One size does not fit all : Establishing the need for targeted eco-feedback. *Applied Energy*, 184 :523–530, 2016. doi :10.1016/j.apenergy.2016.10.036.

[81] H. Khurana, M. Hadley, N. Lu, and D. A. Frincke. Smart-grid security issues. *IEEE Security Privacy*, 8(1) :81–85, Jan 2010. doi :10.1109/MSP.2010.49.

[82] P. Lago, F. Lang, C. Roncancio, C. Jiménez-Guarín, R. Mateescu, and N. Bonnefond. *The ContextAct@A4H Real-Life Dataset of Daily-Living Activities*, pages 175–188. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2017. doi :10.1007/978-3-319-57837-8_14.

[83] I. Li, A. Dey, and J. Forlizzi. A stage-based model of personal informatics systems. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, pages 557–566, New York, NY, USA, 2010. ACM. doi :10.1145/1753326.1753409.

[84] I. Li, A. K. Dey, and J. Forlizzi. Understanding my data, myself : Supporting self-reflection with ubicomp technologies. In *Proceedings of the 13th International Conference on Ubiquitous Computing*, UbiComp '11, pages 405–414, New York, NY, USA, 2011. ACM. doi :10.1145/2030112.2030166.

[85] I. Li, A. K. Dey, and J. Forlizzi. Using context to reveal factors that affect physical activity. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 19(1) :7 :1–7 :21, may 2012. doi :10.1145/2147783.2147790.

[86] Z. Liang, B. Ploderer, W. Liu, Y. Nagata, J. Bailey, L. Kulik, and Y. Li. Sleepexplorer : A visualization tool to make sense of correlations between personal sleep data and contextual factors. *Personal Ubiquitous Comput.*, 20(6) :985–1000, Nov. 2016. doi :10.1007/s00779-016-0960-6.

[87] Lifedomus. `http://www.lifedomus.com/solution-domotique-page-la-gamme-presentation-de-la-gamme-lifedomus-16-fr.html`.

[88] W. E. Mackay and M. B. Lafon. Reification, Polymorphism and Reuse : Three Principles for Designing Visual Interfaces. In *In Proc. Advanced Visual Interfaces, AVI 2000*, Palermo, Italy, 2000. URL `http://www.cs.toronto.edu/~nernst/papers/mackay-AVI2000.Principles.pdf`.

[89] L. Mamykina, E. Mynatt, P. Davidson, and D. Greenblatt. Mahi : Investigation of social scaffolding for reflective thinking in diabetes management. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '08, pages 477–486, New York, NY, USA, 2008. ACM. doi :10.1145/1357054.1357131.

[90] Microsoft. Introduction to what-if analysis. `https://support.office.com/en-US/article/Introduction-to-what-if-analysis-22BFFA5F-E891-4ACC-BF7A-E4645C446FB4`.

[91] Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer. La loi de transition énergétique pour la croissance verte en actions. `https://www.ecologique-`

solidaire.gouv.fr/sites/default/files/La%20loi%20de%20transition%20%C3%A9nerg%C3%A9tique%20pour%20la%20croissance%20verte%20en%20actions%20%28%2032%20pages%20-%20juillet%202016%20-%20Versions%20fran%C3%A7aise%29.pdf, 2016.

[92] Mint. https://www.mint.com/.

[93] D. Mountain. The Impact of Real-Time Feedback on Residential Electricity Consumption : The Hydro One Pilot. *Study Summary*, 2006.

[94] T. Munzner. *Visualization Analysis and Design*. A.K. Peters visualization series. A K Peters, 2014.

[95] D. A. Norman. *The Design of Everyday Things*. Basic Books, New York, reprint paperback edition, 2002.

[96] OpenEnergyMonitor. Myelectric. https://guide.openenergymonitor.org/applications/home-energy/.

[97] OpinionWay / ADEME. Enquête environnement. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/sondage_opinionway_pour_l_ademe_-_barometre_environnement_-_octobre_2016.pdf, 2016.

[98] Organisation des Nations Unies. Accords de paris. https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/what-is-the-paris-agreement, 2015.

[99] J. Piaget. *La psychologie de l'intelligence*. Bibliothèque des classiques. Armand Colin, Malakoff, 2013.

[100] J. Pierce, C. Fan, D. Lomas, G. Marcu, and E. Paulos. Some consideration on the (in) effectiveness of residential energy feedback systems. In *Proceedings of the 2010 Conference on Designing Interactive Systems (DIS '10)*, volume 45, pages 244–247, 2010. doi :10.1145/1858171.1858215.

[101] J. Pierce, W. Odom, and E. Blevis. Energy Aware Dwelling : A Critical Survey of Interaction Design for Eco-Visualizations. *Human Factors*, pages 1–8, 2008. doi :10.1145/1517744.1517746.

