HAL
open science

Modéliser le concept de confort dans un habitat intelligent : du multisensoriel au comportement

Mathieu Gallissot

To cite this version:

Mathieu Gallissot. Modéliser le concept de confort dans un habitat intelligent : du multisensoriel au comportement. Mathématiques générales [math.GM]. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GRENM018 . tel-00738342

HAL Id: tel-00738342

https://theses.hal.science/tel-00738342

Submitted on 4 Oct 2012

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

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

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Informatique**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Mathieu GALLISSOT

Thèse dirigée par **Jean CAELEN**

préparée au sein du **Laboratoire d'Informatique de Grenoble**
et de l'**École Doctorale Mathématiques, Sciences et Technologies de l'Information, Informatique**

Modéliser le concept de confort dans l'habitat intelligent : du multisensoriel au comportement

Thèse soutenue publiquement le **26 Avril 2012**
devant le jury composé de :

M. Norbert NOURY
Professeur à l'Université Claude Bernard Lyon 1, Rapporteur
M. Eric CAMPO
Professeur à l'Université de Toulouse II, Rapporteur
M. Christophe KOLSKI
Professeur à l'Université de Valenciennes, Examinateur
Mme. Joëlle COUTAZ
Professeur à l'Université Joseph Fourier, Présidente
M. Claude MATINAL
Fondateur de SIRLAN Technologies, Invité
M. Jean CAELEN
Directeur de Recherches CNRS, Directeur de Thèse

Université Joseph Fourier / Université Pierre Mendès France /
Université Stendhal / Université de Savoie / Grenoble INP

Résumé

La notion de confort dans les habitats est une problématique majeure pour résoudre des problèmes écologiques (consommation et émissions des bâtiments), économiques (réduction de coûts d'exploitation) et sociaux (maintien et assistance à domicile) qui définissent le développement durable. Cependant, cette notion de confort est complexe, par le nombre de paramètres qu'elle intègre, paramètres à la fois humains (perception) et physiques (mesure). Notre étude vise à modéliser cette notion de confort dans un contexte d'habitat intelligent.

L'habitat intelligent émerge depuis le début des années 2000, et se positionne en héritier de la domotique, bénéficiant des progrès technologiques illustrés par l'informatique ubiquitaire et l'intelligence artificielle, concepts formants l'intelligence ambiante. La première partie de notre étude consiste à définir l'habitat intelligent, en formalisant les acquis (domotique) et les problématiques de recherche, sous l'angle de la représentation de connaissances par les modèles. Notre approche du bâtiment intelligent nous a permis de définir un cadre d'interopérabilité : un intergiciel capable de concentrer les paramètres et commandes d'un environnement. Cette interopérabilité est nécessaire de par l'hétérogénéité des objets communicants qui composent un habitat : hétérogénéité des applications, des protocoles de communication, de savoir-faire et d'usages.

Les travaux réalisés dans cette première partie de l'étude nous ont permis d'instrumenter une plate-forme d'expérimentation : la plateforme Domus. Ainsi, en reconstituant un appartement, et en le dotant d'objets communicants, nous avons pu mettre en œuvre, par le biais de l'interopérabilité, un environnement intelligent, environnement qui se caractérise par une forte densité d'information et une capacité de réaction. La réalisation de cette plate-forme est nécessaire pour aborder des thématiques diverses liées à l'habitat, comme le confort. En effet, l'intelligence ambiante apporte une nouvelle dimension dans ce cadre de recherche : l'ubiquité. La densité croissante de capteurs nous permet de collecter plus d'informations, non seulement sur l'environnement mais également sur l'utilisateur et son comportement, définissant ainsi une nouvelle approche du confort : le confort adaptatif.

Les travaux sur l'étude du confort dans les bâtiments se focalisent sur le confort thermique. Dans nos travaux, nous avons voulu nous intéresser au confort multisensoriel. Celui-ci permet d'une part de prendre en compte l'ensemble des paramètres qui agrémentent un environnement (l'air, le son, la vue) mais permet également de nous intéresser aux effets sensoriels croisés que peuvent induire ces modalités sur l'occupant. Par exemple, on soupçonne la température d'éclairage (éclairage rouge/chaud, éclairage bleu/froid) d'avoir une incidence sur la perception thermique. Des expérimentations ont en effet démontré l'approche pratique et l'approche théorique de ces effets multisensoriels.

La mise en place de notre cadre d'interopérabilité, en première partie, dans la plateforme Domus et les résultats de nos évaluations expérimentales, en seconde partie, sur le confort réalisés dans cette même plateforme, nous permettent de participer à la définition d'un « confort-mètre », qui s'appuie à la fois sur les capteurs, les objets de l'habitat et la perception des habitants.

Abstract

The notion of comfort in homes is a major problem to solve environmental problems (consumption and emissions of buildings), economic (reduction of operating costs) and social (maintenance and home care) that define sustainable development. However, this notion of comfort is complicated by the number of parameters that integrates both human (perception) and physical (measurement) parameters. Our study aims to model the concept of comfort in a smart home.

Smart homes emerged in the early 2000s, and are positioned as heir to home automation, benefiting from technological advances illustrated by ubiquitous computing and artificial intelligence, ambient intelligence concepts formants. The first part of this study was to define habitat intelligent, formalizing the gains (home automation) and research issues, in terms of knowledge representation by the models. Our approach to intelligent building allowed us to define a framework for interoperability: a middleware able to focus and control the parameters of an environment. This interoperability is required by the heterogeneity of communicating objects that make up a habitat: heterogeneity of applications, communication protocols, know-how and practices.

This first part of the study allowed us to instrument an experimental platform: the platform Domus. Thus, by restoring an apartment, and by providing it with smart objects, we could implement, through interoperability, an intelligent environment, environment characterized by high information density and capacity reaction. The realization of this platform is needed to address various topics related to housing, such as comfort. Indeed, ambient intelligence brings a new dimension in this research framework: ubiquity. The increasing density of sensors allows us to collect more information, not only the environment but also on the user and its behavior, thus defining a new approach to comfort: Adaptive comfort.

Most of the work focusing on thermal comfort, we are interested in multi-sensory comfort. This allows one hand to take into account all the parameters that enhances an environment (air, sound, sight) but also allows our attention to cross-sensory effects that can induce these terms on the occupier. For example, it is suspected the temperature light (red light / heat, light blue / cold) to affect the perception of heat. Experiments have shown the practical approach and the theoretical approach of multi-sensory effects.

The results of this study will be led to participate in the definition of "comfortmeter", a tool to sense comfort for both habitat and the inhabitant.

Remerciements

Je remercie messieurs Norbert NOURY et Eric CAMPO qui ont bien voulu rapporter mes travaux. Je remercie également Mme Joëlle COUTAZ et M Christophe KOLSKI de bien avoir voulu êtres membres du jury.

Je remercie Jean CAELEN et Claude MATINAL qui m'ont permis de réaliser cette thèse, et en ont été les encadrants, l'un scientifique et l'autre industriel. Ce que j'ai apprécié chez ces personnes, ce n'est pas seulement leur richesse d'expérience mais leur volonté de la transmettre, volonté qui coïncidait avec mon désir d'apprendre. Je me dois également remercier, ces deux personnes qui ont autant compté que mes encadrants : Olivier GANDIT et Brigitte MEILLON.

Je remercie Sybille CAFFIAU, et, par la même occasion, le service de fournitures bureautiques du Laboratoire. La première pour avoir passé un temps précieux à la relecture de ce mémoire, favorisant ainsi je l'espère la qualité et la lisibilité de celui-ci. Le second, pour avoir fourni à la première la quantité nécessaire de stylos rouges que les commentaires impliquaient. Je remercie par la même occasion Francis JAMBON, qui permit d'augmenter certains débats et par la même occasion d'augmenter ou de conforter certaines argumentations présentes au sein de ce manuscrit.

Je remercie également les autres personnes de l'équipe de recherche Multicom ainsi que de l'entreprise SIRLAN Technologies, en particulier Nicolas, éternel complice.

Quand on écrit une thèse, on peut se demander comment en est-on arrivé là. Atypisme serait le mot sans doute approprié dans mon cas. La domotique est un projet de carrière de longue date, dont cette thèse marque aujourd'hui une étape importante. Seulement, il n'y a *a priori* aucun chemin tracé pour un pré-bachelier d'arriver à un tel niveau de qualification dans ce domaine. Je me dois donc de remercier toutes les personnes, qui pendant mon parcours, ont su m'instruire et me guider. Ces remerciements s'adressent en particulier à Françoise MARCADET, Antonio FREITAS, Angus BROWN, Tony MILLER, John AMBROSE, James MULLEN, Mark ROBERTSON et Patrice BARBEL.

Je remercie également les industriels que j'ai pu côtoyer durant ce travail, et qui, par leur retour d'expérience, ont guidé certaines parties de ces travaux. Je tiens en particulier à remercier Marc FLEURY, Eric DUCROS, Stéphane DAVID, Jean-Pierre CHARDON, Jacques ISIDOR, Christian CARRICART et Guy BOURNERIE.

Enfin, je tiens à remercier tout ce qui m'ont posé un jour une question sous la forme « Et ton système, il pourra faire ceci ou cela ? ». Ils connaissent la réponse. Et bien que la question ait été souvent malvenue (mais toujours préférable à la classique « Et alors, ta thèse, ça avance ? »), elle m'a permis de mieux comprendre les attentes des habitants envers leurs habitats. Non seulement les attentes, mais aussi leur relations avec ce lieu particulier, leur réticences face à la technologie, et parfois, leur soif de connaissance (disons au moins curiosité) vis-à-vis des faces cachées de la « science du bâti ». Ce fût une réelle motivation de n'avoir ne serais-ce que l'espoir de leur répondre un jour « oui, mon système peut faire ça ».

Sommaire

Résumé iii

Abstract v

Remerciements vii

Sommaire ix

Table des figures xiii

Liste des tableaux xvii

1 Introduction Générale 1
1.1 Problème 1
1.2 Approche 1
1.3 Organisation du mémoire 2

PARTIE 1 : L'HABITAT INTELLIGENT (POINT DE VUE TECHNIQUE) 3

2 De la domotique à l'habitat intelligent 5
2.1 La domotique 7
2.1.1 Qu'est-ce que la domotique ? 8
2.1.2 De l'imaginaire au réel 10
2.2 L'intelligence ambiante 12
2.2.1 De l'informatique à l'intelligence ambiante 12
2.2.2 Domaines de l'intelligence ambiante 15
2.3 L'habitat intelligent 17
2.3.1 Qu'est-ce qu'une maison intelligente ? 18
2.3.2 Les maisons intelligentes existantes 19
2.4 Synthèse sur l'habitat intelligent 32

3 L'habitat intelligent par les objets intelligents 33
3.1 Les objets fonctionnels de l'habitat 35
3.1.1 Les objets du bâtiment 35
3.1.2 Les objets blancs 37
3.1.3 Les objets bruns et gris 37
3.1.4 Synthèse sur les objets fonctionnels 38
3.2 Les objets intelligents dans l'habitat 39
3.2.1 Qu'est-ce qu'un objet intelligent ? 39
3.2.2 Les différents acteurs autour de l'objet intelligent dans l'habitat 41
3.2.3 Perception des objets : de l'affordance à l'ingénierie 45
3.3 Discussion : problèmes de divergences 48
3.3.1 Divergences d'Objet à Objet 49
3.3.2 Divergences Objet à Service 50
3.3.3 Le besoin de convergence 51

4 L'habitat interopérable 53
4.1 Le besoin d'interopérabilité 55
4.1.1 Interopérabilité et compatibilité 55
4.1.2 Le test de l'interopérabilité : l'interchangeabilité 57
4.1.3 Exemple fil rouge : la lampe variée 58

4.2 Solutions proposées pour l'échange entre objets intelligents 62
4.2.1 Ingénierie dirigée par les modèles (IDM) 63
4.2.2 Intergiciel 63
4.2.3 Les passerelles de service 64
4.3 Proposition d'architecture pour l'interopérabilité applicative 66
4.3.1 Méthodologie et démarche 66
4.3.2 Le langage pivot : KNX 67
4.3.3 Architecture 72
4.4 Illustration de l'approche 74
4.5 Synthèse 76

5 Cas d'application : l'appartement Domus 77
5.1 Présentation de l'appartement intelligent Domus 79
5.1.1 La plateforme expérimentale LIG/MultiCom 79
5.1.2 L'appartement Domus 80
5.1.3 Instrumentation d'observation 83
5.2 Intégration des différentes technologies 84
5.2.1 KNX 85
5.2.2 X2D 85
5.2.3 DMX 86
5.2.4 RFID 87
5.2.5 UPnP (Universal Plug and Play) 89
5.2.6 Synchronization NTP (Network Time Protocol) 93
5.3 Utilisation de l'interopérabilité : développement de services de l'habitat 94
5.3.1 Interfaces homme/habitat 94
5.3.2 Interface pour le développement de services 100
5.3.3 Fonctions d'agrément 102
5.4 Retour d'expérience et synthèse 104
5.4.1 Retour d'expérience 104
5.4.2 Synthèse 105

Discussion 107

PARTIE 2 : L'ESPACE INTELLIGENT (POINT DE VUE HUMAIN) 109

6 De la pierre au foyer 111
6.1 Qu'est-ce que le confort ? 113
6.2 La mesure du confort lié au bâti 114
6.2.1 Les critères Institutionnels 114
6.2.2 Les Réglementations Thermiques 115
6.2.3 Démarche Haute Qualité Environnementale (HQE) 117
6.2.4 Discussion sur les critères de mesure du confort lié au bâti 118
6.3 La mesure du confort par les habitants 118
6.3.1 Le confort thermique 120
6.3.2 Le confort visuel 126
6.3.3 La qualité de l'air 131
6.3.4 Le confort acoustique 132
6.3.5 Synthèse 133
6.4 Discussion : le confort multisensoriel 134
6.4.1 Liens entre conforts 135
6.4.2 Le confort global 136

7 Méthode adaptative du confort multisensoriel pour l'habitat intelligent 139
7.1 Approche adaptative pour le confort de l'habitat intelligent 141
7.2 Le confort : un jugement d'ambiance 143
7.2.1 Besoins pour caractériser l'ambiance 143

7.2.2 Le repère d'ambiance 144
7.2.3 Identification de l'ambiance par les objets 146
7.3 L'évaluation de l'ambiance par l'occupant 148
7.3.1 Mesure par questionnaire 148
7.3.2 Inférence d'intention par affordance sur les objets 149
7.4 Synthèse et Ouverture : l'optimisation du confort 152

8 Evaluation expérimentale 155
8.1 Objectifs de l'évaluation 157
8.1.1 Acquisitions des données subjectives 158
8.1.2 Acquisition de données physiques 159
8.2 Expérimentation « *in vitro* » 160
8.2.1 Participants 160
8.2.2 Déroulement 161
8.2.3 Consignes aux participants 162
8.2.4 Rôle et interventions de l'expérimentateur 162
8.2.5 Données recueillies et sélection 165
8.2.6 Résultats et analyses 169
8.2.7 Conclusion sur l'expérimentation 180
8.3 Expérimentation « *in simu* » 180
8.3.1 Participants 181
8.3.2 Déroulement et consignes 181
8.3.3 Données récoltées et sélection 181
8.3.4 Perspectives d'analyse 182
8.4 Résultats de l'évaluation 183

Discussion 185

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 187

Synthèse 189

Perspectives 191

Bibliographie 193

ANNEXES 207

9 Modèles d'objets 209
9.1 Éclairage 209
Simple 209
9.1.1 209
9.1.2 Varié 210
9.1.3 Sonde luminosité 210
9.1.4 Eclairage dynamique 211
9.2 Ouvrants 211
9.2.1 Volets roulants et rideaux 211
9.2.2 Stores vénitiens 212
9.3 Chauffage, Ventilation et climatisation 212
9.3.1 Ventilation 212
9.3.2 Température 213
9.3.3 Humidité relative 213
9.3.4 Concentration en CO_2 213
9.4 Mesures 214
9.5 Détection d'ouverture 214
9.6 Détection de Présence 214

9.7 Chaîne de caractères 215
9.8 Annotation 215

10 Equipement de la plate-forme Domus 217
10.1 Eclairage conventionnel 218
10.2 Prises 220
10.3 Ouvrants 222
10.4 Détecteurs d'ouverture 224
10.5 Eclairage dynamique 226
10.6 Multimédia 228
10.6.1 Autres capteurs 229

11 Protocole expérimental 231
11.1 Check-list de préparation 231
11.2 Retours de l'expérimentateur 232
11.2.1 Retour des entretiens de conclusion 232
11.2.2 Synthèse 232

Table des figures

Figure 2-1. Scénario domotique de Brun et Descamps (Brun *et al.*, 1988)..... 10
Figure 2-2. Scénario domotique d'après « Fred the House », par A.P. Hald, extrait de (Cancellieri, 1992). . 11
Figure 2-3. La maison au doigt et à l'œil, Le Monde 26.06.2008..... 11
Figure 2-4. Evolution temporelle de l'informatique, depuis sa naissance jusqu'à l'informatique ambiante (Waldner, 2007)..... 13
Figure 2-5. Définition de l'intelligence ambiante par les définitions d'ambiance et d'intelligence (Coutaz *et al.*, 2008)..... 14
Figure 2-6. Pyramide de contexte proposée par Coutaz, Crowley et Rey (Coutaz *et al.*, 2005)..... 14
Figure 2-7. Evolution du nombre d'objets connectés à l'horizon 2020..... 15
Figure 2-8. Approche ascendante pour les maisons intelligentes, par Daniel Kaplan. Propos recueillis par Sabbah (Sabbah, 2010)..... 20
Figure 2-9 "Le prieuré", Maison Robert-Houdin (extraite du site officiel de la Mairie de Saint-Gervais-la-Forêt)..... 21
Figure 2-10. Photos des réalisations de G. Knap, avec à gauche le portail électrique de la "Villa Electra" à Troyes, et à droite une photo de la table électrique..... 22
Figure 2-11. Images extraites du site http://www.bwired.nl, avec l'aimable autorisation de Pieter Knuvers 24
Figure 2-12. The TRON Intelligent House..... 25
Figure 2-13. Vue extérieure de « The Toyota Dream House »..... 26
Figure 2-14. Vue extérieure de « The Adaptive House »..... 28
Figure 2-15. Vues intérieures du PlaceLab..... 29
Figure 2-16 The Aware Home..... 30
Figure 2-17. Evolution des maisons technologiques. 32
Figure 3-1. Rôle et structure simplifiée des acteurs lors de la conception et la construction d'un bâtiment 36
Figure 3-2 Contraintes de durées de vie et d'intégration des différents produits de l'habitat..... 38
Figure 3-3. Définition d'un objet intelligent selon Cisco..... 40
Figure 3-4. Rôle des acteurs associés à l'objet intelligent dans l'habitat..... 42
Figure 3-5. Perceptions d'un objet intelligent..... 46
Figure 3-6. Modèle d'un objet intelligent..... 49
Figure 4-1. Echanges entre deux entités A et B, sous forme de compatibilité (à gauche) et sous forme d'interopérabilité (à droite)..... 56
Figure 4-2. Approches interopérables (GOSPI, 2007)..... 57
Figure 4-3. Définition de Wikipédia pour l'interchangeabilité dans le domaine des technologies de l'information..... 58
Figure 4-4. Description des applications normalisées pour (en haut) la partie actionneur, (en bas) la partie contrôle..... 59
Figure 4-5. Description du produit UPnP, avec (en haut) le service de contrôle binaire et (en bas) le service du contrôle de la variation..... 60
Figure 4-6. Description d'une application pour le contrôle en DMX..... 60
Figure 4-7. Diagramme états/transitions pour une lampe variée..... 61
Figure 4-8. Organisation de l'intergiciel, d'après Krakowia (Krakowia, 2007)..... 64
Figure 4-9. Exemple d'architecture de distribution de services (Donsez, 2007)..... 65
Figure 4-10. Architecture du protocole KNX..... 68
Figure 4-11. Modèle commun du protocole KNX..... 68
Figure 4-13. Modèle de représentation d'un bloc fonctionnel KNX..... 70
Figure 4-14. Spécification du type de donné "Contrôle de variation"..... 71
Figure 4-15. Architecture globale de l'intergiciel proposé. Les couches grisées sont les couches conformes à la norme KNX..... 73
Figure 4-16. Représentation UML de l'interface d'une application virtuelle..... 74
Figure 4-17. Interface UML décrivant la couche de communication du langage KNX. 74

Figure 4-18. Illustration du modèle appliqué à l'exemple fil rouge, avec de gauche à droite le protocole KNX, le protocole UPnP et le protocole DMX. Les parties grisées sont interopérables. 75
Figure 5-1. Illustration 3D de la plateforme MultiCom 80
Figure 5-2. Illustration 3D de l'appartement Domus 81
Figure 5-3. Photos de l'aménagement de l'appartement, avec en haut à gauche l'espace cuisine, en haut à droite la chambre, en bas à gauche le bureau et en bas à droite la salle de bains 81
Figure 5-4. Plan partiel d'implantation de capteurs et effecteurs équipant l'appartement Domus 82
Figure 5-5. Architecture logicielle de l'appartement intelligent (application de la figure 4-15) 83
Figure 5-6. Système de contrôle des caméras de l'appartement intelligent 84
Figure 5-7. Modèle d'application pour l'éclairage dynamique 87
Figure 5-8. Topologie pour le pilotage d'une gâche électrique par l'intermédiaire d'un badge RFID 88
Figure 5-9. Exemples d'objets d'interaction, avec à gauche un objet affordé pour déclencher un scénario de coucher, à droite un objet affordé pour couper le son d'un dispositif sonore 89
Figure 5-10. Modèle Ecore décrivant un objet UPnP 90
Figure 5-11. Bloc fonctionnel d'un serveur de temps et du client associé 93
Figure 5-12. Copie d'écran de l'interface de supervision « Comfortice » pour le bureau de l'appartement Domus. 95
Figure 5-13. Exemple d'interfaces virtuelles d'objets dans le cadre de la supervision "Comfortice" avec à gauche une commande/contrôle pour des stores vénitiens, et à droite une commande/contrôle pour un éclairage plafonnier varié 95
Figure 5-14. Architecture de la suite OpenRemote 96
Figure 5-15. Interface tactile sur client OpenRemote pour Android 97
Figure 5-16. Exemple d'éclairage d'ambiance dans la cuisine de l'appartement Domus 98
Figure 5-17. Photo d'une dalle TangiSense 98
Figure 5-18. L'interface tangible TangiLight 99
Figure 5-19. Architecture d'intégration Interface/Service/Application virtuelle pour TangiLight 99
Figure 5-20: Représentation de l'application virtuelle CH_RGB_Sequencer 100
Figure 5-21. Consommations électriques journalières de l'appartement Domus du26 au 31 Juillet 2011 104
Figure 5-22. Schéma partiel de l'architecture objets/passerelle/services 106
Figure 6-1. Positionnement du juge vis-à-vis de l'environnement externe, du bâtiment et de l'environnement interne 119
Figure 6-2. Diagramme de liens entre les normes relatives à l'énergie et l'ambiance intérieure des bâtiments (AFNOR, 2007) 120
Figure 6-3. Résultat d'une expérimentation sur la perception thermique 121
Figure 6-4. Courbe du PPD en fonction du PMV 124
Figure 6-5. Diagramme de Kruithof 128
Figure 6-6. Couleurs d'éclairage et humeurs associées (Chaudron, 2005) 129
Figure 6-7. Critères de confort liés à l'habitat et l'habitant 134
Figure 6-8. Questionnaire et résultat pour mesurer l'acceptabilité de différents paramètres intérieurs (Rohles *et al.*, 1989) 137
Figure 6-9. Discussion sur le lien entre la perception synesthésique et la notion de confort (Delepaut, 2007) 138
Figure 7-1. Facteurs du confort sensoriel (Bonhomme, 2008) 141
Figure 7-2. Mesure d'une ambiance par contributions des objets, extrait de (Woloszyn *et al.*, 1998) 145
Figure 7-3. Modèle de contribution des apports artificiels d'un objet ambiant 146
Figure 7-4. Modèle de contribution des apports naturels d'un objet ambiant 147
Figure 7-5. Exemple de questionnaire subjectif multicritères 149
Figure 7-6. Modèle Interaction - Intention - Inconfort 151
Figure 8-1. Interface mobile de réponse au questionnaire commun aux expérimentations 159
Figure 8-2. Contenu d'un fichier « capteur » (exemple sur une lampe variable) 160
Figure 8-3.Déroulement temporel d'une expérimentation 161
Figure 8-4. Interface de contrôle des modalités visuelles et sonores à disposition de l'expérimentateur 165
Figure 8-5. Variances des données entrées par les sujets lors de l'expérimentation « *in vitro* » 167
Figure 8-6. Perception humaine et intégration des sensations (S1 et S2) en vue de percevoir un phénomène Ψ (Diard, 2009) 171
Figure 8-7. Illustration d'intégration de sensations visuelles et haptiques (Ernst *et al.*, 2002) 172
Figure 8-8. Réseau Bayésien utilisé pour l'analyse des conforts 173

Figure 8-9. Distributions du modèle Bayésien 174
Figure 8-10. Représentation des distances et de leurs fréquences 175
Figure 8-11. Réseau Bayésien utilisé pour l'analyse des perceptions et du confort 176
Figure 8-12. Représentation des distances et de leurs fréquences pour le modèle entre le confort global et les perceptions 177
Figure 8-13. Graphique du nombre de manipulations des objets de l'environnement faites par les sujets durant l'expérimentation « *in simu* » 182
Figure 8-1. Application pour un produit de puissance 209
Figure 8-2. Diagramme de transition pour un produit de puissance 209
Figure 8-3. Application pour une lampe variée 210
Figure 8-4. Diagramme de transition à états pour une lampe variée 210
Figure 8-5. Application pour une sonde de luminosité 211
Figure 8-6. Modèle d'application pour un ouvrant simple 212
Figure 8-7. Modèle d'application pour un ouvrant complexe 212
Figure 8-8. Modèle d'application pour une sonde de température 213
Figure 8-9. Modèle d'application pour une sonde d'humidité relative 213
Figure 8-10. Modèle d'application pour une sonde de CO_2. 214
Figure 8-11. Modèle d'application pour des valeurs numériques 214
Figure 8-12. Modèle d'application pour la détection d'ouverture 214
Figure 8-13. Modèle d'application pour la détection de présence 215
Figure 8-14. Modèle d'application pour la transmission de chaînes de caractères 215
Figure 10-1. Schéma d'implantation des divers points d'éclairage conventionnel 218
Figure 10-2. Schéma d'implantation des prises commandées 220
Figure 10-3. Schéma d'implantation des ouvrants 222
Figure 10-4. Schéma d'implantation des détecteurs d'ouverture 224
Figure 10-5. Schéma d'implantation de l'éclairage dynamique 226
Figure 10-6. Schéma d'implantation des objets multimédia 228

Liste des tableaux

Tableau 2-1. Définitions du terme domotique sous différentes approches (Cancellieri 1992, p.328) 9
Tableau 2-2. Synthèse des maisons intelligentes 31
Tableau 3-1. Classification des objets de l'habitat 35
Tableau 3-2. Rôles durant les étapes de déploiement des objets intelligents de l'habitat 45
Tableau 3-3. Couches du modèle OSI 47
Tableau 3-4. Protocoles de communication et applications pour les différents objets de l'habitat 50
Tableau 4-1. Définitions d'interopérabilité et compatibilité selon l'IEEE (IEEE, 1991) 55
Tableau 4-2. Définitions de l'interopérabilité 56
Tableau 4-3. Nom des transitions exposées en figure 4-7 61
Tableau 4-4. Tableau des états en fonction des protocoles accompagnant la figure 4-7 62
Tableau 4-5. Tableau des commandes assurant les transitions décrites en figure 4-7 62
Tableau 4-6. Codes sémantiques associés aux objets de groupe 72
Tableau 5-1. Correspondances entre objets "X2D" et les fonctions KNX équivalentes 86
Tableau 5-2. Structure d'une base pour la transformation RFID vers KNX 88
Tableau 5-3. Configuration du modèle de transformation pour l'exemple. 88
Tableau 5-4. Transformation des données entre le protocole UPnP et le protocole KNX 91
Tableau 5-5. Liste des objets de groupe pour l'application CH_RGB_Sequencer (figure 5-20) 100
Tableau 5-6. Correspondances d'export d'applications par le protocole UPnP 101
Tableau 6-1. Eléments de confort des logements, *Source : INSEE, enquêtes Logement (2006).* 114
Tableau 6-2. Critères de l'INSEE utilisés pour déterminer l'inconfort des logements en 2008 115
Tableau 6-3. Présentation des différentes réglementations thermiques 116
Tableau 6-4. Critères pour la labellisation "HQE" 117
Tableau 6-5. Sensations thermiques associées à l'indice PMV 123
Tableau 6-6. Détermination des températures de confort thermique adaptatif dans le cadre du projet SCATs (McCartney *et al.*, 2002) 125
Tableau 6-7. Exemples d'adaptations envers l'inconfort thermique, d'après Humphreys et Nicol (Humphreys *et al.*, 1998) 126
Tableau 6-8. Variables constituant les éléments de grandeurs qualifiants du confort visuel 127
Tableau 6-9. Echelle d'inconfort associée à l'UGR 129
Tableau 6-10. Valeurs recommandées par la norme NF EN 12464-1 130
Tableau 6-11. Sources courantes de pollution de l'air et polluants associés 131
Tableau 6-12. Phénomènes mis en jeu par rapport à la sensation de confort ressentie par l'individu, d'après Boulet (Boulet, 2009) 133
Tableau 7-1. Repère d'ambiance à quatre dimensions proposé pour l'étude 146
Tableau 7-2. Contributions par domaine des objets au repère d'ambiance 147
Tableau 7-3. Association de domaines de contribution en fonction des objets manipulés par l'habitant 152
Tableau 8-1. Critères et échelles pour le confort 158
Tableau 8-2. Légende et échelles pour les perceptions 158
Tableau 8-3. Liste et profil des participants à l'expérimentation « *in vitro* » 161
Tableau 8-4. Valeurs de « Clo » selon les tenues, d'après la norme ISO 9920 163
Tableau 8-5 Détails du calcul de l'alpha de Cronbach sur les données issues du questionnaire. 168
Tableau 8-6. Indices de corrélation entre le PMV et l'annotation issue du sujet 170
Tableau 8-7. Synthèse des indices de confiance pour la corrélation entre le confort global et les conforts spécifiques 175
Tableau 8-8. Synthèse des indices de confiance pour la corrélation entre le confort global et les perceptions 177
Tableau 8-9. Coefficients de Pearson entre les domaines de confort et les perceptions des sujets 178
Tableau 8-10. Variances des annotations par sujet et par scénario 179
Tableau 8-11. Liste et profil des participants à l'expérimentation « *in simu* » 181
Tableau 8-1. Détail des ressources pour l'application 209
Tableau 8-2. Ressources pour l'application d'éclairage varié 210
Tableau 8-3. Ressources pour l'application associée à une sonde de luminosité 210

Tableau 8-4. Ressources pour l'éclairage dynamique 211
Tableau 8-5. Ressources pour l'application associée à un ouvrant simple 211
Tableau 8-6. Ressources pour un ouvrant complexe 212
Tableau 8-7. Ressources pour l'application associée à une ventilation 212
Tableau 8-8. Ressources pour une sonde de température 213
Tableau 8-9. Ressources pour l'application associée à une sonde d'humidité 213
Tableau 8-10. Ressources pour l'application associée à une sonde de CO_2 213
Tableau 8-11. Ressources pour l'application de collecte de valeurs numériques 214
Tableau 8-12. Ressources pour l'application associée à une sonde d'ouverture 214
Tableau 8-13. Ressources pour l'application associée à un détecteur de présence 215
Tableau 8-14. Ressources pour l'application de collecte et d'envois de chaînes de caractères 215
Tableau 8-15. Ressources pour l'application d'annotation 215
Tableau 10-1. Liste des objets d'éclairage conventionnel associés à leurs identifiants et modèles d'application 219
Tableau 10-2. Liste des objets de puissance associés à leurs identifiants et modèles d'application 221
Tableau 10-3. Liste des objets ouvrants associés à leurs identifiants et modèles d'application 223
Tableau 10-4. Liste des détecteurs d'ouverture associés à leurs identifiants et modèles d'application 225
Tableau 10-5. Liste des objets d'éclairage dynamique associés à leurs identifiants et modèles d'application 227
Tableau 10-6. Liste des objets multimédia associés à leurs identifiants et modèles d'application 229
Tableau 10-7. Liste des données relatives à la qualité de l'air 229
Tableau 10-8. Liste des données issues du compteur électrique 229
Tableau 10-9. Liste des données relatives à la consommation d'eau 229
Tableau 10-10. Liste des données issues d'une station météo 230
Tableau 11-1. Synthèse des conditions de l'expérimentation "in vitro" 233

1 Introduction Générale

1.1 Problème

Le confort est une problématique constante dans le domaine de l'architecture. Nos bâtiments sont façonnés afin de créer un espace de vie en adéquation avec nos problématiques. L'histoire permet de retracer, au fil des bâtiments, les modes de vie des différentes civilisations qui ont construit notre passé. Ainsi, les agoras, thermes et arènes témoignent des civilisations grecques et de la Rome antique, avec leurs critères sociaux et de bien-être. En contraste, les châteaux forts témoignent d'une époque où la sécurité des biens et de certaines personnes était une problématique majeure, au détriment de certains aspects thermiques et esthétiques. Aujourd'hui, la civilisation occidentale se caractérise, depuis la renaissance, par une dominante de l'urbanisme, dont le symbole des gratte-ciels en est sans doute l'aboutissement. Winston Churchill, lors des phases de reconstructions d'après-guerre, disait « *We shape our buildings and afterwards, our buildings shape us* » (Nous donnons forme à nos bâtiments, et en fin de compte, ce sont nos bâtiments qui nous donnent forme), témoignant ainsi la relation qu'entretient un occupant avec son bâtiment. Cette relation particulière se caractérise tout particulièrement par la notion de foyer, qui, intemporelle, ne limite pas un habitat à une bâtisse.

La période d'après-guerre, les trente-glorieuses, a été marquée par la construction de bâtiments de masse, où les techniques de constructions étaient devenues industrielles, délocalisant les usines de béton sur le site même de construction. Le coût de construction était alors prioritaire au coût d'exploitation, les tarifs énergétiques étant alors faibles. Cependant, avec les premières crises pétrolières, l'exploitation de ces bâtiments, en particulier pour le chauffage, n'était plus viable et il fallut trouver de nouvelles solutions.

Aujourd'hui, les bâtiments occupent la plus grosse part de consommation d'énergie et d'émissions de CO_2 en France, poussant les pouvoirs publics à de nouvelles mesures (Réglementations Thermiques, démarches « Haute Qualité Environnementale », « Bâtiments Basse Consommation », etc.). En parallèle, notre civilisation devient de plus en plus numérique, par l'émergence de nouvelles technologies et l'introduction de celles-ci dans nos modes de vie quotidiens. Depuis la fin des années 1970, le mot domotique est apparu, cachant alors une nouvelle volonté. La domotique voulait rassembler toutes les nouvelles technologies au sein d'un habitat, avec l'a priori que ces technologies pouvaient augmenter le confort des habitants. Le constat, à l'aube du 21ème siècle, montre que le succès attendu n'a pas eu lieu. Des technologies nouvelles ne cessent d'apparaître, que ce soit de manière isolée (téléphones mobiles) ou alors dans des environnements depuis qualifiés d'intelligents (voitures). Seul l'habitat semble exempt de ce progrès technologique.

1.2 Approche

Les travaux exposés dans ce manuscrit de thèse se décomposent en deux axes complémentaires : la recherche d'un modèle d'abstraction du bâtiment intelligent d'une part, et l'exploitation des services du bâtiment intelligent pour optimiser le confort des habitants d'autre part.

L'un des grands défis du bâtiment intelligent est l'interconnexion des objets communicants, qu'ils soient propre au bâti (systèmes de gestion du bâtiment, réseaux domotiques) ou propre à l'utilisateur (produits bruns, produits blancs, produits personnels). Cette interconnexion est rendue difficile par la diversité des technologies possibles ainsi que la pluridisciplinarité des objets concernés. Dans ce contexte, nous proposons un modèle permettant de structurer différentes compétences métier au sein d'un même environnement. Ce modèle, basé sur la norme KNX, permet l'interopérabilité applicative nécessaire afin de disposer d'un habitat intelligent générique.

Un autre défi de l'habitat intelligent concerne le rapport de l'utilisateur vis-à-vis d'un environnement doté de capacités de prédiction et de réaction. Face à ce qui pourrait être perçu comme une perte de maîtrise, il est important de mieux comprendre les besoins et usages afin de rendre acceptable les décisions prises par un système. En se basant sur des travaux réalisés en marketing sensoriel (théâtralisation des espaces de vente) ainsi qu'en architecture (caractérisation d'ambiances), nous expérimentons une approche cognitive du confort. Dans cette approche, les grandeurs physiques mesurées par les capteurs (température, humidité, luminosité) sont confrontées aux perceptions des habitants (chaud/froid, sombre/lumineux).

1.3 Organisation du mémoire

Le mémoire est organisé en deux parties. La première sera consacrée à l'habitat et la technologie. La problématique est d'anticiper un habitat du futur, tel qu'imaginé par les différents acteurs du domaine. Cette partie se base sur les concepts de domotique et d'intelligence ambiante, afin de définir un outil et des méthodes de convergence numérique totale. Cette partie se conclut par l'instrumentation de la plate-forme de recherche Domus.

La seconde partie concerne le bien-être des occupants. La notion de confort est en effet très labile selon le contexte. Face aux impératifs économiques et écologiques, l'habitat est soumis à de nouvelles contraintes. Cette partie vise à exploiter les nouvelles solutions apportées par l'intelligence ambiante afin de répondre à ces nouvelles contraintes.

Partie 1 : L'habitat intelligent (point de vue technique)

Il s'agit au sein de cette partie de comprendre l'habitat et l'intelligence qu'on peut lui apporter. Nous exposerons tout d'abord comment la domotique a vu le jour à partir des années 70, puis comment ce concept s'est concrétisé techniquement. Nous verrons que, malgré cette concrétisation, ce domaine reste peu accepté du grand public et soulève des nouvelles problématiques adressées par l'intelligence ambiante.

Le bâtiment évolue perpétuellement, que ce soit d'un point de vue architectural, où l'on réinvente des formes, de nouveaux matériaux, de nouvelles techniques de construction, ou bien d'un point de vue utilisation. Car une fois le bâtiment construit, il vit, il évolue au gré des occupants, il acquiert sa dimension de foyer par son aménagement.

La technologie est un facteur nouveau depuis quelques dizaines d'années. On l'intègre peu à peu dans les bâtiments, au travers de ses deux phases de construction et d'habitation. Au début du 20ème siècle, les révolutions industrielles ont eu un impact sur l'habitat et on envisageait alors d'introduire les technologies les plus avancées issues du milieu industriel dans le résidentiel, comme l'illustre la « Maison automatique ». Dès les années 1970, c'était au tour de la révolution informatique d'être considérée comme vecteur d'évolution pour l'habitat.

Le développement d'objets intelligents ainsi que d'applications utilisant ces objets intelligents est rendu difficile par deux facteurs : la diversité des acteurs du bâtiment durant son cycle de vie ainsi que le caractère privé de l'habitat, tel que perçu par ses habitants. Dans ce contexte, il est nécessaire de définir un modèle commun, compréhensible par tous : l'interopérabilité.

2 De la domotique à l'habitat intelligent

Nous définissons dans ce chapitre la notion d'habitat intelligent et les problématiques qui lui sont associées. La notion d'habitat intelligent repose sur deux concepts parallèles, la domotique et l'intelligence ambiante. Les deux premières parties de ce chapitre sont consacrées à ces domaines. La domotique, bien que terme connu du grand public, possède un nombre de définitions divergentes qui induisent souvent en erreur sur les spécificités de ce domaine. Du fait de sa pluridisciplinarité, l'intelligence ambiante est un domaine difficile à définir, et mal connu du grand public. Dans la troisième partie de ce chapitre, nous aborderons les travaux réalisés dans le domaine de l'habitat intelligent, que ce soit pour définir formellement le domaine, les challenges à lever ou les applications réalisées (les maisons intelligentes développées).

« Il est plus intelligent d'allumer une toute petite lampe, que de te plaindre de l'obscurité. »

Lao-Tseu

2.1 La domotique

Le mot domotique a été introduit dans le dictionnaire « le petit Larousse » en 1988. Ce mot a été construit à partir de « Domus », la demeure de maître en latin, associé au suffixe « tique », couramment employé pour évoquer le terme des technologies (automatique, électronique, électrique, informatique…). On associe souvent le début des travaux domotiques aux années 1970, voire 1980, avec les problématiques énergétiques dues aux crises pétrolières qui ont considérablement affecté le domaine de la construction et de l'exploitation du bâtiment. En effet, avant ces crises, le coût de l'énergie était négligeable face au coût des matériaux et des travaux d'isolation thermique. On privilégiait alors des techniques de construction simples, peu onéreuses, au détriment de la qualité de l'enveloppe thermique, comme l'emploi de structures bétons fabriquées sur place, avec des ponts thermiques marqués, et des vitrages fins sur des menuiseries peu isolantes. Les bâtiments construits dans ce cadre sont aujourd'hui qualifiés d'énergivores.

Lorsque le prix de l'énergie augmenta de manière importante, on privilégiait alors une isolation plus contrainte des bâtiments neufs. Cependant, la gestion du parc existant était problématique, car coûteuse. C'est ainsi qu'apparurent les premières solutions de régulation automatique, ou plus communément appelées *Gestion Technique du Bâtiment* (GTB). Ces solutions reposent sur des moyens de communications entre automates (chaudières, ventilation, etc.) et capteurs, et permettent d'optimiser l'empreinte énergétique du bâtiment en fonction des besoins : présence des occupants, apports naturels, température extérieure, etc. Ces solutions, bien qu'onéreuses, furent petit à petit déclinées et proposées à l'habitat au milieu des années 1990. Les fonctions étaient alors identiques à celles proposées pour les bâtiments de grande taille : gestion du chauffage, de la ventilation et de la climatisation (CVC), de l'éclairage, des ouvrants (volets roulants et stores). Elles proposaient alors aux habitants une promesse de confort fonctionnel, principalement par la centralisation des dispositifs de contrôle, comme la possibilité de fermer tous les volets d'une façade, ou de gérer le chauffage pièce par pièce.

En parallèle, et en utilisant les mêmes bases technologiques, des solutions d'alarme à intrusion se sont commercialisées, développant un segment « sécurité ». Ces solutions interagissent parfois avec le système domotique, par exemple pour fermer les volets lorsque l'alarme est armée, ou simuler des présences par l'actionnement de lumières lorsque l'habitant est absent.

Depuis le milieu des années 1990, un autre segment, orienté sur la micro-informatique et les loisirs numériques, se développe. Cette nouvelle apparition marque en particulier l'introduction de l'informatique dans l'habitat et l'apparition des supports numériques : les cédéroms, puis les DVD et internet.

Ainsi, aujourd'hui, gestion de l'habitat, sécurité, réseaux de communication et loisirs numériques esquissent le paradigme de domotique (Jeuland, 2005). Nous esquisserons les contours et spécificités de ce paradigme, caractérisés par un nombre de définitions importantes ayant évolué au cours du temps.

2.1.1 Qu'est-ce que la domotique ?

La domotique est souvent mal perçue du grand public. Elle souffre aujourd'hui, incontestablement, d'une image négative, conduisant à de nombreuses définitions de la part des uns et des autres. Cette image se traduit aujourd'hui par un certain rejet du terme domotique, comme l'explique Milion (Milion *et al.*, 2005), qui, pour introduire un débat entre spécialistes de la maison intelligente, demande si nous devrions avoir honte du mot domotique. Milion rapporte dans le même contexte qu'il est difficile de trouver une définition du mot. Afin de comprendre ce qu'est la domotique, nous proposons, dans cette section, différentes définitions que la domotique a eues au cours du temps. La domotique a, comme nous le verrons, évolué en deux temps : elle s'est construite en un premier temps par des progrès technologiques, marquant des ruptures vis-à-vis des besoins des habitants, ruptures prises en compte en second temps.

2.1.1.1 Les débuts sous un axe technologique

En 1988, Brun et Descamps (Brun *et al.*, 1988) remarquaient déjà le nombre important de définitions qui entourent le concept de domotique, ainsi que des sous-termes qui y sont associés (maison intelligente, maison communicante, immotique, confortique…). C'est d'ailleurs la même année que le mot domotique a été introduit dans le dictionnaire « Le Petit Larousse ». La définition actuelle de la domotique est, dans ce dictionnaire : « Ensemble des techniques visant à intégrer à l'habitat tous les automatismes en matière de sécurité, de gestion de l'énergie, de communication, etc. ».

Pourtant, le mot domotique n'était alors pas nouveau. Sarrat (Sarrat, 1989) rapporte ainsi une définition de Marc Humbert en 1982, qui semble être la première : « *L'électroménager laisse la place à une véritable domotique : équipement des ménages en matériels transformés par l'emploi des composants électroniques, de microprocesseurs, par leur connexion à des ordinateurs personnels, c'est le télétexte et l'annuaire électronique, les postes téléphoniques à fonctions multiples, les magnétoscopes et les lecteurs de vidéodisques, les chaînes hi-fi, les montres et les calculatrices des terminaux domestiques de toutes sortes, tout autant que des robots ménagers qui, au-delà des fonctions traditionnelles, pourront gérer toutes sortes d'opérations comme les dépenses d'énergie pour le chauffage ou la cuisson des aliments.* ».

Dans le temps, les différents acteurs (académiques, industriels, institutionnels) associés à la domotique proposèrent leur définition de manière ad hoc. Le tableau 2-1 rapporte quelques approches, différentiées par la nature de leur origine.

Nature	Auteur	Définition
Définition technique	Akio Orihara Nikken Sekkei Co. Ltd	Immeuble qui réalise l'intégration de conforts, de sécurité, de productivité et d'économie grâce aux ressources les plus récentes de la technologie
Définition technique	FNB-FIEE-EDF-FNEE	Maison assurant un ensemble de services grâce à des systèmes réalisant plusieurs fonctions, et pouvant être connectés entre eux et à des réseaux internes et externes de communication
Définition sociotechnique	Ken Sakamura Maison TRON	Maison qui répond aux besoins nés de l'utilisation croissante d'appareils informatisés chez soi, et des styles de vie toujours plus diversifiés des habitants
Définition sociotechnique	CSTB	Bâtiment capable de fournir une technologie avancée de l'information et de répondre aux besoins en services de ses occupants actuels et à venir
Définition culturelle	M.B. Ullag Singapour	Conception architecturale néo-moderniste, donnant corps aux aspirations sociales, économiques, culturelles et technologiques de l'âge de l'information, et dotant les immeubles d'un cœur battant avec tous les signes des organismes vivants
Définition d'efficacité sociale	Lawrence Chin Singapour	Immeuble qui promeut effectivement et efficacement le degré de performance et de productivité requis par les occupants avec une flexibilité d'accueil pour de nouveaux besoins dans le futur

Tableau 2-1. Définitions du terme domotique sous différentes approches (Cancellieri 1992, p.328)

L'ensemble de ces définitions fait apparaître un élément majeur : la domotique s'apparente à un domaine pluridisciplinaire, dont l'objectif consiste à intégrer les technologies contemporaines au sein d'un habitat, avec les problématiques liées. Amphoux considère d'ailleurs, dans un de ses cours sur l'innovation en architecture (Amphoux, 2002), que la domotique n'est qu'une technique visant à intégrer des systèmes complexes. L'axe technique s'avère en effet prédominant dans la plupart des définitions (cf. tableau 2-1), sans faire émerger le besoin d'une nouvelle technologie.

2.1.1.2 Vers un art de vivre

Le concept de domotique, tel que décrit par son approche technique, fut marqué par des échecs commerciaux, et le marché n'a jamais pu atteindre les objectifs espérés malgré des programmes de recherche et développement dès le début des années 1990 (Sarrat, 1989). Cet échec était en fort contraste avec l'intégration des nouvelles technologies dans d'autres domaines comme l'automobile où les vitres électriques, la fermeture centralisée des portes ainsi que les systèmes d'aide à la conduite sont devenus de plus en plus courants, « de série » ou obligatoires comme l'ABS depuis 2003.

Pour expliquer cet échec, on pointe souvent l'approche trop technique. Ainsi, Damien Hasbroucq (Renaudin, 2010), de l'association PROMOTELEC[1], explique : « *Quand le concept a émergé, dans les années 1980 et 1990, on a focalisé sur le côté gadget, style le grille-pain qui prépare tout seul vos tartines le matin […] Cette approche peut être source d'angoisse : ma maison fonctionne comme un robot, je ne maîtrise plus rien...* » (Renaudin, 2010). Hasbroucq n'est pas le seul à établir ce constat, et les acteurs du domaine ont petit à petit modifié leur vocabulaire afin d'effacer l'idée de technique.

[1] Association en charge du développement de la domotique

Pour effacer l'image technologique induite par le terme domotique, les acteurs du domaine ont pris en compte le besoin de l'habitant, et son positionnement dans l'habitat. En rappelant que l'habitat est l'habit de l'habitant, le sociologue Dard dans une interview sur les maisons intelligentes (Milion *et al.*, 2005) propose ainsi d'orienter une définition de la domotique incluant un « art de vivre ». Ce point de vue est défendu par d'autres spécialistes du domaine, comme le montrent des communications à ce sujet (Sabbah, 2010; Bievre *et al.*, 2009).