[102] J. Pierce and E. Paulos. Beyond energy monitors : interaction, energy, and emerging energy systems. *CHI '12 : Proceedings of the 2012 ACM annual conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–10, 2012. doi :10.1145/2207676.2207771.

[103] C. Plaisant, R. Mushlin, A. Snyder, J. Li, D. Heller, B. Shneiderman, and K. P. Colorado. Lifelines : Using visualization to enhance navigation and analysis of patient records. In *In Proceedings of the 1998 American Medical Informatic Association Annual Fall Symposium*, pages 76–80, 1998.

[104] Z. Pousman and J. Stasko. A taxonomy of ambient information systems : Four patterns of design. In *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, AVI '06, pages 67–74, New York, NY, USA, 2006. ACM. doi :10.1145/1133265.1133277.

[105] Z. Pousman, J. Stasko, and M. Mateas. Casual information visualization : Depictions of data in everyday life. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(6) :1145–1152, Nov. 2007. doi :10.1109/TVCG.2007.70541.

[106] D. Preuveneers and Y. Berbers. Mobile phones assisting with health self-care : A diabetes case study. In *Proceedings of the 10th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '08, pages 177–186, New York, NY, USA, 2008. ACM. doi :10.1145/1409240.1409260.

[107] PricewaterhouseCoopers. Smart home, seamless life unlocking a culture of convenience. `https://www.pwc.fr/fr/assets/files/pdf/2017/01/pwc-consumer-intelligence-series-iot-connected-home.pdf`, 2017.

[108] Quantified Self. `http://quantifiedself.com/`.

[109] Rapberry. Raspberry pi 3. `https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/`.

[110] J. C. Roberts, C. Headleand, D. Perkins, and P. D. Ritsos. Personal visualization for learning. In *Workshop Personal Visualization : Exploring Data in Everyday Life , IEEE VIS 2015*. ACM, 2015.

[111] G. Robertson, R. Fernandez, D. Fisher, B. Lee, and J. Stasko. Effectiveness of animation in trend visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 14(6) :1325–1332, Nov 2008. doi :10.1109/TVCG.2008.125.

[112] C. Ryan and J. M. Lewis. Computer and internet use in the united states : 2015. Published online, Sep 2017.

[113] R. M. Ryan and E. L. Deci. Intrinsic and extrinsic motivations : Classic definitions and new directions. *Contemporary Educational Psychology*, 25(1) :54 – 67, 2000. doi :https ://doi.org/10.1006/ceps.1999.1020.

[114] Réseau de transport d'électricité (RTE). Pertes sur le réseau public de transport. `http://clients.rte-france.com/lang/fr/visiteurs/vie/vie\_perte\_RPT.jsp`, 2012.

[115] Réseau de transport d'électricité (RTE). Consommation française d'électricité : Caractéristiques et méthode de prévision. `http://clients.rte-france.com/htm/fr/vie/telecharge/Prev\_Conso\_2014.pdf`, 2014.

[116] Réseau de transport d'électricité (RTE). Voyage au coeur du réseau de demain. http://www.fncseg.eu/sites/default/files/fichier_blog/rte_-_dossier_innovation_electricite_et_digital_03_17.pdf, 2017.

[117] Réseau de transport d'électricité (RTE). Courbes journalières. http://clients.rte-france.com/lang/fr/visiteurs/vie/courbes.jsp, 2018.

[118] T. Saito, H. N. Miyamura, M. Yamamoto, H. Saito, Y. Hoshiya, and T. Kaseda. Two-tone pseudo coloring : compact visualization for one-dimensional data. In *IEEE Symposium on Information Visualization, 2005. INFOVIS 2005.*, pages 173–180, Oct 2005. doi :10.1109/INFVIS.2005.1532144.

[119] J. Schwarz, J. Mankoff, and H. S. Matthews. Reflections of everyday activities in spending data. In *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems - CHI 09*, page 1737, 2009. doi :10.1145/1518701.1518968.

[120] P. Siano. Demand response and smart grids—a survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30 :461 – 478, 2014. doi :https ://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.022.

[121] Somfy. Tahoma. https://www.somfy.fr/produits/domotique/maison-connectee-tahoma.

[122] A. Spagnolli, N. Corradi, L. Gamberini, E. Hoggan, G. Jacucci, C. Katzeff, L. Broms, and L. Jonsson. Eco-feedback on the go : Motivating energy awareness. *Computer*, 44(5) :38–45, 2011. doi :10.1109/MC.2011.125.

[123] J. Stasko, T. Miller, Z. Pousman, C. Plaue, and O. Ullah. Personalized peripheral information awareness through information art. In N. Davies, E. D. Mynatt, and I. Siio, editors, *UbiComp 2004 : Ubiquitous Computing*, pages 18–35, Berlin, Heidelberg, 2004. Springer Berlin Heidelberg.