Brun et Descamps (Brun *et al.*, 1988) ont, quant à eux, adopté la définition suivante : « Ensemble des services offerts aux occupants d'un logement fondés sur l'échange d'informations et permettant d'accéder à un nouvel art de vivre ». Cette dernière définition illustre les besoins, évoqués précédemment, d'intégration technologique (la domotique n'est donc qu'une technique), avec pour support l'habitat, et donc la prise en compte de l'habitant.

2.1.2 De l'imaginaire au réel

La domotique est un domaine difficile à cerner. Son histoire s'écrit sur les 30 dernières années. On peut catégoriser « deux » phases dans l'histoire de la domotique : l'imaginaire et le réel. Le réel est défini comme étant la domotique « possible », dans l'idée que la domotique est une technique d'intégration de technologies, ces technologies sont alors existantes. Dans l'imaginaire, ces technologies n'existent pas, mais sont envisageables à court ou long terme.

2.1.2.1 L'imaginaire

La domotique imaginaire, voire utopique selon Brun et Descamps (Brun *et al.*, 1988), est celle construite autour de scénarios, scénarios cependant irréalisables technologiquement. Ces scénarios furent souvent utilisés pour illustrer le domaine. On en retrouve dans la littérature académique (figure 2-1), artistique (figure 2-2) et la presse grand public (figure 2-3).

« M. Durand-Dupont, fatigué, décide de prendre un bain. Pendant qu'il regarde l'un des 30 programmes de TV…, il fait couler l'eau de son bain à laquelle s'ajoute automatiquement un produit moussant parfumé et en règle la température à distance, le remplissage de la baignoire s'arrêtant spontanément. Pendant ce temps, sa femme préparant le repas dans la cuisine, c'est-à-dire faisant réchauffer au micro-onde un plat congelé ou sous vide, ne cesse cependant de surveiller sur un écran de télévision intérieur le dernier-né qui joue dans sa chambre. Elle effectue directement ses achats au supermarché voisin par l'intermédiaire du Minitel. Ils lui seront livrés dans un espace tampon, d'accès réservé, commandé par une carte à puce, sans pénétration dans les parties privatives »

Figure 2-1. Scénario domotique de Brun et Descamps (Brun *et al.*, 1988)

« Vous êtes au bureau. Le téléphone sonne. C'est Fred, votre maison, qui appelle. En compilant les nouvelles du matin pour avoir connaissance des derniers cambriolages, Fred a capté un bulletin météo annonçant des pluies abondantes pour très bientôt. Cela a mis en branle sa mémoire et il s'est livré à un contrôle sur l'étanchéité du toit. Il a décelé un risque de fuite. Avant de vous appeler, Fred a téléphoné à Slim pour lui demander conseil. Slim est une maison style ranch à deux pas de chez vous… Fred et Slim mettent souvent en commun leurs banques de données respectives et chacun sait que l'autre est techniquement programmé pour pouvoir déterminer avec efficacité les opérations d'entretien domestique… Vous avez appris à vous reposer sur son jugement et vous lui donnez le feu vert pour les réparations. Le reste va de soi : Fred fait venir le couvreur ! ».

Figure 2-2. Scénario domotique d'après « Fred the House », par A.P. Hald, extrait de (Cancellieri, 1992).

« Il est 8 heures du matin. La lumière de votre chambre s'allume en même temps que votre réveil. Les volets de la maison s'ouvrent. Doucement, vous sortez du lit, guidé par l'odeur du café qui envahit déjà toutes les pièces. Arrivé dans la cuisine, la radio se met en marche. Dans la salle de bains, la température est un peu plus élevée que dans les autres pièces et la baignoire est déjà remplie. Lorsque vous partez et fermez la porte, les éclairages s'éteignent et le chauffage se met en veille. La porte du garage s'ouvre. Vous constatez que le jardin vient d'être arrosé. Vous sortez votre voiture, la porte se referme et le système de sécurité se met en marche. Vous partez travailler l'esprit tranquille. »

Figure 2-3. La maison au doigt et à l'œil, Le Monde 26.06.2008

Un cas illustratif fréquemment trouvé est l'instrumentation de la cafetière. « *Se lever avec l'odeur du café* » (figure 2-3) est un exemple récurrent dans ce genre de description narrative de la domotique. L'idée, expliquée implicitement ou explicitement en fonction des auteurs, est de ne plus se soucier de la programmation horaire de la mise en route de la cafetière, celle-ci s'adaptera à l'habitant. Le mécanisme sous-jacent est, quant à lui, plus flou : on ne sait pas si cette adaptation se fera par observation, apprentissage des modes de vie, ou synchronisation et anticipation avec l'heure programmée au sein du radio réveil. On ne sait pas non plus si l'on devra toujours préparer le café la veille.

La mise en application de l'automatisation de la cafetière n'est pas si simple. La programmation de la cafetière est un automatisme isolé, qu'il faut considérer dans son environnement afin de prendre en compte les autres objets qui jouent un rôle dans le scénario du lever de l'habitant. Cependant, l'automatisation de la cafetière seule n'interagit pas avec le radio réveil ni avec d'autres objets de l'habitat. Prendre en compte l'ensemble de l'environnement nécessite de rendre communicants les objets (comme la cafetière), ce que seul le concepteur de la cafetière peut se permettre.

Ce type de scénario permet d'illustrer bien souvent ce que pourrait être le concept de domotique, se rapprochant alors des définitions contemporaines. Pourtant, par leur caractère futuriste, ces cas furent qualifiés d'utopies dans les années 1990 (Brun *et al.*, 1988; Cancellieri, 1992), aucune technologie ne pouvant alors permettre une telle mise en œuvre. Cependant, ce type de scénario fut à l'origine de nombreux développements, comme l'indique Lefebvre (Lefebvre, 1997). Celui-ci précise que le rôle des utopies est d'être une des étapes du processus de construction d'un nouvel objet technique.

2.1.2.2 Le Réel

Les progrès dans le domaine de la Gestion Technique du Bâtiment (GTB) ont permis le développement de technologies spécifiques, adaptées au bâtiment et aux contraintes qui lui sont propres (cf. section 3.1.1). Ces technologies (LonWorks, BacNet, EIB, BâtiBus, etc.) se caractérisent par un apport de dynamisme dans les bâtiments, permettant ainsi aux structures statiques, comme l'électricité et les réseaux de chauffage, de devenir dynamiques (possibilité de reconfigurer un interrupteur, un thermostat pour redéfinir des zones). Les produits deviennent communicants : un interrupteur ne commute plus un circuit électrique, mais délègue cette fonction à un actionneur, actionneur avec lequel il est configuré pour communiquer. La configuration peut être modifiée au cas où les lieux s'y prêteraient, comme un recloisonnement de plateau de bureaux.

Certaines de ces technologies, jusqu'alors considérées dans le cadre d'un bâtiment à usage majoritairement tertiaire, furent transposées dans le domaine du bâtiment résidentiel. Parmi les réalisations, des maisons privées et des structures expérimentales ont vu le jour. On peut citer, par exemple, les maisons[2] « Lyon Panorama », localisée à Caluire (Rhône), FAUST à Castelnaudary (Aude), DELTA à Bonneville (Haute-Savoie), ainsi que l'initiative « Maison A / Studio B » à Paris (Repiquet *et al.*, 2007). Ces maisons se voulaient innovatrices, esquissant ce que pourrait être l'habitat du futur. Parallèlement sont apparues des structures expérimentales, pilotées par des académiques et des industriels, comme HD2000 (Brun *et al.*, 1988) à Rennes (Ille-et-Vilaine) et le SED (Sarrat, 1989) à Saint-Rémy-Lès-Chevreuse (Yvelines), dont la vocation portait sur l'étude de la domotique par ses usages et par ses technologies.

Ces structures n'avaient pas pour but de réaliser les scénarios imaginaires tels que nous les avons présentés ci-dessus, mais de faire « au mieux » avec les technologies existantes, ou les prototypes disponibles. Approchant l'équivalent GTB (gestion thermique par zones, éclairages groupés, commandes centralisées, etc.), elles représentent la domotique « réelle », celle que la technologie permet d'intégrer. Sur l'ensemble de ces réalisations, le niveau d'intelligence décrit dans la domotique imaginaire était rarement atteint, sauf au prix de prototypage des technologies manquantes.

Au début de la domotique, la technologie ne permettait pas de réaliser les scénarios (que nous qualifions d'imaginaires), mais les progrès, caractérisés par « l'innovation », permirent de développer la base du « réel », le paradigme d'intelligence ambiante.

2.2 L'intelligence ambiante

2.2.1 De l'informatique à l'intelligence ambiante

L'intelligence ambiante est un terme assimilant l'évolution de l'informatique, des ordinateurs aux objets du quotidien. On désigne également cette évolution sous les termes d'informatique ubiquitaire, traduisant ainsi son omniprésence au sein de l'environnement. Waldner (Waldner, 2007) illustre l'évolution de l'informatique vers l'intelligence ambiante en quatre étapes-clés (figure 2-4) :

1. La naissance de l'informatique (≈1960) ;

[2] Maisons citées par Pierre Merieux : http://www.espace-sciences.org/archives/science/18067.html

2. La naissance des réseaux de communication informatiques (comme Internet) (≈1970) ;
3. La mobilité des dispositifs informatiques, par la gestion des sources d'énergie portables (systèmes mobiles) (≈1990/2000) ;
4. La multiplication des dispositifs informatiques au sein de l'environnement (systèmes ubiquitaires), jusqu'à ce que leur densité soit suffisamment importante pour développer des fonctions qualifiées « d'intelligentes » (intelligence ambiante) (≈2000/2010).

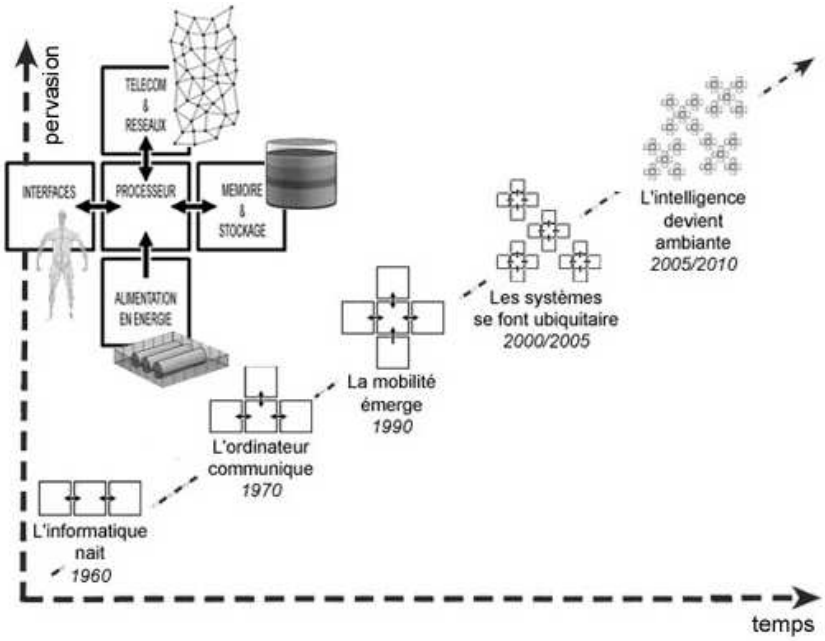


Figure 2-4. Evolution temporelle de l'informatique, depuis sa naissance jusqu'à l'informatique ambiante (Waldner, 2007)

L'intelligence ambiante résulte de la proposition en 1991 de Mark Weiser (Weiser, 1991). Dans ses travaux, l'auteur explique que les ordinateurs ont tendance à se miniaturiser et à se diffuser, en illustrant le passage des « *mainframes* » (un ordinateur partagé par plusieurs personnes) aux ordinateurs personnels (un ordinateur par personne). Il entrevoit ainsi ce que pourrait être l'informatique du futur, par la miniaturisation et la mise en réseau des dispositifs informatiques. Weiser illustre ce concept par les « *tabs* » (Adams *et al.*, 1993), alors en développement au sein de son laboratoire, qui sont l'équivalent des tablettes numériques aujourd'hui industrialisées.

Dans sa vision, devenant ainsi de plus en plus nombreux et miniaturisés, les ordinateurs se fondront dans notre quotidien, que ce soit physiquement ou par l'usage, jusqu'à devenir invisibles : « *The most profound technologies are those that disappear* » (Weiser, 1991). Patrick Reigner (Reignier, 2010) chronologise la naissance de cette nouvelle thématique en trois étapes : l'informatique ambiante (1991), l'informatique calme (1995) et enfin l'intelligence ambiante (1998). Nous développerons particulièrement cette dernière étape afin de pouvoir ensuite formaliser le concept d'habitat intelligent.

L'accroissement de la densité des moyens informatiques a pour corollaire d'augmenter la densité d'information sur l'environnement. L'intelligence ambiante correspond à la prise en compte des données de l'environnement (perception) dans l'informatique ubiquitaire. Les données de l'environnement permettent de déterminer le contexte dans lequel le système évolue. Une définition courante du contexte est celle émise par Anind Dey (Dey, 2001) : « *Context is any information that can be used to characterize the situation of an entity. An entity is a person, place, or object that is considered relevant to the interaction between a user and an application, including the user and applications themselves* » et de l'intelligence ambiante proposée par Coutaz et Crowley (figure 2-5) illustrent une seconde notion fondamentale de l'intérêt du contexte pour l'intelligence ambiante : la prise en compte du contexte par le système. Grâce à l'intelligence ambiante, le système devient donc adaptable au contexte.

Ambiance; ambiant : Atmosphère matérielle ou morale qui environne une personne, une réunion de personnes ; qui entoure de tous côtés, constitue le milieu où l'on se trouve [Le Petit Robert].
Intelligence : (a) Faculté de percevoir, de raisonner et d'agir sur son environnement afin d'atteindre ou de maintenir un état (ou objectif). (b) Faculté d'interagir avec son environnement afin d'atteindre ou de maintenir un état (ou objectif).
Intelligence ambiante : Milieu ayant la faculté de percevoir, de raisonner, d'agir et d'interagir afin de fournir des services améliorant la qualité de vie des êtres vivants et notamment des personnes.

Figure 2-5. Définition de l'intelligence ambiante par les définitions d'ambiance et d'intelligence (Coutaz *et al.*, 2008)

Coutaz, Crowley et Rey (Coutaz *et al.*, 2005) ont proposé un modèle en quatre couches pour gérer les informations de contexte (figure 6). Les quatre couches sont : une couche de capture, permettant d'acquérir des données, une couche de perception, permettant d'extraire les informations pertinentes à partir des données brutes, une couche de contexte, permettant d'identifier une situation (une instance de contexte), et une couche d'exploitation. Ces quatre couches sont complétées avec des composants transversaux : la gestion de la sécurité, la gestion de l'historique, et la gestion du dynamisme (découverte de nouveaux services, gestion d'erreurs).

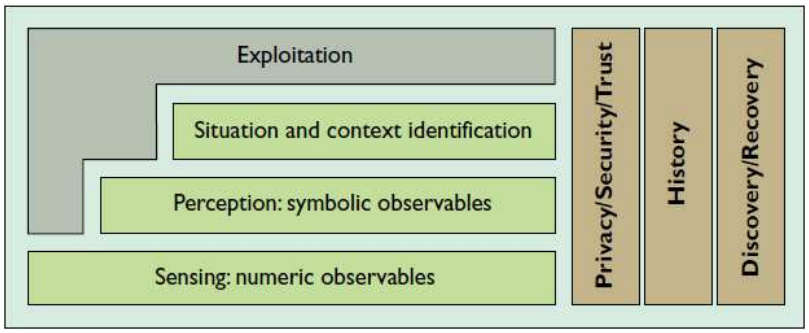


Figure 2-6. Pyramide de contexte proposée par Coutaz, Crowley et Rey (Coutaz *et al.*, 2005)

Cette structure pyramidale montre que l'intelligence ambiante ne résulte pas uniquement de l'instrumentation de l'environnement par un certain nombre de capteurs. L'exploitation de ces données de capteurs passe par des d'étapes, faisant intervenir différents domaines de recherche, que nous proposons de détailler ci-après.

2.2.2 Domaines de l'intelligence ambiante

L'intelligence ambiante fait intervenir la notion d'environnement. Il s'agit en effet de doter un environnement donné (espace urbain, bureau, espaces commerciaux…) de capacités numériques : capacités de perception (par différents capteurs), capacités de traitement et capacités de réaction (par différents effecteurs). L'intelligence ambiante fait donc intervenir de nombreux domaines, en particulier le domaine des réseaux de capteurs (et implicitement les réseaux d'actionneurs), le domaine des interactions homme-machine et le domaine de l'intelligence artificielle.

2.2.2.1 Réseaux de capteurs

La mise en réseau et la miniaturisation de l'informatique sont les évolutions qui appuient l'intelligence ambiante, comme le montre la figure 2-4. Cependant, ces évolutions impliquent une augmentation importante du nombre de points réseaux utilisant les infrastructures, comme le montre la figure 2-7 (les projections convergent vers plusieurs dizaines de milliards d'objets connectés d'ici 2020). La mise en réseau de systèmes de plus en plus miniaturisés pose plusieurs problématiques comme la mobilité, la dépendance énergétique ainsi que l'évolution des infrastructures de communication. En conséquence, une thématique est dédiée à des protocoles de télécommunications satisfaisant ces problématiques. Ainsi, des spécialistes des télécommunications et réseaux ont fait des réseaux sans fils ad hoc (mobiles) et à faible consommation énergétique une thématique de recherche importante, conduisant aujourd'hui à de nouvelles technologies de réseau comme ZigBee et 6LoWPAN (Shelby *et al.*, 2011).

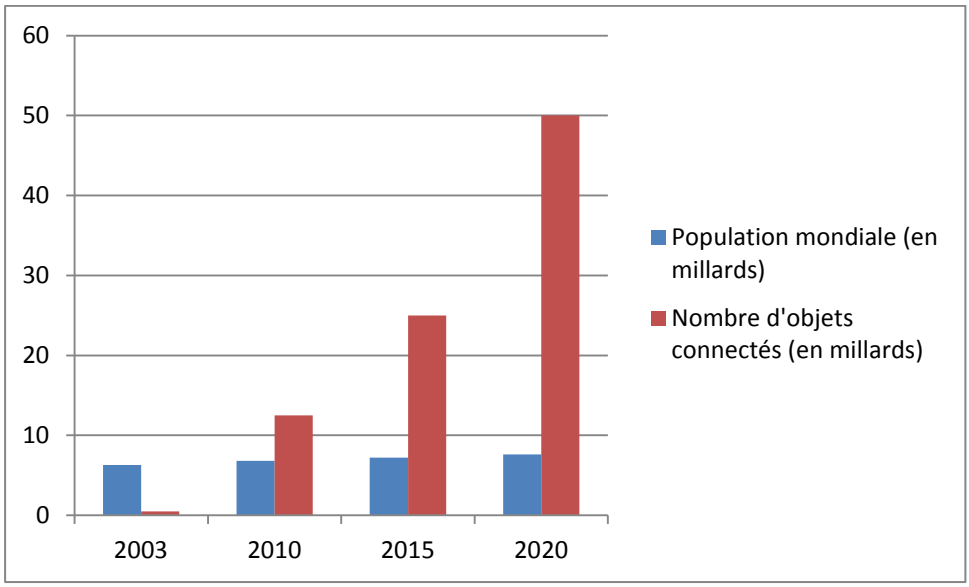


Figure 2-7. Evolution du nombre d'objets connectés à l'horizon 2020[3]

[3] Source : Cisco IBSG

Cette thématique s'illustre également avec un domaine de recherche appelé « L'internet des objets ». Dans ce paradigme, chaque objet est identifié, connecté et intégré au sein d'un système, formant ainsi un réseau de données. Ce réseau de données permet de créer un environnement intelligent. Pour ce faire, des technologies en champ proche permettent d'identifier les objets (RFID, Bluetooth, QRCodes, NFC…), objets pouvant aussi communiquer (6LoWPAN). Ces objets sont ensuite intégrés au sein d'un intergiciel (ou middleware), permettant d'abstraire les données et de fournir des interfaces d'application. Un tel exemple d'intergiciel est illustré par la communauté OSGi. Nous consacrerons plusieurs sections par la suite aux domaines de l'objet intelligent ainsi que des intergiciels.

2.2.2.2 Interactions homme-machine

Le domaine de l'interaction homme-machine (IHM) consiste à étudier les moyens d'interactions entre les technologies développées et les humains. Elle tend vers une vision naturelle de l'interaction Homme-Machine en opposition aux interfaces de type « WIMP[4] ». Cet objectif s'illustre par le développement des interfaces gestuelles, tactiles et tangibles (multimodales) qui effacent peu à peu les traditionnels claviers et souris. L'intelligence ambiante apporte des éléments supplémentaires pour améliorer les critères d'utilisabilité de ces interfaces, comme par exemple la génération d'interfaces contextuelles. Ces interfaces s'adaptent en fonction du contexte auxquelles elles sont soumises. Par exemple, une interface de service météo présente à l'utilisateur la météo de l'endroit où il se trouve, en le localisant de manière automatique et transparente.

Un exemple d'interaction homme machine, en informatique calme, est le « *Live Wire* » développé à Xerox par Jeremijenko, rapporté dans (Ishii *et al.*, 1997; Reignier, 2010). C'est un moteur pas à pas, relié à une ficelle qui, à chaque paquet réseau transitant, émet une information visuelle et sonore. Ce moteur permet donc de propager l'état du trafic réseau au sein de l'environnement proche de l'utilisateur. Ce dernier détecte alors de façon plus naturelle tout comportement anormal du moteur, et donc du réseau.

Un autre exemple concerne les interfaces tangibles, où l'utilisateur manipule des objets physiques du quotidien afin d'établir un dialogue avec une machine. Ishii (Ishii *et al.*, 1997) illustra ce concept par plusieurs exemples, dont le « metaDESK » et le « transBOARD », soit un bureau et un tableau blanc qui constituent tous deux une surface d'interaction. L'utilisateur peut alors utiliser ces surfaces, au moyen d'objets physiques : des lentilles ou formes géographiques pour le « metaDesk », ou alors un feutre pour le « metaBOARD ». Dans le cas du « metaDesk », les informations sont redirigées graphiquement sur une lentille équipée d'un écran LCD, en fonction de la position ou alors du mouvement des objets (déplacement, rotation, etc.). Dans le cas du « metaBOARD », le tableau détecte tout contact avec le feutre ce qui le rend alors capable de stocker les formes et textes sous forme numérique, dématérialisant ainsi l'information.

[4] Windows, Icons, Menus, Pointing device (Fenêtres, icônes, menus et périphériques de pointage).

2.2.2.3 Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine qui a pour but de reproduire l'intelligence humaine en informatique. Ce domaine est connu du grand public, car il alimente régulièrement des œuvres de science-fiction, comme les films « *2001, l'Odyssée de l'espace* » de Stanley Kubrick (1968), « *WarGames* » de John Badham en 1983 ou encore plus récemment « *I.A. Intelligence Artificielle* » de Steven Spielberg (2001). John McCarthy et Marvin Minsky sont considérés comme les pères de cette discipline qui s'est formée peu après la naissance de l'informatique (Russell *et al.*, 2010).

Des travaux issus de ce domaine ont eu des avancées majeures, qui sont aujourd'hui de plus en plus utilisées. Par exemple, de nombreux algorithmes utilisent l'apprentissage machine, sous diverses formes. Ainsi, une machine peut s'adapter en fonction de données apprises au cours de son utilisation, comme le montrent les approches basées sur l'apprentissage statistique (Goldberg, 1989) et le raisonnement probabiliste (Jaynes *et al.*, 2003).

Les travaux en intelligence artificielle ont été en particulier développés dans le domaine de la robotique. Un des exemples les plus connus de mise en œuvre est la programmation Bayésienne de robots mobiles (Lebeltel, 1999; Lebeltel *et al.*, 2004). La problématique de Lebeltel est, dans cet exemple, de diriger un robot (contrôles des moteurs entraînant les roues) avec un nombre restreint de capteurs (capteurs de luminosité). La complexité du problème réside dans l'incertitude de l'environnement (type de sol, obstacles éventuels), des capteurs ainsi que des effecteurs (patinage des roues). Il propose alors une approche probabiliste, où les capteurs sont associés à des distributions de probabilité, dont la fusion permet de quantifier les actions à destination des effecteurs. Ces distributions peuvent être soit spécifiées par un expert, soit apprises *in situ*.

2.3 L'habitat intelligent

L'intelligence ambiante et la domotique se sont développées parallèlement, et convergent vers l'habitat intelligent. Si l'habitat intelligent peut être considéré comme un domaine d'application de l'intelligence ambiante, il est difficile de le situer par rapport à la domotique. Les définitions précédentes font émerger le point suivant : la domotique est « désirée ». Elle n'est pas indispensable à l'habitant, en témoigne ses échecs et ses descriptions imaginaires, mais apporte un supplément de confort par la gestion technologique de l'habitat. L'intelligence ambiante est, quant à elle, plus « subie », elle résulte d'une évolution quasiment naturelle de la technologie, évolution dirigée par la miniaturisation de l'électronique, et s'introduisant de manière disparate dans l'habitat.

2.3.1 Qu'est-ce qu'une maison intelligente ?

2.3.1.1 Critères

Dard, au cours d'une interview (Milion *et al.*, 2005), rapporte que lors de ses études sociologiques il a testé les valeurs de l'expression « maison intelligente » auprès de nombreuses personnes, et s'est aperçu que l'idée communément admise est qu'une maison devient intelligente si elle est bien conçue. Il rapporte ainsi des dires récurrents : « Une maison intelligente est une maison dans laquelle il y a des placards ». La technologie n'est, selon ses travaux, qu'accessoire. Cette notion d'espace « bien » construit est également évoquée par des acteurs du domaine de l'architecture. Par exemple, Brindel-Beth (Bievre *et al.*, 2009), architecte, explique que l'économie d'énergie dans un bâtiment intelligent ne se résume pas à une question d'instrumentation, mais inclut également la prise en compte de l'usager dans les espaces. Elle s'appuie sur un exemple d'un bâtiment dans lequel le positionnement des escaliers, au centre du bâtiment, et l'excentration des ascenseurs permet de réduire l'utilisation de ces derniers, favorisant ainsi l'économie d'énergie.

Pour définir une maison intelligente, Ken Sakamura énonce d'après Canciellieri (Cancellieri, 1992), les critères d'exclusion suivants : « *Une maison sera disqualifiée au regard du classement dans la catégorie des maisons intelligentes si :*

- *L'information ne peut pas circuler librement de l'intérieur de la maison vers le monde extérieur, et vice-versa ;*
- *Si la maison fonctionne avec des ordinateurs intégrés qui ne peuvent pas se parler entre eux ;*
- *Si sa domotisation consiste en un « patchwork » de « gadgets » ;*
- *Si elle est équipée avec des fonctions sophistiquées difficiles à utiliser* ».

Ces critères font émerger deux notions pour définir une maison intelligente. La première, technique, montre qu'un effort doit être fait au niveau de l'infrastructure de communication afin de développer de l'intelligence, efforts locaux (entre objets de l'habitat) et efforts globaux (entre l'habitat et le monde extérieur, soit des services centralisés, soit d'autres habitats). La seconde, liée à l'usage de l'habitat par l'habitant, fait intervenir des critères d'utilisabilité, de conception, de simplicité et d'ergonomie de l'habitat intelligent.

2.3.1.2 Challenges

Pour décrire ce qu'est une maison intelligente, plusieurs personnes ont défini les challenges que celle-ci devait résoudre. Ces challenges concernent les domaines de la domotique et de l'intelligence ambiante.

Pour la domotique, Brun et Descamps (Brun *et al.*, 1988) ont insisté sur les efforts à faire pour la démocratisation des maisons intelligentes, en plaidant pour la baisse des coûts, l'efficacité industrielle et la formation des artisans devant les installer. Ils insistent également sur l'importance de l'architecte, celui-ci étant le décideur de l'architecture technologique à mettre en place. Comme beaucoup de domoticiens[5], Brun et Descamps estiment que les architectes n'endossent pas cette responsabilité : « *Certains architectes plus formés à l'urbanisme et à la sociologie active qu'à l'art de bâtir, arrivent à sous-traiter tous les lots techniques, indignes de leur incompétence. Il y a là une négation du rôle réel du concepteur qui débouche obligatoirement sur des échecs* ». Levin (Levin, 2003) complète ce constat en expliquant que des rôles devant être attribués à l'architecte reviennent sur le terrain à la maîtrise d'ouvrage et à l'artisanat.

En 2001, Edwards (Edwards *et al.*, 2001), associé au projet « The Aware Home » (cf. paragraphe 2.3.2.3.3), liste sept défis qu'une maison intelligente doit résoudre. Parmi eux, l'auteur pointe des besoins techniques (interopérabilité, fiabilité, capacité de fonctionner en présence d'ambigüité) et des besoins humains (ergonomie adaptée à un environnement domestique, contexte social, utilisabilité). Cependant, ces challenges ont une portée plus académique et fonctionnelle, et n'ont pas pour vocation d'adresser les verrous liés à la conception et la construction d'une maison intelligente.

En 2008, Chan, Estève, Escriba et Campo (Chan *et al.*, 2008) ont proposé des défis, dans un contexte de télémédecine et maintien à domicile. Tout comme pour les critères de Sakamura, ces défis portent, entre autres, sur des critères utilisateur (besoins, acceptabilité, satisfaction, éthique), technologiques (fiabilité et efficacité des infrastructures, des capteurs et des applications) et sociétaux (questions juridiques, besoins de normalisation, impacts socio-économiques).

2.3.2 Les maisons intelligentes existantes

Il existe un grand nombre de maisons intelligentes à travers le monde (Harper, 2003; Chan *et al.*, 2008). Nous verrons comment ce domaine est passé de l'imaginaire au réel, par des projets industriels, des projets universitaires et des projets personnels. Nous verrons également que la tendance actuelle est en faveur du concept de « Living Labs ».

2.3.2.1 Réalisations historiques et atypiques

Comme le souligne Daniel Kaplan (figure 2-8), les maisons intelligentes à usage démonstratif ou expérimental ont souvent été « dénuées » de vie. Celles-ci, n'étant pas occupées, elles ne pouvaient représenter un habitat réel et de ce fait, incluaient une certaine sorte de biais expérimental (solutions sans problèmes).

[5] Outre les professionnels de la domotique (intégrateurs, installateurs), beaucoup de particuliers évoquent en effet, par le biais de forums, la difficulté de trouver des architectes pour installer un système domotique, et s'en remettent à eux même. Jeuland aborde ce point dans une interview consultable en ligne : http://www.maison-et-domotique.com/2011/08/25/interview-de-francois-xavier-jeuland-auteur-de-la-maison-communicante

« Les premières incarnations des maisons intelligentes sont spectaculaires, mais dès que l'on rentre dedans, on est complètement glacé. C'est le dernier endroit où l'on a envie de vivre. Cela fait 10 ans que j'en visite et c'est affreux. Les plus intéressantes sont les maisons intelligentes produites par des fanatiques absolus, des gens qui ont monté dans leurs caves des serveurs, qui ont tiré des fils. Ce sont des bricolages infâmes personnels et donc aussi incompréhensibles et inexploitables par d'autres que des maisons pleines de bibelots et de tapis d'Orient… C'est la même manière de créer son habitat avec d'autres ustensiles. »

Figure 2-8. Approche ascendante pour les maisons intelligentes, par Daniel Kaplan. Propos recueillis par Sabbah (Sabbah, 2010)

Les propos rapportés par Sakamura concernant la « TRON Intelligent House » suite à son démantèlement (cf. paragraphe 2.3.2.2.1) en sont un exemple. D'après Kaplan, les travaux les plus remarquables sont ceux conduits par des passionnés, répondant à des problématiques utilisateurs, utilisateurs suffisamment ingénieux pour pouvoir développer une solution. Cette démarche correspond à des méthodes d'innovation ascendante (Von Hippel, 2005), aussi appelées « innovation par le bas », où l'utilisateur final (ici l'habitant) est la source d'innovation.

Nous faisons ici un état de l'art sur des réalisations ayant marqué l'histoire de la domotique puis des maisons intelligentes (ou au sens large, toute technologie en rupture permettant d'agrémenter le quotidien des habitants). L'histoire est surprenante, car certaines réalisations datent d'avant la démonstration de Branly sur la télémécanique (Branly, 1905), souvent considérée comme la technologie fondatrice de la domotique.

2.3.2.1.1 « Le prieuré » (Robert-Houdin 1867)

Jean-Eugène Robert-Houdin est un illusionniste célèbre du 19ème siècle, moins connu pour ses réalisations dans le monde des automates. En complément de ses ouvrages traitant de l'illusion, il publia « Le Prieuré » (Robert-Houdin, 1867), expliquant, non sans malice, quelques réalisations au sein de sa demeure.

Voici un extrait de son introduction : « *Je possède et j'habite à Saint-Gervais, près Blois, une demeure dans laquelle j'ai organisé des agencements, je dirais, presque, des trucs qui, sans être aussi prestigieux que ceux de mes séances, ne m'en ont pas moins donné le pays, à certaine époque, la dangereuse réputation d'un homme possédant des pouvoirs surnaturels* ».

Parmi ces « trucs » comme il les qualifie, sa maison comportait un système ingénieux pour gérer l'arrivée de nouveaux visiteurs. Ainsi, sur la porte d'entrée principale, figurait un panneau indiquant « Frappez ! », faisant référence au marteau situé au-dessus. Lorsque l'utilisateur s'y prêtait, un système complet se déclenchait, avertissant l'habitant par une sonnerie, ouvrant la porte et retournant l'écriteau qui affichait alors « Entrez ». Ce système d'avertissement était également étendu à la boîte aux lettres, et ainsi, avec la complicité de son facteur, il pouvait savoir depuis sa résidence en temps réel combien de courriers lui étaient acheminés. En effet, à chaque introduction d'une lettre dans la boîte, un signal sonore était diffusé à l'intérieur de la maison. Le facteur prenait soin de verser les lettres une par une, déclenchant ainsi un nombre de bips équivalent au nombre de correspondances reçues.

Figure 2-9 "Le prieuré", Maison Robert-Houdin (extraite du site officiel de la Mairie de Saint-Gervais-la-Forêt[6])

Robert-Houdin décrit également d'autres systèmes, comme une mangeoire automatique à destination de sa jument, qui, synchronisée sur une horloge commune à l'ensemble de l'installation, distribuait des doses d'avoines 3 fois par jour. Horloge que l'auteur aimait d'ailleurs dérégler pour troubler la routine de ses domestiques à son avantage. Ainsi, il pouvait avancer le réveil[7] de son jardinier ou bien avancer l'heure de son repas en manipulant quelques boutons avançant l'heure en conséquence.

Les technologies intégrées par l'auteur dans cette maison sont remarquables pour l'époque, et correspondent à des fonctions aujourd'hui courantes dans le domaine des réseaux de capteurs (par exemple, l'actionnement d'un élément avec retour d'état distant). Cette réalisation montre également la relation qui peut exister entre un habitat et son habitant : les fonctions décrites dans l'ouvrage sont pour la plupart des fonctions « d'agrément » spécifiques à l'habitant, difficilement généralisables.

2.3.2.1.2 La maison électrique (Knap 1913)

[6] http://www.stgervais41.fr

[7] Le réveil automatique fût l'une des premières « inventions » de Robert-Houdin, qui déposa d'ailleurs un brevet à ce propos.

Gëorgia Knap était un inventeur, bien que de formation biologiste, au début du 20ème siècle. Il fut surnommé « l'homme aux 80 métiers » (Bérisé, 1995), surnom dû à ses travaux dans de multiples domaines, des régimes alimentaires « rajeunisseurs » aux motocyclettes. L'un des domaines auxquels il contribua fut l'architecture, avec entre autres, un procédé de construction pour les « maisons économiques », une réalisation nommée « Villa Féria Electra » (Engrand, 2003) ou bien des réalisations illustrant le concept de « maison électrique » (dont des idées ont été présentées à l'exposition universelle de 1937). Nous nous intéresserons à ce dernier concept, auquel Magnien consacrera un article (Magnien, 1980).

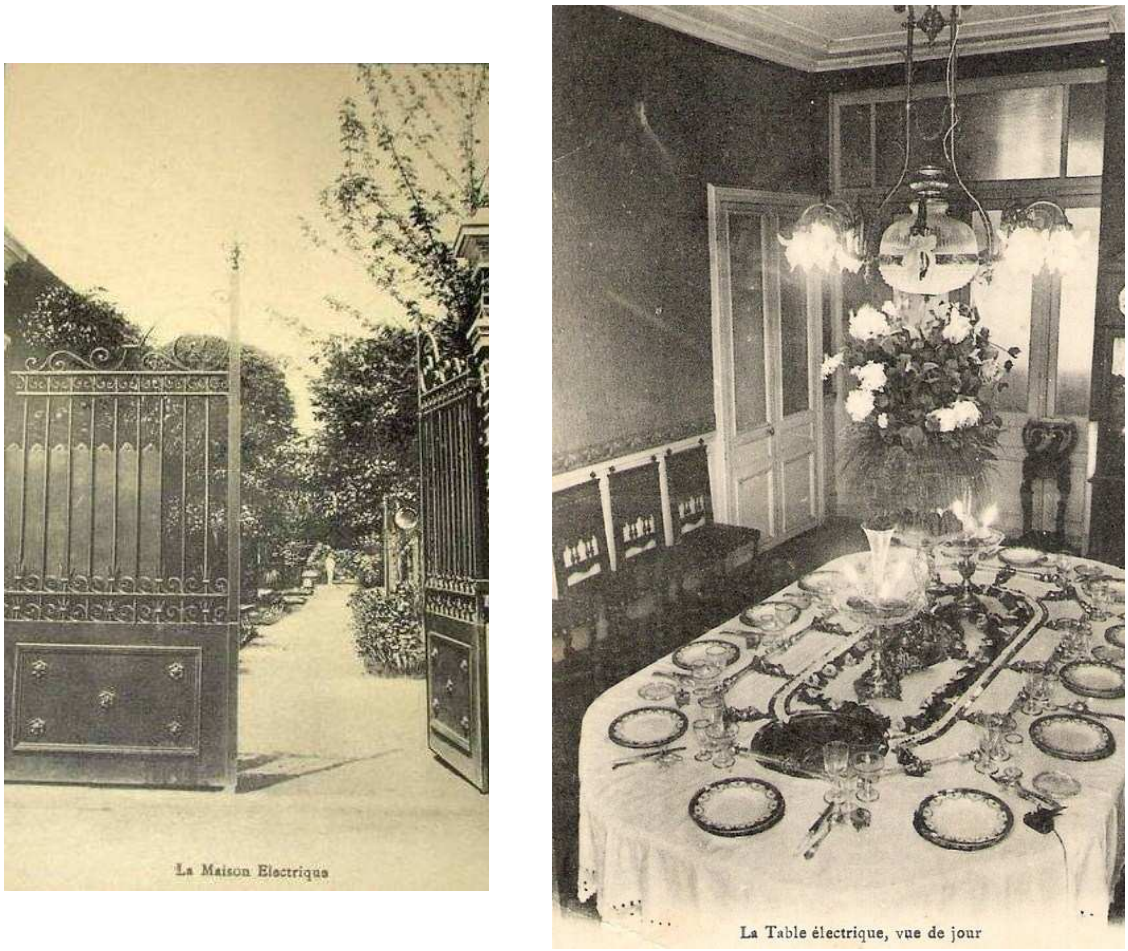


Figure 2-10. Photos des réalisations de G. Knap, avec à gauche le portail électrique de la "Villa Electra" à Troyes, et à droite une photo de la table électrique

Le concept de « maison électrique » s'appuyait alors sur l'essor de l'électricité. Knap avait, dans des espaces témoins (14 Boulevard des Italiens et 2 rue le Peletier à Paris), assemblé diverses technologies pour être vendues au grand public. L'article de Magnien s'appuie d'ailleurs sur le catalogue de ces produits. Dans le contexte de l'époque, et au vu du prix de l'équipement alors proposé, les technologies exposées étaient destinées à des personnes fortunées, disposant entre autres de domestiques. Ainsi, nombre d'équipements proposés s'appuyaient sur la communication entre les habitants et les domestiques. Par exemple, dans une chambre à coucher, un système sonore ambiant, utilisant un microphone dissimulé dans un lustre, permettait à l'occupant d'engager une conversation à distance. Le retour se faisait par un haut-parleur dissimulé dans le même lustre. Ce système sonore est également décrit en tant que « micro-espion », permettant alors de surveiller les dires des domestiques à leur insu. Ce système a été repris pour le concept de table électrique illustrée en figure 2-10 qui permettait aux domestiques d'agencer le repas, grâce à un périscope dissimulé dans la table.

Mais Magnien rapporte également de fortes innovations technologiques au sein de cette maison comme une horloge lumineuse qui, déclenchée par un bouton, projetait alors l'heure sous forme d'un cercle lumineux. Autre innovation technologique, proche de la conception courante du monde de la domotique, l'allumage ou extinction de la cheminée à distance (l'auteur ne fournit pas de détails sur la réalisation de cette fonction).

Le concept développé par Knap témoigne d'une étape primordiale dans le domaine de la domotique : la démocratisation de l'électricité. Grand nombre des objets développés dans son catalogue sont aujourd'hui courants : le chauffe-eau, le lave-vaisselle et le fer à friser en sont des exemples. Les travaux de Knap souffrirent des mêmes maux que la domotique. Les objets développés témoignent d'une avance technologique évidente, et bien que ces démonstrations étaient appréciées (exposés lors de l'exposition universelle de 1937), il fallut attendre plusieurs dizaines d'années pour que le succès commercial escompté ait lieu.

2.3.2.1.3 Bwired (Knuvers 2000)

Un passionné de domotique Hollandais (Pieter Knuvers) a instrumenté son domicile et réalisé une interface Web complète permettant de superviser l'ensemble des capteurs, actionneurs et données collectées. Il a mis cette interface en ligne[8], en laissant libre accès au grand public. La démarche de Knuvers est de démocratiser l'usage des nouvelles technologies à l'habitat, démontrant ainsi qu'il est possible et accessible pour un particulier d'instrumenter sa maison pour obtenir un gain de service.

L'intérêt de cette installation réside dans le partage des données. En effet, en plus des données habituelles du bâtiment (température, humidité, états des lampes/volets…), le concepteur a décidé de « sur-instrumenter » son domicile et d'exposer les données suivantes, illustrées en figure 2-11 :

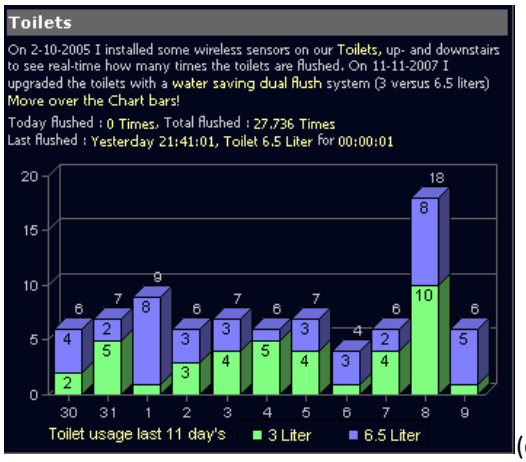
- L'image de la dernière personne à avoir sonné à la porte, avec l'horodatage associé (figure 2-11 a)
- L'image de la dernière personne à avoir inséré du courrier dans la boîte aux lettres, avec l'horodatage associé (figure 2-11 b)
- Les statistiques journalières et cumulées d'utilisation des toilettes (figure 2-11 c)
- Le poids des différents membres du foyer (figure 2-11 d)
- Les journaux téléphoniques (appels reçus, manqués, émis) (figure 2-11e)
- Le journal complet des différents états des capteurs (figure 2-11 f)

Cette réalisation met en œuvre ce que l'on pourrait considérer comme l'état de l'art industriel de la domotique, même si de nombreux outils sont plutôt artisanaux (logiciel de supervision). Les questions juridiques et éthiques se posent au vu des informations publiées sur internet, comme par exemple l'heure de passage du facteur ainsi que la photo associée. Contacté, M. Knuvers a indiqué que ce site se voulait comme démonstratif, et qu'il voulait promouvoir un habitat écologique et accessible. Il n'a pas souhaité communiquer en ce qui concerne l'exposition de la vie privée.

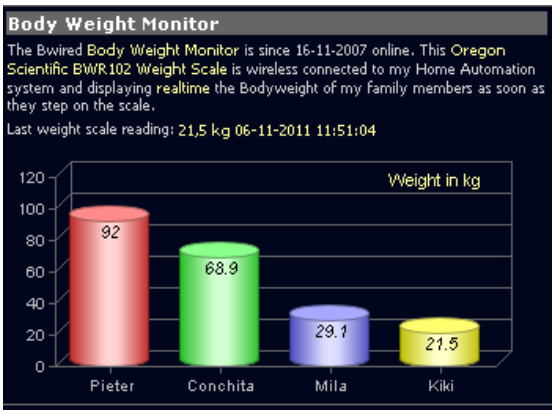
[8] http://www.bwired.nl

(a)

(b)

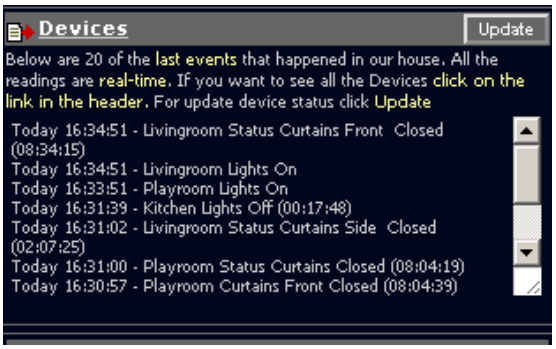


(c)



(d)

(e)



(f)

Figure 2-11. Images extraites du site http://www.bwired.nl, avec l'aimable autorisation de Pieter Knuvers

2.3.2.2 Projets industriels

De nombreux projets industriels domotiques se sont montés au cours du temps, certains faisant intervenir des technologies issues de l'intelligence ambiante. En effet, face au constat d'échec de la domotique, la démonstration des systèmes et applications possibles était alors un moyen exploité par les industriels pour « débloquer » les verrous du marché. Il est très dur de retrouver des traces de ces réalisations. Elles furent souvent très éphémères (maison pour les salons d'exposition). Nous développerons ici deux maisons intelligentes, toutes deux conçues par Ken Sakamura au Japon. Ce professeur de l'université de Tokyo a développé plusieurs maisons intelligentes révolutionnaires dans le domaine. Cependant, dû au manque de communications scientifiques, les travaux de recherche ayant été réalisés dans le cadre de ces projets ne sont que trop peu connus. Ceci justifie leur classement comme projets industriels dans ce document.

2.3.2.2.1 The TRON House (Tokyo, Japon)

Cette maison fut initiée en 1988 par le professeur Ken Sakamura (Sakamura, 1990), comme moyen de démonstration de son système TRON[9] (The Realtime Operating system Nucleus), un système d'exploitation embarqué. Implantée à Tokyo, cette maison a une surface au sol de 333m². Ken Sakamura y implanta près de 380 processeurs, intégrés dans des interfaces (interrupteurs) ou des objets de l'habitat (comme les toilettes).

Figure 2-12. The TRON Intelligent House

Cette maison ne représenta pas uniquement un démonstrateur technologique, mais également une démonstration d'intégration architecturale. Des travaux importants ont notamment été faits sur la structure et les matériaux afin d'optimiser les apports naturels (la figure 2-12 montre l'arrière de la maison, conçue pour maximiser les apports solaires), mais surtout le confort des habitants (qualité de finition, niveau d'équipement). Dans une logique culturelle, on retrouve ainsi les éléments principaux d'un foyer japonais.

[9] http://tronweb.super-nova.co.jp/tronintlhouse.html

Le concepteur de cette maison rapporte que la presse Japonaise fut particulièrement critique à l'égard de ces travaux, notamment en raison de son prix élevé et de l'intrusivité de la technologie (l'auteur rapporte que la maison était qualifiée de « hantée » par la presse). Cette maison fut alors démantelée en 1992. Actuellement, l'enceinte sert à héberger des bureaux.

Cette maison est l'un des tous premiers exemples « modernes » de maison intelligente, déployant un nombre très important d'applications nouvelles sur des technologies émergentes à l'époque. Cependant, malgré le nombre d'applications important que l'on peut retrouver au sein de cette réalisation, il n'y a pas eu de travail « d'intégration » technologique, tous les éléments « intelligents » ont été conçus spécifiquement par le concepteur.

2.3.2.2.2 PAPI ou Toyota Dream House (Environs de Nagoya, Japon)

La « Toyota Dream House » ou PAPI[10] est la suite du projet « TRON Intelligent House » de Ken Sakamura. Ce nouveau projet, d'une superficie double (689m²) reprend les acquis précédents, en y ajoutant des nouvelles technologies comme la gestion des véhicules électriques dans le garage ainsi que les technologies d'interaction sans contact.

Figure 2-13. Vue extérieure de « The Toyota Dream House »

Tout comme pour la « maison TRON », la problématique de la viabilité de l'espace est prise en compte, et l'aménagement de cette maison et la structure des lieux sont en adéquation avec les coutumes locales. Le concepteur s'est appuyé sur les mêmes principes que pour sa réalisation précédente, faisant preuve d'une intégration poussée des objets communicants ainsi que du développement de certains de ces objets lorsqu'ils étaient manquants.