[124] L. P. Steffe and J. E. Gale. *Constructivism in Education*. Lawrence Erlbaum Associates, 1995.

[125] Y. A. Strengers. Designing eco-feedback systems for everyday life. In *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems - CHI '11*, page 2135, 2011. doi :10.1145/1978942.1979252.

[126] M. B. Tariq, K. Bhandankar, V. Valancius, A. Zeitoun, N. Feamster, and M. Ammar. Answering 'what-if' deployment and configuration questions with wise : Techniques and deployment experience. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 21(1) :1–13, Feb 2013. doi :10.1109/TNET.2012.2230448.

[127] The Energy Detective. http://www.theenergydetective.com/.

[128] E. Thereska, D. Narayanan, and G. R. Ganger. Towards self-predicting systems : What if you could ask "what-if" ? In *16th International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA'05)*, pages 196–200, Aug 2005. doi :10.1109/DEXA.2005.191.

[129] C. D. Thomas, R. E. Cameron, Alisonand Green, M. Bakkenes, L. J. Beaumont, Y. C. Collingham, B. F. N. Erasmus, M. F. de Siqueira, A. Grainger, L. Hannah, L. Hughes, B. Huntley, A. S. van Jaarsveld, G. F. Midgley, L. Miles, M. A. Ortega-Huerta, A. Townsend Peterson, O. L. Phillips, and S. E. Williams. Extinction risk from climate change. *Nature*, 427 :145–148, Jan 2004. doi :10.1038/nature02121.

[130] C. Tominski and W. Aigner. The timeviz browser a visual survey of visualization techniques for time-oriented data. `https://vcg.informatik.uni-rostock.de/~ct/timeviz/timeviz.html?3D=0`, 2015.

[131] C. Tominski and H. Schumann. Enhanced interactive spiral display. *Proceedings of the annual SIGRAD conference, special theme : interactivity*, pages 53–56, 2008.

[132] K. E. Trenberth, A. C. Dai, G. van der Schrier, P. D. Jones, J. Barichivich, K. R. Briffa, and J. Sheffield. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(17), 2013. doi :10.1038/nclimate2067.

[133] E. R. Tufte. *The Visual Display of Quantitative Information.* Graphics Press, Cheshire, CT, USA, 1986.

[134] E. R. Tufte. *Beautiful Evidence.* Graphics Press, Cheshire, CT, 2006.

[135] J. Tulusan, T. Staake, and E. Fleisch. Providing eco-driving feedback to corporate car drivers : what impact does a smartphone application have on their fuel efficiency ? *Proc. UbiComp '12*, pages 212–215, 2012. doi :10.1145/2370216.2370250.

[136] U.S.-Canada Power System Outage Task Force. Final report on the august 14, 2003 blackout in the united states and canada : Causes and recommendations. `https://www3.epa.gov/region1/npdes/merrimackstation/pdfs/ar/AR-1165.pdf`, 2004.

[137] U.S. Energy Information Administration. Nearly half of all u.s. electricity customers have smart meters. `https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=34012`, 2017.

[138] B. Victor. Ten brighter ideas ? an explorable explanation. `http://worrydream.com/\#!/TenBrighterIdeas`, 2010.

[139] B. Victor. Explorable explanations. `http://worrydream.com/\#!/ExplorableExplanations`, 2011.

[140] J. Waser, R. Fuchs, H. Ribicic, B. Schindler, G. Bloschl, and E. Groller. World lines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16(6) :1458–1467, Nov 2010. doi :10.1109/TVCG.2010.223.

[141] M. Weber, M. Alexa, and W. Müller. Visualizing time-series on spirals. In *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization 2001 (INFOVIS'01)*, INFOVIS '01, pages 7–, Washington, DC, USA, 2001. IEEE Computer Society. URL `http://dl.acm.org/citation.cfm?id=580582.857719`.

[142] M. Weiser. The computer for the 21st century. *Scientific American*, 265(3) :94–104, Sept. 1991.

[143] G. Wood and M. Newborough. Dynamic energy-consumption indicators for domestic appliances : Environment, behaviour and design. *Energy and Buildings*, 35(8) :821–841, 2003. doi :10.1016/S0378-7788(02)00241-4.

[144] R. Yun, A. Aziz, P. Scupelli, B. Lasternas, C. Zhang, and V. Loftness. Beyond Eco-Feedback : Adding Online Manual and Automated Controls to Promote Workplace Sustainability. *Proceedings of the ACM CHI'15 Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1 :1989–1992, 2015. doi :10.1145/2702123.2702268.

[145] Z-Wave. Safer, smarter homes start with z-wave. `http://www.z-wave.com/`.