[10] http://tronweb.super-nova.co.jp/toyotadreamhousepapi.html

Le champ des innovations est pluridisciplinaire, avec par exemple l'utilisation de vitres spécifiquement conçues pour favoriser la catalyse des différentes poussières, permettant ainsi l'élimination de celles-ci en cas de pluie (vitres autonettoyantes). L'innovation s'illustre aussi par le couple automobile/habitat en termes de gestion de l'énergie. Ainsi, en temps normal, une voiture hybride dans le garage est alimentée par la maison. Mais, en cas de défaut d'alimentation d'énergie de la maison, c'est la voiture qui se charge d'alimenter à son tour l'ensemble des systèmes.

La Toyota Dream House s'appuie également sur des concepts forts de l'intelligence ambiante, comme l'ubiquité et l'internet des choses. En ce qui concerne l'ubiquité, les interfaces utilisateurs sont contextuelles. L'occupant dispose ainsi sur un terminal d'une interface de gestion dont le contenu s'adapte en fonction de la localisation de l'utilisateur, favorisant ainsi le contrôle des objets à proximité. Par ailleurs, beaucoup d'objets sont identifiés au moyen de technologie sans contact (RFID dans ce cas). C'est le cas des aliments conservés dans le réfrigérateur. Cette identification permet d'informer l'habitant sur les « stocks » et l'état de ceux-ci. L'auteur fait état d'une gestion des dates de péremption.

Cette maison est toujours en activité d'après le site internet qui lui est consacré[11]. Les travaux de Ken Sakamura dans le domaine des maisons intelligentes se sont poursuivis avec la construction de la « U-Home »[12]. Ces travaux ont permis à l'auteur de définir les critères d'une maison intelligente tels que rapportés dans le paragraphe 2.3.1.1. Il est regrettable que peu de publications aient été faites, les travaux réalisés étant de qualité : ceux-ci font en effet preuve d'avancées majeures dans le domaine technologique, dans le domaine de l'intégration et sur le plan de l'usage, avec notamment la prise en compte des coutumes architecturales locales.

2.3.2.3 Projets Universitaires

Pour des besoins universitaires, plusieurs travaux ont été entrepris dans le but de reproduire des espaces habitables intelligents. Beaucoup de ces plateformes sont spécialisées sur une thématique. Par exemple, pour le domaine de la santé, on peut citer les travaux liés à l'appartement « HIS[13] » et ses applications sur le maintien à domicile de personnes dépendantes (Thomesse *et al.*, 2001; Nourizadeh *et al.*, 2009), le laboratoire DOMUS au Québec et ses travaux sur les habitants atteints du syndrome d'Alzheimer (Giroux *et al.*, 2005). Une autre thématique émergente, l'économie d'énergie, pousse aujourd'hui les acteurs de ce domaine à développer des infrastructures placées au cœur de plateformes dédiées (Clanché *et al.*, 2011), mais dans ce dernier cas l'occupant n'est pas considéré comme central dans le test.

Avec l'évolution des possibilités technologiques, certaines plateformes se sont focalisées sur des problématiques de technologies ambiantes. Certaines sont spécialisées dans un domaine, comme « MavHome » pour l'analyse et la prédiction d'activité des occupants (Cook *et al.*, 2003). Nous décrivons ici trois réalisations académiques.

2.3.2.3.1 The Adaptive House (Environs de Bolder, Colorado, Etats-Unis)

[11] http://tronweb.super-nova.co.jp/toyotadreamhousepapi.html
[12] http://tronweb.super-nova.co.jp/u-home.html
[13] Habitat Intelligent pour la Santé

La « maison adaptative » [14] est une ancienne école construite en 1905 et fermée en 1956. Elle fut entièrement rénovée en 1991 par M. Mozer, pour un usage personnel, puis pour des besoins de recherche. Cette rénovation a entraîné une lourde instrumentation, avec notamment près de 8kms de câbles en courants faibles pour les réseaux de communication, reliant 75 capteurs et un grand nombre d'actionneurs.

Figure 2-14. Vue extérieure de « The Adaptive House »

Le but poursuivi était d'explorer le concept de la maison auto-programmable, libérant ainsi les habitants des tâches de gestion. Les participants au projet soulignent en particulier qu'une maison doit s'adapter au rythme de vie d'un individu, voire d'une famille (Mozer, 1999), et que la maison devait alors apprendre les habitudes de l'utilisateur, en extraire des régularités et en déduire des règles.

C'est pourquoi, un système d'apprentissage et de contrôle a été mis au point, en s'appuyant sur des technologies alors développées ou déjà existantes. Ce système, ACHE (Mozer, 1998), permet donc d'anticiper les besoins des utilisateurs, en régulant l'éclairage, la température et la ventilation tout en assurant un niveau de consommation d'énergie optimal.

Les travaux conduits par Mozer sont devenus une référence dans le domaine des maisons intelligentes, en particulier le retour d'expérience (Mozer, 2005) synthétisant les résultats de recherche. Cependant, il semble que ces travaux aient été abandonnés depuis, aucune publication sur de nouveaux travaux n'ayant eu lieu depuis 1999 (les dernières (Mozer, 2005) concernent en effet le retour d'expérience, sans nouvelle contribution technique). On peut supposer que l'auteur habite pleinement ces lieux (objectif initial de l'auteur).

2.3.2.3.2 House_n et PlaceLab (MIT)

House_n est un projet collaboratif et pluridisciplinaire réalisé par le département d'architecture du MIT (Massachusetts Institute of Technology), dont le but est de prototyper une maison « du futur » (Intille, 2002).

[14] http://www.cs.colorado.edu/~mozer/index.php?dir=/Research/Projects/Adaptive%20house/

Figure 2-15. Vues intérieures du PlaceLab

House_n héberge le PlaceLab (Intille *et al.*, 2005; Intille *et al.*, 2006), qui sert en particulier de support expérimental à de nombreux travaux liés à l'intelligence ambiante, comme la détection d'activité en utilisant des capteurs spécifiques, les MITes (Tapia *et al.*, 2006). Pour des fins de recherches, des « habitants volontaires » résident au sein de cette structure. Cette occupation et utilisation permet la génération de jeux de données rendus disponibles à la communauté[15].

Ces travaux ont permis, en partie, de conceptualiser les « Living Labs » (Harper, 2003). Ce concept de Living Lab, émanent du MIT, est récurrent dans certains travaux liés à l'habitat intelligent, par leur proximité avec la notion de « vivre dans un laboratoire ». Le laboratoire devient ainsi un habitat. Ce concept s'appuie sur une mixité de compétences, pour traiter des problématiques liées à l'intelligence ambiante.

2.3.2.3.3 The Aware Home (Georgia Institute of Technology)

« The Aware Home »[16] est une maison gérée par le Georgia Tech Institute. Cette maison de 470m² sur 3 niveaux est constituée de deux étages principaux et strictement identiques, l'un pour mener des expérimentations *in situ*, l'autre pour intégrer des technologies en parallèle. Cette implantation permet une disponibilité maximale des équipements : des expérimentations faisant intervenir des habitants pouvant être menées en parallèle à des mises à niveau techniques. Les réalisations issues de cette maison sont variées, confortant l'approche pluridisciplinaire voulue par son aménagement (Kidd *et al.*, 1999). Les travaux portent aussi bien sur des réalisations centrées utilisateurs (Interaction hommes/machines, interactions homme/environnement) que sur les technologies (réseaux de capteurs) (Kientz *et al.*, 2008).

[15] http://architecture.mit.edu/house_n/data/PlaceLab/PlaceLab.htm

[16] http://awarehome.imtc.gatech.edu

Figure 2-16 The Aware Home[17]

Cette réalisation se caractérise, comme House_n, par une approche pluridisciplinaire de l'habitat, hébergeant des domaines de compétences multiples : télécommunications, informatique, ergonomie. Cependant, elle se distingue des autres travaux par sa forte approche expérimentale, avec l'utilisation des deux niveaux en parallèle.

2.3.2.4 Synthèse sur les maisons intelligentes

Les travaux menés en domotique et dans le domaine de l'intelligence ambiante ont été appliqués à l'habitat, donnant naissance, entre autres, aux maisons intelligentes. Dès 1867, par initiative personnelle, des maisons ont été « augmentées » par des automates qui pouvaient être programmés (déclenchés par l'horloge). Par la suite, d'autres maisons ont été développées pour répondre à différents besoins (commerciaux, recherches, amélioration du confort de son habitat, etc.). Le tableau 2-2 ainsi que la figure 2-17 présentent une synthèse de ces travaux.

[17] Photo de Gary Meeks

Nom	Année	Auteur principal	Usage	Intérêt majeur	Statut
Le prieuré	1867	Robert-Houdin	Personnel	Ingéniosité de l'auteur	Inconnu
La Maison électrique	1913	Knap	Commercial	Innovations d'ordre électrique	Inconnu
Bwired	>2000	Knuvers	Personnel	Densité d'instrumentation	Habitée
The TRON House	1988	Sakamura	Industriel	Finition, Précocité de l'infrastructure de communication	Démantelée
PAPI	2003	Sakamura	Industriel	Finition, Précocité de l'ubiquité	Inconnu
The Adaptive House	1993	Mozer	Personnel et académique	Degré d'intelligence artificielle	Habitée
PlaceLab	>2000	Intille	Académique	Pluridisciplinarité du personnel de recherche	En activité
The Aware Home	>2000	Kientz & Jones	Académique	Approche expérimentale	En activité

Tableau 2-2. Synthèse des maisons intelligentes

Les travaux que nous avons présentés illustrent les évolutions introduites dans la conception des maisons intelligentes. Les premières évolutions sont centrées sur l'intégration d'avancées technologiques (automatismes, électricité, communication entre les objets…). En plus d'intégrer les avancées techniques, les maisons intelligentes ont, au cours du temps, servi à répondre à de nouvelles problématiques liées à l'habitant. Dès le début des années 90, les technologies ajoutées ont pour but de s'adapter aux habitants (par l'utilisation de l'intelligence artificielle pour l'auto programmation de la maison, par exemple) ou l'intégration d'objets ubiquitaires. Enfin, les dernières maisons mises en place (depuis les années 2000) intègrent en plus de ces deux niveaux « technologiques », des évolutions en matière de conception. Les travaux présentés expriment un point essentiel : un habitat intègre un habitant. Ils sont en effet pour la plupart habités, ou l'ont été, et le cas échéant, ont connu une certaine forme d'échec. Les maisons actuellement développées orientent les évolutions autour de l'habitant (et non autour des avancées technologiques), de son activité et de son confort.

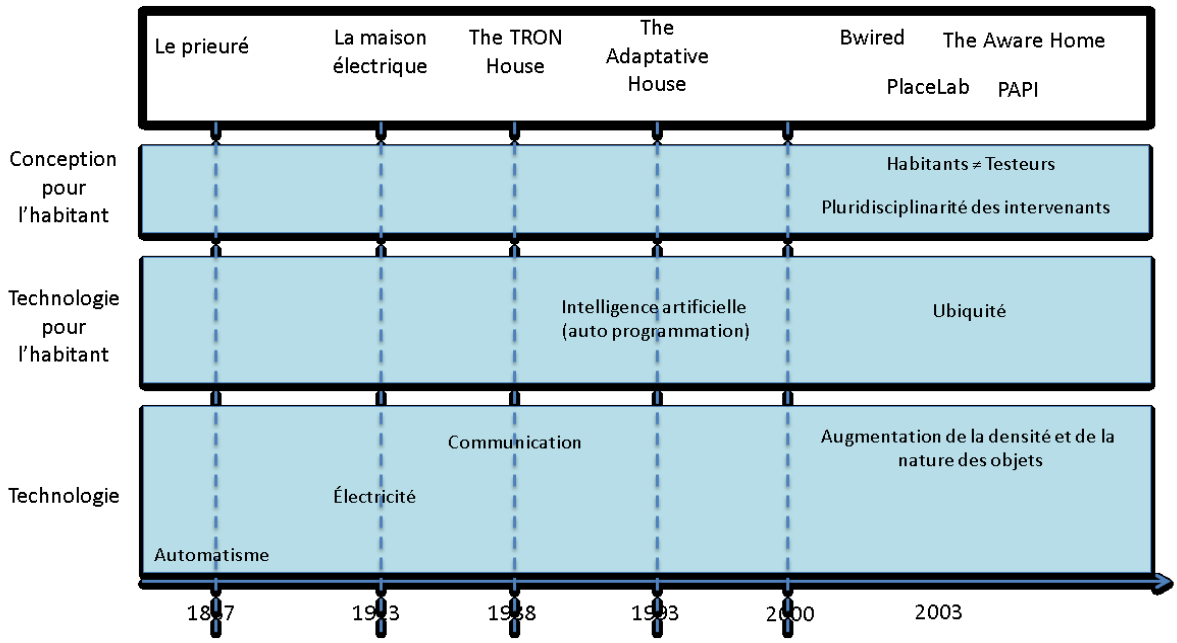


Figure 2-17. Evolution des maisons technologiques.

2.4 Synthèse sur l'habitat intelligent

Au cours de ce chapitre, nous avons illustré l'instrumentation technologique de l'habitat par deux domaines *a priori* distincts : la domotique et l'intelligence ambiante. La première s'est construite sur des bases technologiques et industrielles, dans le but avoué de gérer électroniquement l'habitat. Cette discipline est principalement centrée sur le bâti, étant issue de domaines spécialisés à celui-ci. Cependant, il a été constaté une certaine réticence des habitants envers les solutions domotiques, poussant alors le domaine à s'orienter vers une prise en compte augmentée des occupants.

L'intelligence ambiante résulte d'une évolution naturelle des dispositifs informatiques, modifiant peu à peu l'environnement quotidien des utilisateurs, dont celui de l'habitant. Cette discipline met en œuvre plusieurs domaines, dont les buts sont d'augmenter le nombre de dispositifs numériques au sein d'un environnement, d'utiliser ces dispositifs comme moyens d'interactions avec l'utilisateur, et d'augmenter l'intelligence des services rendus aux utilisateurs par une meilleure exploitation des données issues de l'environnement.

Ces deux notions ont pour point commun la numérisation des espaces de vie, espaces auxquels l'habitat est éligible, conduisant ainsi au paradigme d'habitat intelligent. Nous avons exposé ces espaces particuliers au travers de problématiques et de réalisations marquantes. Grand nombre de ces espaces témoins ont été réalisés à travers le monde, cependant, ceux ayant été réellement habités se sont distingués et, au niveau académique, représentent une activité importante. L'émergence du concept de Living Lab illustre l'importance du rôle « d'habitant-concepteur » dans la thématique de l'habitat intelligent.

Que ce soit en domotique ou en intelligence ambiante, l'intégration technologique est prépondérante. Ce besoin d'intégration s'explique en partie par la nature hétérogène des objets qui composent l'habitat. C'est pourquoi nous proposons, dans le chapitre suivant, une approche centrée objet de l'habitat intelligent.

3 L'habitat intelligent par les objets intelligents

Un habitat est aménagé et personnalisé par l'intégration d'objets. Ces objets sont de types différents mais tous participent à définir l'environnement domestique dans lequel l'habitant évolue. Parmi l'ensemble des objets de l'habitat, un sous-ensemble est composé d'objets ayant une activité propre : les objets actifs. Ces objets agissent sur l'habitat et dans l'activité de l'habitant, que ce soit pour les tâches domestiques (comme une machine à laver), pour son confort (comme un radiateur), ou pour son divertissement (comme la télévision). Nous présenterons dans la première partie de ce chapitre les différents objets ainsi que leurs spécificités qui nécessitent d'être prises en compte pour aménager et gérer l'habitat.

C'est également par les objets que l'informatique ubiquitaire s'est introduite dans l'habitat. Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.2, l'informatique ambiante se développe par les capacités de miniaturisation et de mise en réseau des dispositifs informatiques. Ces dispositifs informatiques se fondent petit à petit dans des objets courants et, ainsi, de plus en plus d'objets qui nous entourent deviennent intelligents, modifiant nos styles de vie, y compris dans nos habitations.

En bénéficiant des travaux réalisés dans le domaine de l'intelligence ambiante, un habitat intelligent intègre des fonctionnalités qui participent à l'activité des habitants. Les fonctionnalités sont accessibles via des objets dits intelligents. L'intelligence de ces objets réside en ses capacités de communication et d'adaptation avec d'autres objets. On retrouve ainsi les problématiques des réseaux de capteurs, d'interfaces homme-machine et d'intelligence artificielle, composant l'intelligence ambiante, décrites dans le chapitre précédent.

Après avoir présenté les objets actifs qui composent l'habitat (section 1), nous définirons et présenterons les contraintes liées à l'intelligence de certains objets (section 2). Enfin, nous ferons une synthèse des contraintes de l'intégration d'objets intelligents dans un bâtiment, et nous conclurons ce chapitre par une discussion sur l'hétérogénéité des objets intelligents.

« *There is no place like 127.0.0.1* »

3.1 Les objets fonctionnels de l'habitat

L'habitat n'est en soi qu'un bâtiment, une bâtisse constituée vulgairement de quatre murs et d'un toit. Celui-ci prend une dimension particulière grâce aux objets qui le composent : c'est la phase d'aménagement. L'aménagement se doit principalement aux objets. L'équipement d'une cuisine en est un exemple. Une cuisine est une pièce : un espace délimité par des cloisons, un sol et un plafond. Cette pièce ne peut être qualifiée de cuisine que par son aménagement, lourd dans ce cas : électroménager, éléments d'ameublement, réseaux de gaz, d'électricité, d'eau, d'évacuation, etc. L'aménagement est un domaine à part entière, principalement traité en architecture d'intérieur. Il contribue en très grande partie à la perception de l'habitat par l'habitant (Ekambi-Schmidt, 1972).

Les objets composant l'habitat diffèrent par leurs natures, leurs conceptions, leurs contraintes, leurs cycles de vie, etc. Par exemple, on considère que la durée de vie d'un bâtiment en brique varie de 75 à 100 ans[18], tandis que celle de l'électroménager « standard » est actuellement de 5 ans[19]. Ces différences entre objets ont poussé les acteurs du domaine de l'habitat à adopter des classifications.

Il existe communément trois catégories d'objets[20] présents dans l'habitat : les objets blancs, les objets bruns et les objets gris. À cette classification, nous pouvons ajouter les objets « du bâtiment » qui sont les objets liés à la gestion technique du bâtiment, indépendamment de l'aménagement. Le tableau 3-1 synthétise ces catégories.

Catégorie	Domaine	Exemples
Objets du bâtiment	Gestion technique du bâtiment	Radiateurs, ventilation, éclairages, ouvrants (volets, stores…)
Objets blancs	Electroménager	Réfrigérateur, lave-vaisselle, lave-linge
Objets bruns	Loisirs numériques	Ordinateur familial, Télévision, Chaîne Hi-Fi
Objets gris	Micro-informatique	Ordinateur, imprimante

Tableau 3-1. Classification des objets de l'habitat

La diversité de ces objets rend nécessaire une diversité des compétences mises en application pour aménager la structure d'une habitation, faisant intervenir de nombreux acteurs : les habitants bien sûr, mais aussi les architectes, artisans, etc. Nous présentons, dans les quatre sections de cette partie, les quatre types d'objets (en suivant la classification décrite ci-dessus), les contraintes qu'ils impliquent sur la conception des habitations ainsi que les domaines de compétences nécessaires.

3.1.1 Les objets du bâtiment

On catégorise dans les objets du bâtiment tous les produits liés au bâti, faisant partie de sa structure. Un bâtiment se construit en effet à partir de matériaux, et comporte des réseaux dits techniques : électricité, ventilation, thermie, etc. Ces réseaux techniques sont souvent orchestrés par des objets : actionneurs, minuteries, ventilation, chaudière, radiateur, chauffe-eau, etc., qui sont, de par leur fonction, eux aussi associés au bâti.

[18] http://www.duree-de-vie-batiment.fr, mis en place par le CSTB

[19] Selon les données des constructeurs, servant notamment aux extensions de garantie.

[20] Souvent dénommés « produits », car cette classification est courante dans le domaine du marketing.

Les objets du bâtiment sont fortement liés à la structure du bâtiment. Leur conception, fabrication et installation requièrent l'intervention de personnes qualifiées dans le domaine (fabricants, maîtrise d'ouvrage, artisans). La figure 3-1 montre la complexité organisationnelle qui a lieu lors du dimensionnement de ces objets, faisant l'objet d'études (Ango-Obiang, 2007). Les objets du bâtiment doivent leur présence à la branche « conception » à droite de la figure 3-1, et doivent leur nature à la branche « fabrication » à gauche de la figure 3-1. Ils sont ensuite installés par des corps de métier spécialisés, et souvent indépendants (en témoigne la structure en lots des appels d'offres liés aux constructions neuves ou aux rénovations).

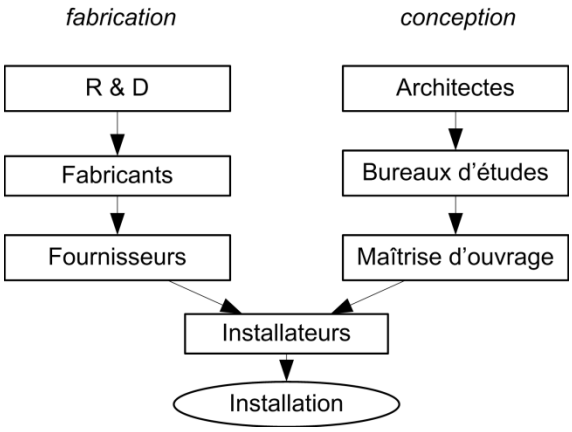


Figure 3-1. Rôle et structure simplifiée des acteurs lors de la conception et la construction d'un bâtiment

Les objets des bâtiments peuvent avoir un certain impact en ce qui concerne la santé publique. Afin de permettre la manipulation (par les différents corps de métier du bâtiment) et l'utilisation (par les habitants) des objets du bâtiment, des normes ont été définies. L'exemple le plus connu est lié au domaine électrique, domaine pour lequel des normes existent pour la sécurité des techniciens (les accidents de travail liés à l'électricité sont en effet 10 fois plus mortels que la moyenne[21]) mais aussi pour le confort et la sécurité des futurs habitants. En particulier, la norme NFC 15-100 (AFNOR, 2010) définit des contraintes, telles que :

- Un nombre minimal de prises de télécommunication par pièce
- Un nombre minimal de prises de courant par pièce
- Le positionnement des interrupteurs d'éclairage

Bien que les objets de l'habitat soient les produits d'un travail pluridisciplinaire (figure 3-1), l'habitant n'intervient que très rarement dans leur choix et leur positionnement. Cependant, ces choix contraignent le mode de vie et les habitudes de l'habitant qui, par exemple, placera ses meubles du salon en fonction de l'emplacement de la télévision, elle-même contrainte par l'emplacement de la prise TV.

L'habitant s'adapte d'autant plus aux choix faits pour lui que ces produits ont un cycle de vie très long, car ils ne sont remplacés que lors de rénovations lourdes. Par exemple, le réseau électrique n'est remplacé que tous les 20 à 25 ans en moyenne[22]. Cette durée de vie longue implique des déviances vis-à-vis des évolutions techniques et technologiques.

[21] D'après l'INRS : http://www.inrs.fr/accueil/risques/phenomene-physique/electricite/accident.html
[22] D'après l'ANAH, Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat (http://www.anah.fr)

Les caractéristiques des objets du bâtiment (respect des normes, choix des produits par les professionnels de l'habitat et cycle de vie long), ont des répercussions sur les choix faits pour des nouveaux produits, pour les constructeurs du bâtiment mais aussi pour l'habitant. Ce dernier est en effet contraint par les évolutions normatives et le progrès technologique lorsqu'il souhaite rénover son habitat, on parle alors de rénovation lourde.

3.1.2 Les objets blancs

Le terme « objets blancs » désigne les appareils électroménagers. L'appellation « objets blancs » est dû à la couleur usuelle de ces produits. Ceux-ci, courants dans nos habitats, se caractérisent par un cycle de vie relativement moyen (5 à 10 ans). Ils sont destinés au grand public et sont faciles à installer et à commander malgré la forte expertise métier qu'ils hébergent. Par exemple, gérer des cycles de lavage pour un lave ligne ou un lave-vaisselle requiert une forte connaissance experte (prenant en compte la dureté de l'eau, le poids du linge à laver, etc.), qui est déléguée au lave-linge, l'utilisateur n'ayant pas à s'en préoccuper.

Bien que moins complexes à installer que les objets du bâtiment, les appareils électroménagers nécessitent souvent des réseaux techniques spécifiques, qui contraignent leur installation ainsi que leur emplacement dans l'habitat. Par exemple, une machine à laver aura besoin, en plus d'un point de branchement électrique, d'une arrivée d'eau (éventuellement eau chaude et eau froide) ainsi que d'une évacuation d'eau. Une cuisinière électrique aura, quant à elle, besoin d'un circuit de branchement spécifique (dédié et de forte puissance), et son emplacement peut également être contraint par l'emplacement d'une hotte d'extraction. Leur volume caractéristique se retrouve dans le terme anglais pour définir les objets blancs « *major appliance* », soit « gros appareil ».

3.1.3 Les objets bruns et gris

Les objets bruns et gris correspondent respectivement aux objets liés aux loisirs numériques (téléviseur, chaîne Hi-fi, etc.) et à la micro-informatique (ordinateur familial, imprimantes, etc.). Ils doivent leur qualificatif à la couleur historique de ces objets, les premiers objets bruns ayant eu une enveloppe en bois, et les premiers produits liés à l'informatique personnels ayant été de couleur grise. Bien que constituant deux catégories distinctes, les objets bruns et les objets gris ont de plus en plus tendance à fusionner. Initialement, les produits gris étaient définis génériques vis-à-vis de leur applications, tandis que les produits bruns étaient dédiés à la diffusion de musique (radios, chaînes hi-fi) ou d'image (téléviseurs). Le développement des infrastructures de communications, ainsi que leurs convergences commerciales (offres « *triple-play* », incluant accès internet, téléphonie fixe et télévision) poussent aujourd'hui les produits bruns à devenir génériques, comme les baladeurs numériques qui ont dépassé leur stricte utilisation initiale à l'écoute de musique pour inclure des communications numériques, permettant ainsi de déployer des applications telles que des agendas et clients de courrier électroniques, des jeux et des applications utilisant du contenu provenant d'internet.

Ces objets se miniaturisent et ont acquis la faculté de communiquer entre eux pour devenir des objets mobiles, s'insérant dans l'intelligence ambiante. Ainsi, les ordinateurs et téléphones sont devenus portables et les télévisions sont devenues connectées. Au contraire des objets blancs, ces objets sont typiques de l'habitant, et correspondent pleinement à l'aménagement, car indépendants du bâtiment. Ils ne dépendent que très peu des réseaux (en particulier électricité et télécommunications), intégrant des sources d'énergies et des moyens de télécommunication sans fil, conditions nécessaires à leur mobilité.

On peut néanmoins distinguer deux types de produits, indépendamment de la classification d'origine : les produits mobiles (personnels) et les produits fixes (familiaux et partagés). Cette classification implique que les objets mobiles et personnels à prendre en compte dans l'habitat ont un usage externe qu'il faut également considérer.

3.1.4 Synthèse sur les objets fonctionnels

Les objets présents dans l'habitat peuvent se regrouper en quatre catégories comme nous l'avons vu précédemment. Ces catégories se justifient par des différences : différences d'usage (domaine d'application), différence de durées de vie (et donc du renouvellement technologique) ainsi que différences d'intégration dans le bâti (contraintes de fabrication et de conception). La figure 3-2 représente ces quatre catégories, en fonction de leur dépendance au bâti et de leur durée de vie.

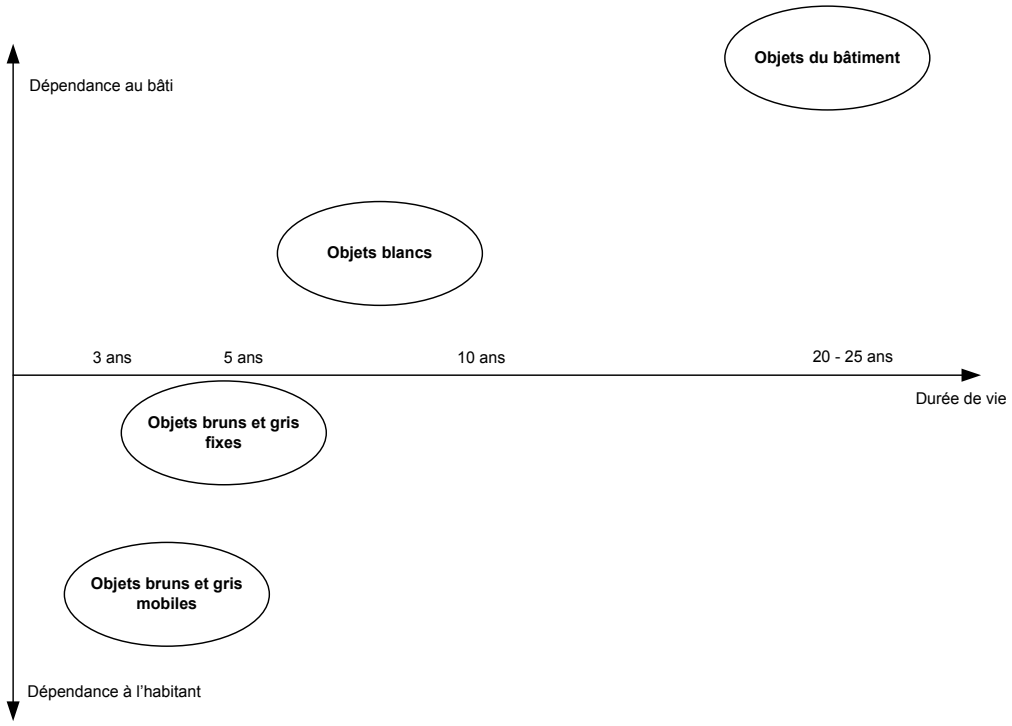


Figure 3-2 Contraintes de durées de vie et d'intégration des différents produits de l'habitat

Sur la figure 3-2, l'axe vertical met en avant un point crucial : la dépendance au bâti. Cette dépendance implique plusieurs problématiques liées, telles que :

- **La mobilité :** les objets mobiles ont tendance à avoir un usage personnel, comme les ordinateurs portables ainsi que les « *smartphones* ». Cette mobilité implique en premier lieu deux cas d'usage : un usage interne à l'habitat, et un usage externe.

- **La propriété :** les objets dépendant du bâti sont en majorité indissociables de la structure. Dans un schéma de location de l'habitat[23], l'habitant n'est pas décideur des objets dépendant du bâti. Le corollaire est que les objets dépendant des habitants sont alors renouvelés à chaque nouvelle location.
- **L'installation :** les produits dépendant au bâti ont souvent un usage spécifique, et doivent être installés par des experts, tandis que les produits à plus fort renouvellement technologique peuvent être installés par l'utilisateur.

La figure 3-2 montre également que les catégories ont différentes durée de vie, avec pour conséquences des problématiques de :

- **Fiabilité :** les produits ayant une forte durée de vie doivent être robustes.
- **Rétrocompatibilité :** les produits ayant un fort taux de renouvellement (faible durée de vie) doivent pouvoir s'adapter aux objets plus anciens, si jamais ils en étaient dépendants (comme le nouveau format des prises téléphoniques).

3.2 Les objets intelligents dans l'habitat

L'un des points caractéristiques de l'intelligence ambiante consiste à rendre les objets communicants, conduisant à l'informatique ubiquitaire. La mise en réseau de ces objets intelligents permet alors de réaliser des applications prenant en charge l'environnement proche, conduisant ainsi aux applications de contexte. Nous avons vu dans la section précédente que les objets de l'habitat sont variés, posant ainsi des contraintes liées à leurs domaines d'application, leur renouvellement technologique, et leurs usages.

3.2.1 Qu'est-ce qu'un objet intelligent ?

L'objet intelligent est une notion communément répandue dans l'intelligence ambiante. Une définition est donnée en figure 3-3. On parle également d'objets communicants. Ces objets mettent en œuvre des réseaux de communication, condition admise à leur intelligence.

[23] 42% de la population française vit dans un logement loué (source INSEE – 2007)

Il s'agit d'un objet capable de s'identifier (par opposition à un objet passif) et/ou qui peut effectuer des tâches plus sophistiquées, comme un capteur ou un actuateur. Un capteur peut obtenir des informations telles que la température, les vibrations, le bruit, la lumière, le son ou encore la pollution, tandis qu'un actuateur est un élément responsable d'une action, comme, par exemple, faire tourner un miroir ou modifier l'état d'un agent actif comme un thermostat.

Figure 3-3. Définition d'un objet intelligent selon Cisco[24]

Les définitions académiques des objets intelligents sont proches de la définition illustrée en figure 3-3, ainsi, Borovoy et al. (Borovoy *et al.*, 1996) ont proposé la définition suivante « *objet physique capable de percevoir son environnement et d'interagir avec d'autres objets, avec un système d'information et avec des utilisateurs* ». Kintzig (Kintzig, 2002) proposa une définition un peu plus complète, faisant intervenir la possibilité d'interaction directe des objets (sans utiliser de réseaux de communication). Selon Kintzig, l'objet communicant est caractérisé comme *« un objet physique interagissant, directement ou par le biais de réseaux de communication de nature quelconque, avec son environnement physique, d'autres objets communicants et/ou des utilisateurs humains éventuels, doté au minimum de capacité de mémorisation numérique d'état, et, le cas échéant, de capacité de traitement numérique* ».

Ces définitions font apparaître plusieurs critères concernant l'objet intelligent. Ces critères ont été en particulier développés dans la thèse de Cea Ramirez (Cea Ramirez, 2006), considérant alors qu'un objet intelligent doit satisfaire les points suivants :

- Capacités de mémorisation, pour le stockage de données caractéristiques de l'objet lui-même ainsi que de son environnement ;
- Capacités de perception, afin de percevoir son environnement physique et informatique dans le but de s'adapter et gérer son évolution ;
- Capacités de communication, afin de pouvoir rechercher, sélectionner et échanger des informations avec des objets pairs ;
- Capacités d'action, pour le traitement d'information et l'exécution de mécanismes afin d'accomplir une tâche ;
- Capacités de décision, pour la prise en compte de son environnement physique et informatique dans le but de prendre des décisions de manière autonome ou concertée.

Ce type d'objet permet de mettre en œuvre des applications dites de contexte (Schilit *et al.*, 1994; Dey, 2001), mais également des interfaces tangibles (Ishii *et al.*, 1997). En effet, le contexte est l'élément de base pour situer les interactions de l'objet avec des éléments externes (Beigl *et al.*, 2003; Holmquist *et al.*, 2004). Les « MediaCup », proposés par Beigl et al. (Beigl *et al.*, 2001), sont un exemple d'objets intelligents. Il s'agit de tasses, dotées de fonctions numériques, dont les fonctions de perceptions de mouvement et de température. Les tasses sont également dotées d'une fonction de communication. Cette fonction permet à d'autres objets d'utiliser les informations. L'auteur illustre ainsi une montre qui, à proximité de la tasse, affiche la température de celle-ci.

[24] Communiqué de presse disponible à l'URL suivante : http://www.asprom.com/presse/cp36.pdf

Les applications intra-catégories (catégories que nous avons décrites précédemment) sont développées et courantes, en particulier en ce qui concerne les objets gris (impression d'une page sur une imprimante réseau), les produits bruns (accès à du contenu multimédia hébergé sur le réseau depuis son téléviseur) et les objets du bâtiment (applications domotiques décrites dans le chapitre 2.1). Cependant, l'intelligence aspire à regrouper l'ensemble des produits de l'habitat afin d'accroître et d'étendre le nombre d'applications et de services, applications et services alors inter-catégories.

Un exemple d'application transversale à deux catégories est l'adaptation d'objets à la tarification énergétique. Par exemple, les objets tels que les machines à laver et les lave-vaisselle ont un cycle de lavage, cycle adaptable en fonction des capacités de l'objet (les cycles peuvent durer plus longtemps si le contenu à laver est détecté comme très sale). Les tarifications multiples des opérateurs électriques ont des durées fixes (par exemple, une période d'heure creuse durera de 12h30 à 14h). Dans une perspective d'économie d'énergie (et d'argent), les objets pourraient s'adapter à ces tarifications horaires pour ainsi optimiser l'ensemble de leur processus de lavage, ou au moins les routines les plus consommatrices, au prix le plus avantageux.

Les objets que nous avons classifiés dans la section précédente ont pour caractéristique d'être des objets fonctionnels (actifs) : ils intègrent un processus « machine », en opposition au mobilier (passif). Rendre intelligents ces objets constitue une étape primordiale pour réaliser un habitat intelligent. Knuvers, Knap et Sakamura, dans les travaux que nous avons cités dans le chapitre précédent (cf. section 2.3.1), ont particulièrement axé leurs réalisations sur le rôle de ces objets dans l'habitat : Knuvers en rendant les objets communicants, Knap en créant de nouveaux objets actifs, Sakamura en augmentant l'intelligence de ceux-ci.

Cependant, l'Intelligence ambiante ambitionne de rendre un plus large spectre d'objets communicants. Certaines vidéos disponibles sur internet présentent ainsi des objets de natures différentes, qu'ils soient actifs (catégorisés ci-dessus) ou passifs (comme du mobilier). L'une de ces vidéos, intitulée « *The social Web of Things* »[25], présente ainsi des interactions d'un nouveau genre entre objets d'un habitat d'une part et entre les objets et l'habitant d'autre part. La société Ericsson, à l'origine de cette vidéo, présente alors un habitat dans lequel les objets communiquent entre eux, dans le langage naturel de l'habitant, sous la forme de réseaux sociaux. Ce travail met en œuvre, avec la particularité d'utiliser un langage naturel, une application possible des objets intelligents.

3.2.2 Les différents acteurs autour de l'objet intelligent dans l'habitat

L'objet intelligent fait intervenir, de sa fabrication à son utilisation, plusieurs catégories de personnes. S'ajoutent aux rôles usuels d'utilisateur et de fabricants, les rôles d'intégrateurs et de développeurs de services. Ces deux rôles sont issus de la capacité de l'objet à communiquer à l'intérieur de l'habitat (avec d'autres objets) et à l'extérieur de l'habitat (avec des services). La figure 3-4 présente ces quatre rôles, que nous détaillerons ci-après.

[25] Vidéo réalisée pour la société Ericson, présentée à MWC 2011 (disponible http://www.youtube.com/watch?v=i5AuzQXBsG4)

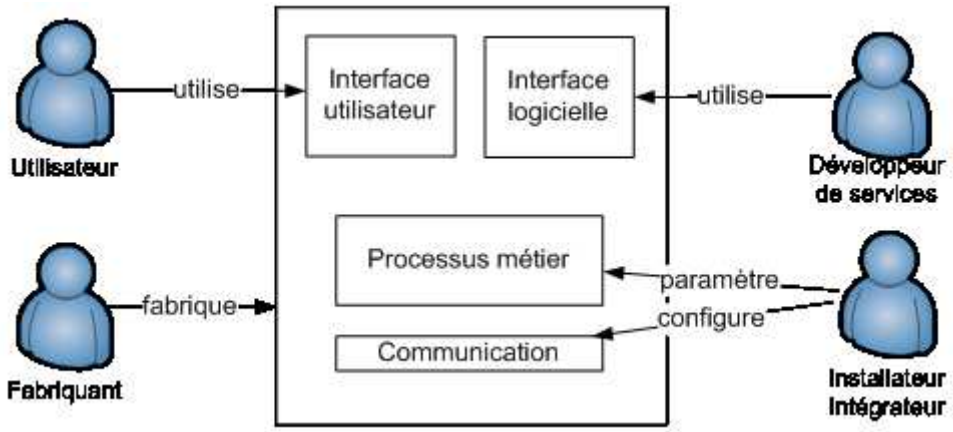


Figure 3-4. Rôle des acteurs associés à l'objet intelligent dans l'habitat

Ce modèle « par perception » des objets intelligents fait apparaître une répartition des trois couches composant un objet intelligent en deux modules. La couche communication et les processus métier sont perçus par les experts. Alors que la partie tangible (interfaces et apparence de l'objet) et les fonctionnalités offertes sont utilisées par l'utilisateur pour percevoir l'objet.

Cette vue, composée de deux parties, se retrouve dans les modèles d'architecture proposés pour les applications interactives dans lesquelles la partie fonctionnelle et l'interface (en charge de l'échange avec l'utilisateur) sont séparées (Depaulis, 2002).

En continuant le rapprochement entre le modèle des objets proposé et les modèles d'architecture IHM et en particulier les modèles multi-agents (ou répartis) comme MVC (Goldberg, 1984) ou PAC (Coutaz, 1987), l'habitat intelligent peut être vu comme un système interactif réparti dans lequel chaque agent est représenté par un objet intelligent.

3.2.2.1 Le fabricant

Le terme « fabricant » dans ce contexte se rapporte à un spectre plus large de rôles liés à la manufacture de l'objet, de la conception à l'implémentation. Globalement, l'approche « intelligente » est en rupture avec l'approche traditionnelle par l'ajout de capacités de communication de l'objet. Cette capacité implique que la problématique du fabricant se transforme dans le cas d'objets communicants en une problématique « des fabricants », puisqu'un objet qui communique seul n'a pas de sens.

Ainsi, le fabricant d'un produit devra avoir, *a priori* ou par retour d'expérience, la connaissance sur l'environnement dans lequel l'objet évoluera. Cet environnement comporte notamment les autres objets. Les fabricants devront alors s'entendre, par le biais de normes et standards, sur la manière dont les objets collaboreront. Cette collaboration, en soi, sera alors configurée sur place par l'installateur ou l'intégrateur.

3.2.2.2 L'installateur et l'intégrateur

Les rôles de l'installateur et de l'intégrateur sont prépondérants dans l'habitat intelligent, le rôle d'intégrateur n'existe d'ailleurs que pour ce type d'habitat. Le métier de domoticien (considéré comme un intégrateur) en est l'illustration, nous avons en effet vu dans le paragraphe 2.1 que l'intégration de technologies avait un rôle central dans la domotique. Il en est de même pour l'habitat intelligent. L'intégrateur et l'installateur sont des rôles proches, mais dont la réalisation et la complexité diffèrent en fonction de la catégorie des objets dont il est question. Lorsque les produits nécessitent une configuration complexe, du processus métier ou de la pile de communication, on a tendance à parler d'intégrateur. Lorsque cette configuration est plus simple, mettant alors l'accent sur la phase d'installation lors de la mise en œuvre du produit, on parlera d'installateur.

L'objectif de ce rôle est donc de configurer le processus métier, ainsi que la pile de communication. Ces étapes s'effectuent sur site, car elles nécessitent de connaître non seulement la configuration des lieux, mais aussi les souhaits de l'habitant.

L'objectif de ce rôle est d'identifier, localiser et configurer les différents objets, pour assurer la bonne collaboration entre eux. Même avec des capacités d'auto découverte, des objets ne peuvent *a priori* se localiser au sein d'un habitat. L'espace géographique étant délimité par des pièces *a priori* imperceptibles. Si un interrupteur découvre 3 lampes, il ne saura pas 1) si il doit agir sur l'ensemble de ces lampes, 2) si il doit agir sur une seule de ces lampes, et laquelle.

3.2.2.3 Le développeur de services

Le développeur de services peut également être associé au fournisseur de service. On désigne communément les services, dans le contexte de l'habitat, comme des prestataires externes. Par exemple, les fournisseurs d'électricité, d'eau et de gaz pour les consommations, ou encore les sociétés de télécommunications sont des fournisseurs de services courants. Cependant, le « service » tend à avoir un rôle de plus en plus large : la télévision connectée ne fait plus appel à un diffuseur hertzien, mais à l'ensemble des acteurs du Web, proposant ainsi du contenu interactif. Ainsi, nous considérons, dans le contexte de l'habitat intelligent, que les « services » en général impliquent un tiers externe à l'habitat.

Les objets intelligents sont alors un support pour les services. Un service couramment illustré est le « *smart grid* », mettant en œuvre un compteur d'énergie intelligent. Parmi les nombreuses applications qui sont décrites dans la littérature académique (Massoud Amin *et al.*, 2005; Farhangi, 2010), la supervision des consommations est très répandue (Darby, 2006). L'entreprise Google avait proposé un tel service, appelé « *PowerMeter* »[26]. Cependant, la difficulté de Google, dans une démarche de globalisation, résidait dans la rupture technologique de l'application, le parc de compteurs électriques n'étant pas techniquement suffisamment renouvelé.

[26] Aujourd'hui suspendu

3.2.2.4 L'utilisateur

L'utilisateur tient, dans l'habitat, le rôle essentiel (la partie 2 de ce manuscrit abordera plus en détail cette relation). Il doit être pris en compte à chaque étape afin d'éviter qu'un jour l'habitat ne soit si intelligent qu'il n'ait plus besoin de ses habitants. Plusieurs études ont eu lieu concernant la relation entre l'habitat et les habitants, relations auxquelles Ekambi-Schmidt (Ekambi-Schmidt, 1972) consacra sa thèse, montrant les différentes attentes d'un habitant envers son habitat. D'autres travaux ayant trait à l'habitat ont parfois fait émerger l'intérêt de l'intelligence pour les habitants. C'est ce que rapportent Eggen, Hollemans et van de Sluis (Eggen *et al.*, 2003), qui synthétisent le point de vue des habitants envers l'habitat, intelligent ou non. Selon l'étude qu'ils ont mené, l'habitat est un ensemble, voire un sentiment (« *home is a feeling* » dans le texte), agréable, où l'on se sent en confiance et en sécurité, libre de tout mouvement, où l'on est en possession de ses biens, des choses auxquelles on est attaché. Dans la même étude, les résultats concernant l'habitat intelligent font référence à certaines réticences, voire une certaine forme de pessimisme (« *people are smart, a home will never be smart* »), en contraste avec la perception de l'habitat traditionnel. Dans une autre étude, Saizmaa (Saizmaa *et al.*, 2008) développe la notion d'« *homeliness* », en rapportant les aspects affectifs, émotionnels, voire même spirituels caractéristiques de l'habitat.

En ce qui concerne l'habitat intelligent, il est fréquent d'associer les problématiques connues dans le domaine des technologies de communication et d'information, telles que les questions de respect de la vie privée et de sécurité. Cependant, peu d'études ont eu lieu sur les attentes des habitants envers un habitat intelligent. Parmi ces rares études, Bonino et Corno (Bonino *et al.*, 2011) publièrent les résultats d'un questionnaire dont la question est « *What would you ask to your home if it were intelligent ?* ». Cette étude révèle que les principaux domaines de préoccupation des habitants sont le confort, l'automatisation des tâches ménagères, ainsi que les interfaces « habitant-habitat ». Les auteurs soulignent d'ailleurs que les sondés n'ont que très peu proposé de réponses sur les aspects non-fonctionnels, tels que le respect de la vie privée.

En rapportant les travaux d'Eggen et al. (Eggen *et al.*, 2003), Bonino et Corno (Bonino *et al.*, 2011) soulignent une interrogation concernant les objets au sein de l'habitat. Ils soulignent le fait que les habitants doivent avoir le sentiment de posséder leurs biens, donc leurs objets. Bonino et Corno complètent avec la formule « *and not vice-versa* », soit ne pas se faire posséder par ses biens, et mentionnent alors le contraste avec les orientations en intelligence ambiante recherchant alors un comportement autonome des objets.

3.2.2.5 L'assignation des rôles

Selon les catégories présentées en début de chapitre, les rôles concernant les objets intelligents (choix de l'objet, installation de l'objet et mise en œuvre) sont assurés par des acteurs différents, comme le présente le tableau 3-2.

Tâche	Objets du bâtiment	Objets blancs	Objets bruns et gris fixes	Objets bruns et gris mobiles
Choix	Architectes, bureaux d'études	Propriétaire, habitant	Habitant	Habitant
Installation	Artisan	Artisan (réseaux), technico-commercial, propriétaire/habitant	Technico-commercial, Habitant	Habitant
Configuration, mise en œuvre	Artisan, Intégrateur	Technico-commercial, propriétaire/habitant	Technico-commercial, Habitant	Habitant

Tableau 3-2. Rôles durant les étapes de déploiement des objets intelligents de l'habitat

Le tableau 3-2 montre ainsi, d'une part le rôle central de l'habitant vers les catégories d'objets gris et bruns, et d'autre part l'importance des corps de métiers experts concernant les objets du bâtiment, voire les produits blancs.

3.2.3 Perception des objets : de l'affordance à l'ingénierie

La diversité des rôles qui agissent autour de l'objet intelligent (figure 3-4) a pour conséquence d'induire différentes perceptions de l'objet. La perception des objets intelligents peut se faire de deux manières : d'une part la perception dite « utilisateur », celle que l'objet suggère, ou que l'on apprend en utilisant l'objet, et, d'autre part, la perception « concepteur », ou experte, incluant une vision interne de l'objet. Ces deux approches sont caractérisées par des paradigmes courants : l'affordance pour la première, et l'ingénierie pour la seconde. La figure 3-5 représente ainsi la perception de l'objet selon les différents rôles liés aux objets intelligents (présentés en figure 3-4) : les « experts » (fabricant, installateur/intégrateurs) et les « utilisateurs » (habitant, développeur de services).

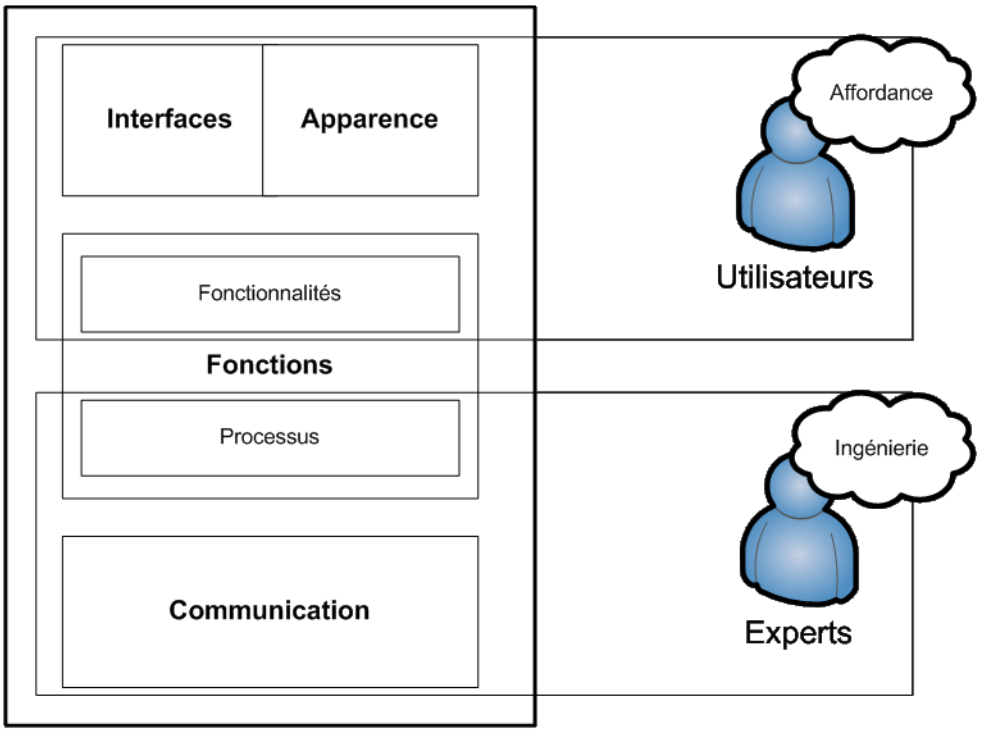


Figure 3-5. Perceptions d'un objet intelligent

3.2.3.1 L'approche utilisateur : l'affordance

L'affordance est une notion ergonomique, très répandue, qui a été introduite par Gibson (Gibson, 1979), représentant la capacité d'un objet à suggérer sa propre utilisation. Gibson propose ainsi une approche écologique de la perception de l'environnement par les hommes (approche subjectiviste). Il souhaitait comprendre comment tout individu vivant, animal ou humain, arrivait à s'adapter à son environnement, voire à en tirer profit et cela malgré la taille parfois restreinte du cerveau de certains animaux. L'affordance est alors initialement ce que l'objet permet à l'individu de faire dans une situation telle que le sujet la perçoit, c'est donc la perception par un individu d'un objet et les actions possibles que cet objet propose. Selon Gibson, les affordances sont donc des relations qui impliquent une prise en compte de l'objet perçu qui a certaines caractéristiques, et de la façon de percevoir de l'individu. Selon Gibson, les affordances diffèrent d'un individu à l'autre.

Gaver (Gaver, 1991) a également travaillé sur l'affordance, et son lien avec le concepteur d'un objet. Il introduit en particulier les notions d'affordance cachée, d'affordance perceptible et de fausse affordance. L'affordance cachée est alors une possibilité, vis-à-vis de l'objet, qui n'est pas perçue par l'utilisateur, contrairement à l'affordance perceptible où l'utilisateur perçoit et utilise cette possibilité. La fausse affordance est, quant à elle, une perception de l'objet par l'utilisateur que le concepteur n'avait pas prévue.

Norman a travaillé sur la notion d'affordance dans le domaine des objets du quotidien par l'intermédiaire de son ouvrage « *The design of everyday things* » (Norman, 1999). L'affordance selon Norman correspond à l'information nécessaire dans le monde, l'apparence des dispositifs doit ainsi pouvoir fournir des indices requis pour une utilisation appropriée grâce à leurs affordances. Les affordances sont donc les relations possibles entre les acteurs et les objets, elles sont des propriétés du monde que l'individu va percevoir en fonction de son but. L'auteur met en avant une précision que Gibson n'avait pas émise, en effet, ici il y a une véritable prise en compte du projet de l'acteur, il percevra l'affordance d'un objet compte tenu de son projet et de ses objectifs uniquement. On considère donc que les buts, les plans, les intérêts ainsi que les expériences antérieures des individus vont influencer la façon dont ils perçoivent l'environnement (Allaire, 2006). Norman, d'un point de vue plus pratique, ajoutera à cela que les concepteurs doivent se soucier de savoir si les individus perçoivent les actions possibles, significatives et utiles avec un résultat attendu, lorsqu'ils regardent un produit. Si tel est le cas, alors il est juste de parler de produit affordant.

3.2.3.2 L'approche experte : protocoles, normes et standards

La conception, dès lors où elle implique différents intervenants, nécessite la définition d'un langage commun. Ce langage peut prendre différentes formes, mais doit être connu et appliqué par tous les intervenants. Par exemple, en génie logiciel, les modèles UML permettent la représentation des différents aspects (différentes perceptions) du logiciel. Ces modèles reposent alors sur des notations, dont la grammaire est partagée par l'ensemble des participants à la conception.

Ces langages s'avèrent indispensables dans la mesure où des objets de manufactures différentes sont amenés à coopérer au sein d'un habitat. C'est ainsi que des protocoles de communication, parfois promus en tant que standards ou normes décrivent différents choix possibles pour les bases de conception d'un objet intelligent. Communément, ces standards ou normes s'appuient, dans le domaine des technologies de communication, sur le modèle OSI proposé par Zimmermann (Zimmermann, 1980), et illustré au tableau 3-3.

N°	Couche	Rôle
7	Application	Point d'accès aux services réseau
6	Présentation	Format en encodage de données
5	Session	Synchronisation des échanges
4	Transport	Communication entre processus (de bout en bout)
3	Réseau	Communications entre points réseau (de proche en proche)
2	Liaison de données	Communication directes (point à point)
1	Physique	Transmission des signaux

Tableau 3-3. Couches du modèle OSI

Ce modèle définit sept couches. La plus basse (n°1) étant la couche dite physique, définissant le médium de communication (filaire, radio) ainsi que le type de signal (modulation) qui contient l'information à transmettre. La couche supérieure a pour rôle de gérer l'accès spécifique à ce média de communication. Les couches 3 et 4 servent à transporter l'information, la couche 5 sert à synchroniser les échanges, et les couches 6 et 7 correspondent respectivement aux formats de données ainsi qu'à leur exploitation. L'intérêt de ce modèle est de fragmenter les différents composants intervenant dans la communication entre entités électroniques. Chaque couche étant indépendante des couches supérieures ou inférieures, il est alors possible de modulariser différents protocoles. Ainsi, Internet s'utilise indépendamment d'Ethernet ou du Wifi.

3.2.3.3 Illustration : le cas du thermostat

Un exemple courant d'objet intelligent est le thermostat. Le modèle décrit en figure 3-5 s'y applique de la manière suivante : la perception de la fonction de l'objet par l'utilisateur est de « chauffer ou refroidir la pièce ». Pour ceci, il peut utiliser l'interface de cet objet afin d'augmenter ou de diminuer une consigne (quantitative ou qualificative). Pour le concepteur, le rôle de l'objet est différent : il s'agit d'actionner un dispositif de chauffe et/ou de climatisation, en fonction d'un seuil fourni par l'utilisateur. Il implémente, pour ceci, un processus de régulation au sein de l'objet à partir des informations internes (mesure de température ambiante, consigne de l'utilisateur) et d'informations externes (état du dispositif de chauffe, température extérieure, etc.).

D'un point de vue utilisateur, la fonctionnalité perçue (chauffer/refroidir) est simpliste face au processus qu'héberge l'objet. Ainsi, les anecdotes sont courantes quant aux mauvaises utilisations des thermostats. L'une d'entre elles est décrite dans un article du « *Wall Street Journal* », intitulé « *Employees only think they control thermostat* »[27]. Cet article rapporte que de nombreux thermostats installés dans les bureaux ne seraient que des placebos dans le but de réduire le nombre de plaintes des occupants quant à l'ambiance thermique.

Cet exemple est illustratif de plusieurs verrous de la perception des objets dans l'habitat intelligent et des objets communicants. En premier lieu, l'approche d'un objet par le concepteur est différente de la représentation qu'un utilisateur peut se faire de ce même objet. En second lieu, certaines applications, comme la thermique du bâtiment dans cet exemple, sont très complexes et nécessitent une connaissance approfondie du domaine. Dans le cadre d'une collaboration entre objets, faute de ne pas connaître la représentation qu'a le concepteur d'un objet, les concepteurs des autres objets, ou les concepteurs d'applications (englobant plusieurs objets) auront tendance à s'appuyer sur la même représentation que l'utilisateur, plutôt que la représentation du concepteur.

3.3 Discussion : problèmes de divergences

Nous avons défini, en figure 3-5, un modèle en 3 couches : une couche interfaces et ergonomie, une couche fonctions et une couche communication. Ce modèle permet de représenter un objet intelligent : c'est un objet qui communique avec d'autres par une couche de communication dans le but de synchroniser des fonctions, formant ainsi une application. Ces objets peuvent offrir des moyens d'interaction directement avec l'utilisateur par le biais d'interfaces. Nous proposons, en figure 3-6, une représentation des relations entre interfaces, applications, fonctions et services liés à l'objet intelligent.

[27] Disponible à l'adresse suivante : http://online.wsj.com/article/SB10425776285914013 04.html

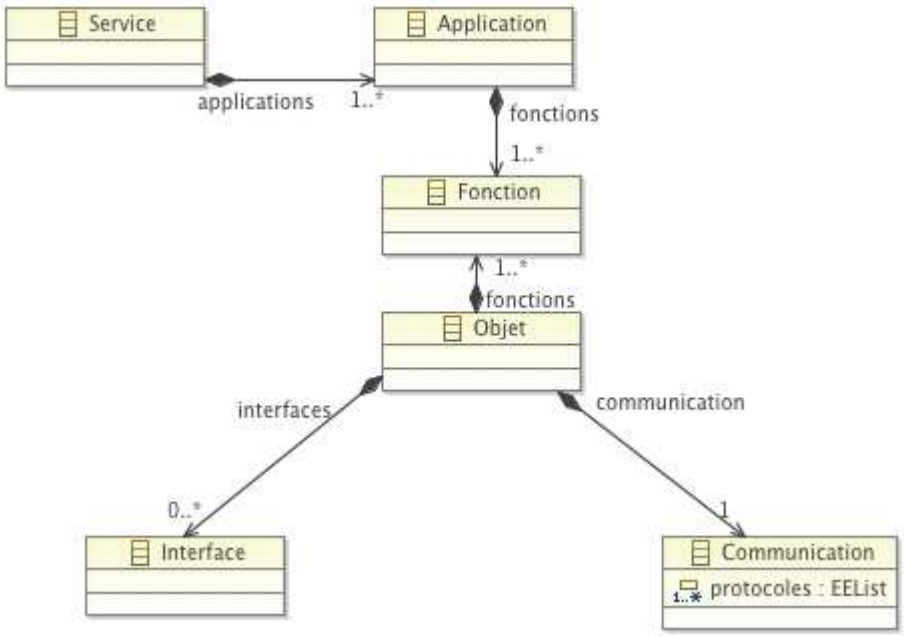


Figure 3-6. Modèle d'un objet intelligent

Cette représentation nous permet de mettre en évidence le besoin d'homogénéité entre les objets. En effet, la réalisation d'une application, et par extension, un service, repose sur la collaboration entre deux ou plusieurs objets. La diversité des objets dans un habitat, illustrée dans le paragraphe 3.1, nous renseigne quant aux différentes contraintes et différentes approches qui interviennent lors de la conception d'un objet intelligent.

3.3.1 Divergences d'Objet à Objet

Au sein de chacune des catégories que nous avons présentées dans ce chapitre, les technologies de communication convergent vers des normes et standards. L'informatique fut pionnière avec le modèle OSI (Zimmermann, 1980), illustré au tableau 3-3, et le protocole IP. Les produits bruns ont tendance à s'approcher de ces solutions, notamment grâce à leurs proximités apportées par les offres ADSL « *Triple Play* ». Les produits domotiques, souvent critiqués pour leur manque d'ouverture (Nain, 2011), tendent à se fédérer autour de normes et standards, avec néanmoins des disparités persistantes entre continents (Wacks, 2002). Il existe à ce jour très peu de solutions pour les produits blancs.

Cependant, de fortes divergences persistent entre les quatre catégories principales d'objets. Ces divergences de communications ne se jaugent pas forcément sur des critères techniques ou de performance, mais également sur des différences concernant les domaines d'application et les acteurs concernés (tableau 3-4).

Catégorie	Protocoles majeurs	Applications	Diffusion
Objets du bâtiment	Bacnet, Lon, KNX, propriétaires	Gestion technique du bâtiment	Rare
Produits blancs	Propriétaires	Gestion à distance	Très rare
Produits bruns	IP/UDP	Streaming	Courant
Produits gris	IP/TCP	Générique	Indissociable

Tableau 3-4. Protocoles de communication et applications pour les différents objets de l'habitat

De plus, les contraintes abordées lors de la présentation de ces objets (cf. section 3.1) sont également différentes : les produits bruns et gris sont associés à un besoin de transparence technologique, de par sa proximité à l'habitant qui n'est pas expert, tandis que les objets du bâtiment sont soumis à une longue durée de vie. Cette longue durée de vie s'illustre par des protocoles contraints ; contraints pour les média physiques utilisés pour l'échange de données, et leur facilité de câblage (par exemple une paire torsadée simple, en topologie bus), mais également contraints par leur qualité de service (protocoles de transport déterministes). Ces contraintes expliquent en partie le fait que le protocole IP (de type probabiliste, ou « *best-effort* ») ne soit pas utilisé systématiquement pour certaines applications, justifiant ainsi l'existence de protocoles spécifiques, comme ModBus pour les automatismes industriels, ou CAN[28] pour les réseaux de capteurs automobiles. Ce besoin de réseaux contraints est en forte opposition avec l'approche utilisée pour les applications grand public, concernant les produits bruns et gris, qui s'appuient sur la généricité et la diffusion du protocole IP.

Les divergences des protocoles de communications pour les objets intelligents semblent inévitables, malgré certains travaux dont l'objectif est d'utiliser un protocole de communication commun, définissant ainsi « L'internet des choses » (Castellani *et al.*, 2010; Shelby *et al.*, 2011; Trifa, 2011). Selon la communauté « *Pouzin Society* » [29], les architectures réseaux actuelles ont conduit à certaines fausses représentations mentales (Day *et al.*, 2008), sources d'erreurs passées, présentes et à venir. Les membres de cette communauté préconisent alors une approche plus fondamentale des protocoles réseaux : l'interconnexion de processus, en citant Robert Metcalfe, à l'origine d'Ethernet : « *The network is the interprocess communication, and only this* ».

3.3.2 Divergences Objet à Service

La mise en réseau des divers objets composant l'habitat introduit une notion supplémentaire : le service. Le service, contrairement à l'objet, n'est pas matérialisé, contenu ou associé sous forme physique, et ne s'exécute pas nécessairement au sein de l'habitat. Nous avons vu au cours de ce chapitre (3.2.2.3) que les problématiques associées au service sont principalement des problématiques de représentation et d'usage. En effet, le couple fournisseur/développeur d'un service se repose sur les connaissances qu'il a (ou qu'il pense avoir) des fonctions des objets utilisés. Or, ces connaissances ne reposent pas sur les processus experts, mais sur le rôle joué par l'objet qui s'illustre par le concept d'affordance.

[28] *Controller Area Network*
[29] http://www.pouzinsociety.org

Cette représentation de connaissance peut être source d'erreurs vis-à-vis des objectifs initiaux de la communication des objets. En effet, les concepteurs d'objets s'accordent sur des données à échanger afin de réaliser une application. Par exemple, pour le fonctionnement d'une application « régulation de chauffage », le constructeur d'un thermostat va établir un protocole avec le constructeur d'une chaudière afin que chacun de ces objets puisse échanger les données nécessaires. Le protocole ainsi établi aura implicitement une très forte connaissance experte en thermie. Un développeur de service, par exemple un fournisseur de prévisions météo, qui souhaiterait utiliser cette application en vue de l'optimiser, aura alors besoin de connaitre le protocole et d'acquérir des connaissances en thermie pour comprendre le fonctionnement de l'application « régulation de chauffage ».

3.3.3 Le besoin de convergence

Nous avons vu, au cours de ce chapitre, que les objets sont les éléments essentiels de l'habitat. Ils apportent à celui-ci sa dimension de foyer, par l'étape d'aménagement. Cependant, il existe de fortes variabilités entre les objets qui composent un habitat. Nous avons regroupé ces objets en quatre catégories, couramment employées : les objets du bâtiment, les objets blancs, les objets bruns et les objets gris. Ces catégories répondent à des problématiques différentes, auxquelles sont assignés des rôles spécifiques.

L'objet, sous l'impulsion des progrès technologiques définissant l'intelligence ambiante, devient intelligent. Il est doté de fonctions de communications, qui lui permettent d'échanger des informations avec des objets pairs, ainsi qu'avec des services. Ainsi, les différents objets de l'habitat deviennent des objets intelligents, contribuant à l'habitat intelligent.

Cependant, l'objet intelligent augmente la variabilité qui caractérise les classifications des objets de l'habitat, en exposant deux facettes :

- une facette utilisateur au sens large, comprenant l'habitant et les éventuels services extérieurs à l'habitat ;
- une facette experte, comprenant les rôles de fabricants et d'installateurs ou d'intégrateurs en fonction de la complexité de l'objet.

Ces deux facettes induisent une sorte de double dialogue : une communication objet à objet (experte) et une communication objet à service (de niveau utilisateur). Face à un grand nombre d'objets, d'applications et de services possibles au sein de l'habitat intelligent, il est nécessaire de disposer d'un cadre permettant, d'une part de rendre hétérogène la communication entre objets (par exemple qu'un thermostat puisse coopérer avec toutes les chaudières), et d'autre part, de faciliter la représentation de connaissances afin que des services utilisent les applications déployées dans l'habitat (que les services puissent coopérer avec toutes les applications de régulation de chauffage). C'est l'objet de notre proposition qui est développée dans le chapitre suivant.

4 L’habitat interopérable

L’habitat intelligent peut être vu comme une composition d’objets intelligents (chapitre 3). Or, la variance des objets de l’habitat rend difficile la convergence technologique nécessaire à leur collaboration. Il est donc nécessaire de définir un référentiel commun à ces objets afin de pouvoir uniformiser les piles de communication et le contenu des communications. Cela nous conduit à définir un cadre d’interopérabilité, cadre nécessaire au bon fonctionnement des objets entre eux, mais aussi nécessaire au déploiement d’applications et services entre objets.

Comme nous l’avons vu au chapitre précédent, les objets intelligents divergent de par leurs différents usages, leurs différentes natures, etc. Cependant, pour pouvoir atteindre l’objectif qu’est la conception d’un bâtiment intelligent, il est nécessaire de faire converger la communication des objets intelligents, afin qu’ils puissent dialoguer entre eux (à un niveau expert, quelles que soient leurs divergences), et que ces mêmes objets puissent participer à des services de plus haut niveau, pour lesquels les acteurs n’ont pas cette connaissance experte.

Pour ceci, il est primordial de définir un référentiel commun aux objets intelligents. Nous proposons, dans ce chapitre, de faire un état de l’art des méthodes qui peuvent aider à atteindre cet objectif. Nous définirons ainsi l’interopérabilité et ses problématiques, que nous illustrerons par un exemple concret. Nous nous intéresserons ensuite au rôle des passerelles de service, dont nous proposerons une architecture en vue de rendre interopérable l’ensemble des objets cités dans le chapitre précédent.

« *Pour diriger, il faut un nombre impair, et trois, c'est déjà trop.* »

George Clémenceau

4.1 Le besoin d'interopérabilité

L'interopérabilité est un préalable nécessaire au travail collaboratif. En effet, c'est elle qui définit le cadre de l'échange entre deux ou plusieurs entités. Cette notion est ainsi reprise dans de nombreux domaines, en particulier dans les transports tels que le transport ferroviaire (écartement des rails, uniformisation des signaux ferroviaires pour les liaisons transfrontalières) et le transport aérien (création de l'espace européen).

L'habitat intelligent représente un tel cas de travail collaboratif. Au chapitre précédent, nous avons vu que les objets intelligents de l'habitat, ainsi que les acteurs qu'ils impliquent, sont hétérogènes, rendant la collaboration entre les objets intelligents délicate. L'interopérabilité est ainsi l'un des critères évoqué par Sakamura (cf. section 2.3.1.1) de qualification d'un habitat en habitat intelligent, critère régulièrement évoqué dans la littérature (Edwards *et al.*, 2001; Nakazawa *et al.*, 2006; Nain *et al.*, 2009).

4.1.1 Interopérabilité et compatibilité

Edwards et Grinter (Edwards *et al.*, 2001), en présentant des challenges de l'habitat intelligent (cf. section 2.3.1.2), expliquent que l'interopérabilité n'est « *pas seulement la possibilité d'interconnecter, mais la possibilité de le faire avec peu voire sans implémentation ou planification* ». On définit fréquemment l'interopérabilité face à la compatibilité, le tableau 4-1 rapporte les définitions de ces deux concepts, définitions provenant de l'IEEE[30]. Selon la définition de Wikipédia, pour qu'il y ait interopérabilité, le système doit s'appuyer sur une norme définissant le cadre de fonctionnement et d'échange entre deux entités. La compatibilité n'a pas cette exigence de rigueur.

Interoperability	The ability of two or more systems or components to exchange information and to use the information that has been exchanged.
Compatibility	The ability of two or more systems or components to exchange information.

Tableau 4-1. Définitions d'interopérabilité et compatibilité selon l'IEEE (IEEE, 1991)

Cette différence est illustrée sur la figure 4-1 , par l'exemple d'échanges entre deux entités, A et B. Dans une démarche de compatibilité (à gauche de la figure), les deux entités s'accordent sur un document commun, dont ils ont la charge. Cela peut être un standard ou une documentation technique. Dans une démarche d'interopérabilité, le document qui régit les échanges est une norme, maintenue par un organisme de normalisation C. Ces organismes de normalisation permettent non seulement de maintenir les référentiels du cadre d'échange, mais peuvent également imposer des certifications sur les objets de l'échange, ou définir les procédures et les autorités de certification.

[30] Institute of Electrical and Electronics Engineers - www.ieee.org

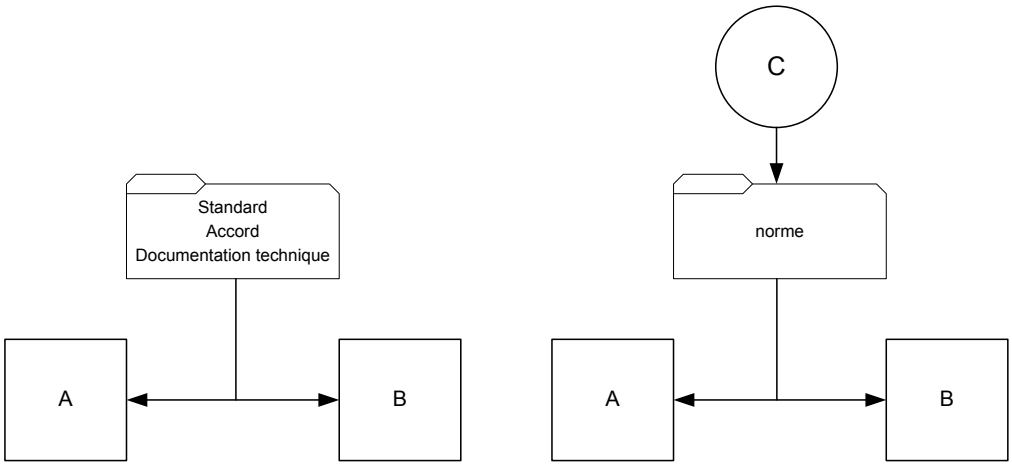


Figure 4-1. Echanges entre deux entités A et B, sous forme de compatibilité (à gauche) et sous forme d'interopérabilité (à droite)

La littérature académique propose des définitions plus développées de l'interopérabilité. Baïna et Paviot (Baïna, 2006; Paviot, 2010) dressent ainsi un inventaire non-exhaustif de ces définitions que nous reprenons pour partie (tableau 4-2).

Définition de l'interopérabilité	**Auteur - référence**
« La capacité de deux ou plusieurs systèmes ou composants à échanger des informations et à utiliser les informations échangées »	IEEE - (IEEE, 1991)
« Réussie si et seulement si l'interaction entre les systèmes impliqués couvre les aspects données, ressources et processus métiers en utilisant les sémantiques définies dans le domaine métier »	Chen et Doumeingts - (Chen *et al.*, 2003)
« La capacité à communiquer avec des systèmes pairs et accéder à leurs fonctionnalités »	Vernadat - (Vernadat, 1996)
« L'aptitude de deux systèmes (ou plus) à communiquer, coopérer et échanger des données et services, et ce malgré les différences dans les langages, les implémentations et les environnements d'exécution ou les modèles d'abstraction »	Wegner - (Wegner, 1996)

Tableau 4-2. Définitions de l'interopérabilité

Chen et Doumeingts (Chen *et al.*, 2003) ainsi que les membres du cluster GOSPI (GOSPI, 2007) ont particulièrement développé le concept d'interopérabilité. Selon les auteurs, ces différents niveaux de l'interopérabilité se généralisent en trois approches (illustrées en figure 4-2) :

- Fédérée, où les entités concernées ne disposent pas de format commun pour l'échange et s'ajustent l'une et l'autre ;
- Unifiée, où chacune des entités conserve son format de référence avec la définition d'un méta-format pour établir une correspondance ;
- Intégrée, où chaque entité utilise un format commun pour tous les modèles. Dans ce cas, suite à une intégration, les différents systèmes n'en forment plus qu'un.

Ces approches sont confrontées à autant de barrières, présentées en figure 4-2 : une barrière d'ordre conceptuel (diversité des concepts), une barrière d'ordre technologique (diversité des technologies de communication et de présentation des données) et une barrière organisationnelle (différents modes de travail).

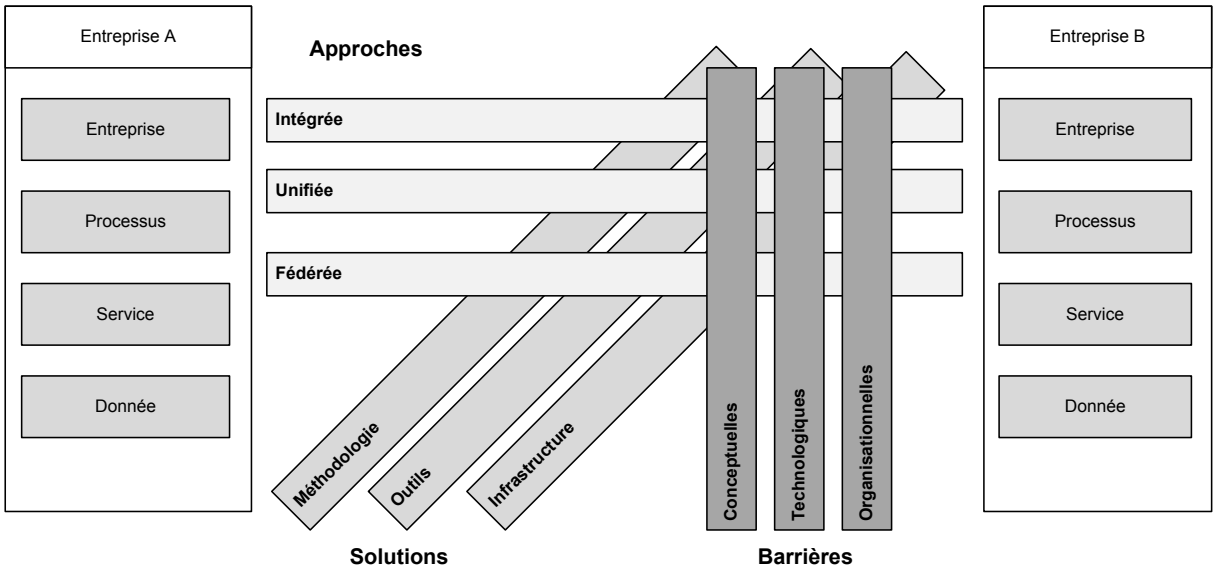


Figure 4-2. Approches interopérables (GOSPI, 2007)

Ces différentes approches sont situées dans des contextes généraux (figure 4-1) ou spécifiques (collaboration entre deux entreprises - figure 4-2). L'interopérabilité peut dépendre de beaucoup de critères, à de multiples niveaux. Une prise électrique, par exemple, est interopérable en fonction du réseau électrique qu'elle fournit, ainsi que de la forme de celle-ci qui doit permettre des branchements. Dans cet exemple, il y a donc deux critères (interface de branchement et caractéristiques du service), qui peuvent dépendre de deux normes différentes. Cependant, l'interopérabilité entre les formes de ces prises électriques n'induit pas nécessairement l'interopérabilité du réseau électrique.

Dans le cadre de l'habitat intelligent, nous avons vu, au chapitre 3, qu'un objet pouvait avoir plusieurs interfaces, dépendantes de rôles différents. L'interopérabilité, dans cette situation, doit alors s'effectuer à chacune de ces interfaces, en accordance avec chacun des rôles.

4.1.2 Le test de l'interopérabilité : l'interchangeabilité

L'objectif final de l'interopérabilité dans le cadre de l'habitat intelligent peut s'illustrer par l'interchangeabilité. L'interchangeabilité se définit par la possibilité de remplacer une entité d'un système par une autre sans modifier les propriétés du système (Chen *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2003). Un domaine d'application est l'interchangeabilité des pièces automobiles, où le changement d'une pièce mécanique est rendu possible, même si le constructeur de la pièce nouvelle est différent de la pièce d'origine. L'interopérabilité dans ce cas ne dépend pas forcément d'une norme. Cependant, les deux constructeurs différents de la pièce disposent d'un document commun, émis par le constructeur de l'automobile.

L'interchangeabilité permet ainsi d'intégrer :

- l'interopérabilité des interfaces : interfaces utilisateur, interfaces logicielles et interfaces de communication ;
- l'interopérabilité des processus.

L'interchangeabilité peut être considérée comme la condition pour l'interopérabilité, dans le cadre d'un objet intelligent. Deux objets interopérables peuvent alors être « changés », dans une logique d'application distribuée, sans modifier le fonctionnement de l'application. Ce critère est déjà présent dans certaines catégories d'objets de l'habitat. Par exemple, les interrupteurs ont une taille standard (en largeur, profondeur et hauteur), leur permettant d'être encastrés dans des emplacements prévus à cet effet. Dans le cadre des protocoles de communications associés à ces objets communicants, on peut alors remplacer un interrupteur par un autre physiquement. Si les protocoles sont dans une logique de compatibilité, on pourra également connecter le nouvel interrupteur au système, mais sans toutefois bénéficier d'une garantie tierce de fonctionnement.

> "In telecommunication, interchangeability is a condition which exists when two or more items possess such functional and physical characteristics as to be equivalent in performance and durability, and are capable of being exchanged one for the other without alteration of the items themselves, or of adjoining items, except for adjustment, and without selection for fit and performance."

Figure 4-3. Définition de Wikipédia pour l'interchangeabilité dans le domaine des technologies de l'information

L'interchangeabilité a déjà été évoquée dans les sciences de l'information. Ainsi, Chen et Szyùanski (Chen *et al.*, 2001), en évoquant des modèles de simulations, soulignait le fait que l'interchangeabilité était souvent ignorée, malgré sa caractéristique de garantir la réutilisabilité de composants logiciels. Aleksy, Schader et Tapper (Aleksy *et al.*, 1999), dans une logique similaire de composants logiciels (architectures CORBA), soulignent qu'il peut exister plusieurs implémentations différentes à une même interface logicielle, malgré la normalisation de ces interfaces. Les auteurs concluent que l'interopérabilité et l'interchangeabilité, en évitant les implémentations spécifiques du constructeur, peuvent permettre au développeur de profiter d'une immense variété de combinaisons.

4.1.3 Exemple fil rouge : la lampe variée

Dans cet exemple, sur lequel nous nous appuierons ensuite, nous illustrons les problèmes d'interopérabilité autour d'un objet courant du bâtiment : une lampe variée. Ce type d'objet est couramment utilisé pour la régulation de l'intensité lumineuse en fonction de la luminosité. Dans cette topologie type, une lampe variée est pilotée par une sonde de luminosité, et peut être contrôlée manuellement par un utilisateur. L'objet doit donc être capable de communiquer avec une sonde de luminosité ainsi qu'avec un interrupteur.

L'un des services qui peut alors être envisagé est de fournir une interface distante à l'habitant, pour pouvoir piloter cette lampe. En suivant une approche écologique (cf. section 3.2.3.1), les caractéristiques du service associé à l'objet sont :

- Savoir si la lampe est allumée
- Connaître son niveau de variation
- Allumer la lampe
- Positionner la lampe à un niveau de variation précis

La capacité de communication de l'objet « lampe » est, d'un point de vue conception, décrite par plusieurs modèles, incluant dans certains cas les processus internes (transitions entre états, temps maximum et minimum de variation, etc.). Ces descriptions existent au sein des protocoles spécialistes du domaine (LonWorks, Bacnet, KNX, ZigBee, etc.), souvent sous le terme d'« *application profile* », mais aussi au sein d'autres protocoles tels qu'UPnP (dont la diffusion concerne principalement les objets liés aux loisirs numériques). Nous illustrerons dans cet exemple les protocoles KNX, UPnP et DMX (détaillés par la suite respectivement aux sections 4.3.2, 5.2.5 et 5.2.3), appliqués au cas d'une lampe variable.

Selon le protocole KNX, l'application associée à une lampe variable est représentée par deux applications indissociables : l'application variation associée à la lampe (*CH_Dimming_Actuator_Basic* sur la figure 4-4) et l'application de l'interrupteur (*CH_Switch_Dimmer_Info* sur la même figure). En UPnP, la représentation de la lampe variée est proche d'une composition de deux webservices : un service de commutation (*PowerService* sur la figure 4-5) et un service de variation (*DimmingService* sur la même figure). Le standard UPnP ne décrit pas de partie « contrôle ». Enfin, la figure 4-6 illustre une API qui peut être associée à une lampe variée pilotée par le protocole DMX, ce dernier protocole ne disposant pas de représentation.

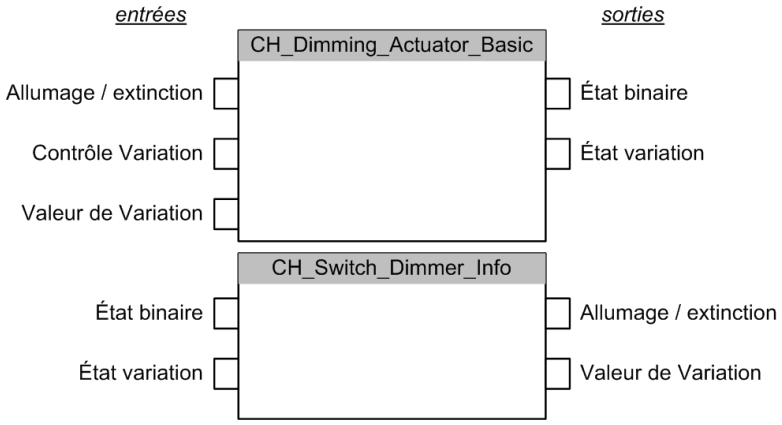


Figure 4-4. Description des applications normalisées pour (en haut) la partie actionneur, (en bas) la partie contrôle

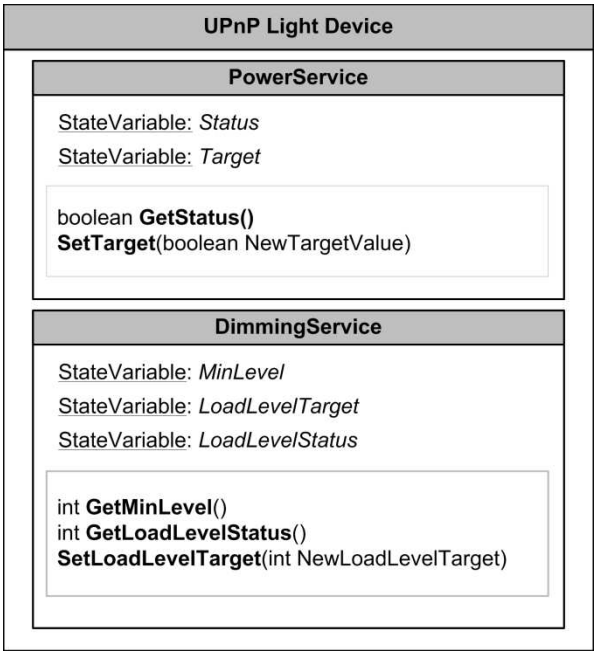


Figure 4-5. Description du produit UPnP, avec (en haut) le service de contrôle binaire et (en bas) le service du contrôle de la variation

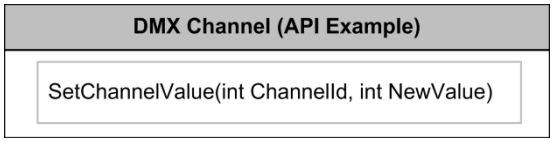


Figure 4-6. Description d'une application pour le contrôle en DMX

Cet exemple illustre le problème de divergences que nous avons vu au chapitre précédent (cf. section 3.3), particulièrement d'un point de vue conception de l'objet « lampe variée ». Sur les trois descriptions d'applications illustrées par la figure 4-4, la figure 4-5 ainsi que la figure 4-6, l'interopérabilité (par le critère d'interchangeabilité) n'est pas réalisée car :

- Les piles de communications ne sont pas interopérables (besoin d'une passerelle) ;
- Les données ne sont pas identiques : la variation s'effectue sur une plage de données allant de 0 à 255 pour les protocoles KNX et DMX, tandis qu'UPnP utilise une plage allant de 0 à 100 ;
- Le protocole DMX n'explicite pas la possibilité de commutation, nécessaire pour les protocoles KNX et UPnP ;
- Les protocoles UPnP et DMX ne spécifient pas les applications de contrôles associées aux objets contrôlables (pouvant inclure des processus spécifiques) ;
- Les différents protocoles n'intègrent pas le même processus, comme le montre la figure 4-7 , le tableau 4-3, le tableau 4-4 et le tableau 4-5.

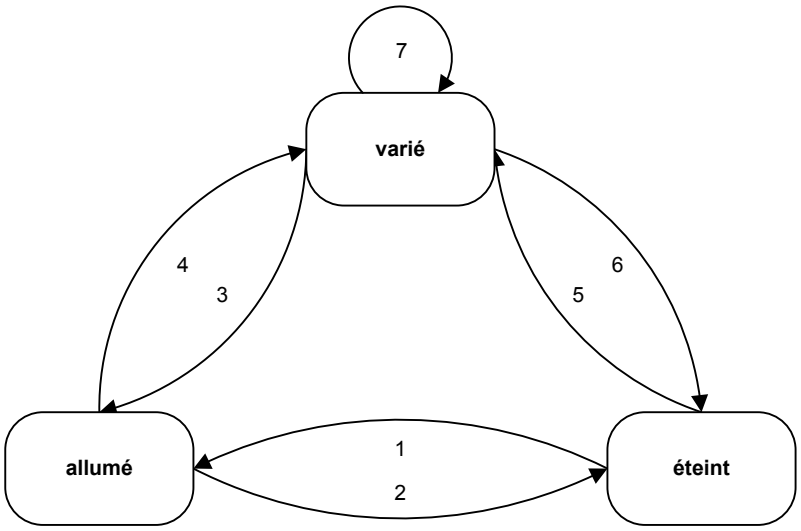


Figure 4-7. Diagramme états/transitions pour une lampe variée[31]

N° transition	Signification
1	Allumer
2	Eteindre
3	Varier au maximum
4	Diminuer l'intensité
5	Allumer partiellement
6	Varier jusqu'à extinction
7	Varier

Tableau 4-3. Nom des transitions exposées en figure 4-7

[31] Basé pour KNX sur le chapitre 7 : « *Application Descriptions – Lighting* », pour UPnP sur l'implémentation d'une lampe variée au sein du kit de développement fourni par Intel, et sur une API pour DMX.

Etat	KNX x Є $]\mathbf{0},\mathbf{255}[$	UPnP x Є $]\mathbf{0},\mathbf{100}[$	DMX x Є $]\mathbf{0},\mathbf{255}[$
Allumé	Etat binaire = 1 Etat variation = 255	PowerService::Status = true DimmingService::LoadLevelStatus = 100	255
Eteint	Etat binaire = 0 Etat variation = 0	PowerService::Status = false	0
		PowerService::Status = true DimmingService::LoadLevelStatus = 0	
Varié	Etat binaire = 1 Etat variation = x	PowerService::Status = true DimmingService::LoadLevelStatus = x	x
Avec x comme la valeur de variation. Les séparateurs de ligne indiquent une alternative.			

Tableau 4-4. Tableau des états en fonction des protocoles accompagnant la figure 4-7

N°	KNX x Є $]\mathbf{0},\mathbf{255}[$	UPnP x Є $]\mathbf{0},\mathbf{100}[$	DMX x Є $]\mathbf{0},\mathbf{255}[$
1	Allumage/extinction := 1	PowerService::SetTarget(true) DimmingService::SetLoadLevel(100)	setChannelValue(0, 255)
	Valeur variation := 255		
2	Allumage/extinction := 0	PowerService::SetTarget(false)	setChannelValue(0, 0)
	Valeur variation := 255	DimmingService::SetLoadLevel(0)	
3	Contrôle variation := up	DimmingService::SetLoadLevel(100)	setChannelValue(0, 255)
	Valeur variation := 255		
4	Contrôle variation := down	DimmingService::SetLoadLevel(x)	setChannelValue(0, x)
	Valeur variation := x		
5	Contrôle variation := up	DimmingService::SetLoadLevel(x) PowerService::SetTarget(true)	setChannelValue(0, x)
	Valeur variation := x		
	Allumage/extinction := 1 (si Etat variation précédent = x)	PowerService::SetTarget(true) (si DimmingService::LoadLevelStatus = x)	
6	Allumage/extinction := 0	PowerService::SetTarget(false)	setChannelValue(0, 0)
	Contrôle variation := down		
	Valeur variation := 0	DimmingService::SetLoadLevel(0)	
7	Valeur variation := x	DimmingService::SetLoadLevel(x)	setChannelValue(0, x)
	Contrôle variation := up		
	Contrôle variation := down		
Avec x comme la valeur de variation. Les séparateurs de ligne indiquent une alternative.			

Tableau 4-5. Tableau des commandes assurant les transitions décrites en figure 4-7

Face au nombre important de protocoles disponibles, il paraît difficile pour un développeur de services de ne pas abstraire les objets, même sur cet exemple pour lesquels les états de l'objet sont simples (propriétés perceptibles), et sont indépendants des protocoles de communication et d'application. Tels que sont définis ces protocoles, l'abstraction des objets ne peut se faire qu'au travers des données. Cependant, afin de satisfaire le critère d'interchangeabilité (cf. section 4.1.2), l'abstraction à ce niveau n'est pas suffisante, il faut également que le comportement soit abstrait, compte tenu des comportements différents.

4.2 Solutions proposées pour l'échange entre objets intelligents

Dans les domaines où la pluridisciplinarité est marquée, certaines approches se sont révélées prépondérantes pour permettre à différentes compétences de bénéficier d'un référentiel commun. Les documents de référence en général, dont certains sous la forme de normes et standard, sont très populaires dans le domaine des télécommunications et réseaux, dans les domaines des transports, dans les technologies de l'information, etc. Cependant, un document de référence nécessite la compréhension bilatérale de celui-ci.

4.2.1 Ingénierie dirigée par les modèles (IDM)

Avec l'accroissement de la complexité des systèmes informatiques, qui ont en partie conduit au paradigme de l'intelligence ambiante (cf. section 2.2.1), l'élaboration de programmes dans une démarche collaborative est devenue problématique. Le domaine de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM ou MDA) propose de tirer parti de l'utilisation des modèles en ingénierie afin d'abstraire les différentes entités d'un programme pour en faciliter l'élaboration.

Parmi les approches développées, des travaux proposent d'obtenir une partie de l'application directement à partir d'un ou plusieurs modèles exprimés dans un ou plusieurs formalismes. Ainsi, le concepteur d'un programme dispose d'outils lui permettant de formaliser les différentes entités d'un processus, sous forme de modèles, et leurs relations. Ces modèles permettent alors d'abstraire les programmes et de pouvoir les partager, afin de décrire des applications à d'autres personnes. Ces modèles peuvent également être transformés, pour générer tout ou en partie le programme.

Cette approche propose ainsi un langage commun pour décrire différentes entités. Ce langage commun peut être utilisé dans le cadre de l'interopérabilité, comme le propose Chettaoui (Chettaoui, 2008), sous le terme d'interopérabilité dirigée par les modèles, appliqué aux outils de conception et développements pour les objets mécaniques.

4.2.2 Intergiciel

Selon Wikipédia, un intergiciel (ou middleware en anglais) est « *[…] un logiciel tiers qui crée un réseau d'échange d'informations entre différentes applications informatiques. Le réseau est mis en œuvre par l'utilisation d'une même technique d'échange d'informations dans toutes les applications impliquées à l'aide de composants logiciels.* ». On dénomme également les intergiciels « *logiciel médiateur* », « *logiciel d'intermédiation* » ou « *bus logiciel* ». Ces dénominations mettent en évidence le rôle d'intermédiaire entre plusieurs autres logiciels, à un niveau donc applicatif.

Krakowia (Krakowia *et al.*, 2007) appuie cette définition, en la complétant. Il introduit ainsi l'intergiciel par ses capacités de médiation en génie logiciel (médiation entre différents composants, médiation entre interfaces propriétaires et interfaces standardisées) ainsi qu'en génie des télécommunications (médiateur entre un réseau protégé et un réseau ouvert, adaptation des contenus en fonction des clients d'application). Ainsi, selon l'auteur, un intergiciel satisfait les points suivants : «

1. *Cacher la répartition, c'est-à-dire le fait qu'une application est constituée de parties interconnectées à des emplacements géographiques répartis ;*
2. *Cacher l'hétérogénéité des composants matériels, des systèmes d'exploitation et des protocoles de communication utilisés par les différentes parties d'une application ;*
3. *Fournir des interfaces uniformes, normalisées, et de haut niveau aux équipes de développement et d'intégration, pour faciliter la construction, la réutilisation, le portage de l'interopérabilité des applications ;*
4. *Fournir un ensemble de services communs, réalisant des fonctions d'intérêt général, pour éviter la duplication des efforts et faciliter la coopération entre applications. »*

Krakowia met ainsi en évidence les notions d'abstraction et d'interopérabilité que doivent réaliser des intergiciels, dont il présente une architecture générique (figure 4-8). Ce besoin d'abstraction et d'interopérabilité s'applique alors au niveau applicatif.

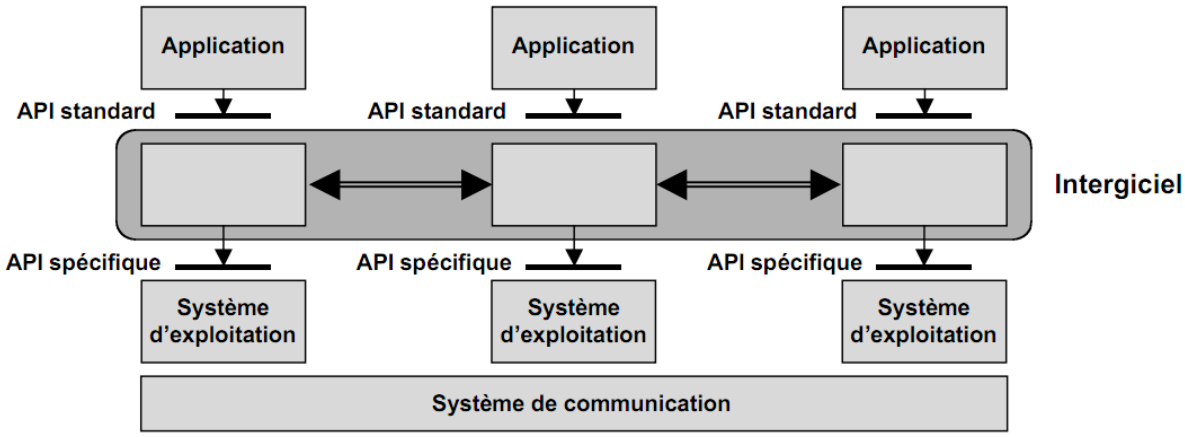


Figure 4-8. Organisation de l'intergiciel, d'après Krakowia (Krakowia, 2007)

4.2.3 Les passerelles de service

Les passerelles de services sont, dans leur rôle et leur architecture, similaires aux intergiciels. Elles assurent en effet un rôle de médiation entre, d'une part le monde extérieur (internet et son contenu), et d'autre part le monde intérieur (systèmes locaux). La figure 4-9 présente un cas de déploiement d'une telle passerelle dans le contexte de l'habitat intelligent. L'architecture se décompose en deux points :

- D'une part un « monde intérieur », à gauche de la figure 4-9, composé de systèmes locaux et d'une passerelle locale connectée à l'ensemble de ces systèmes
- D'autre part le « monde extérieur », à droite de la figure 4-9, composé d'un serveur d'administration, par lequel plusieurs fournisseurs de services peuvent proposer des applications reposant sur les services intérieurs.

Le couple passerelle/serveur assure alors le rôle de médiation propre à l'intergiciel. L'échange de bout en bout, entre un objet connecté et un service, est fédéré par la passerelle et le serveur (échange représenté par les interactions en orange sur la figure 4-9).

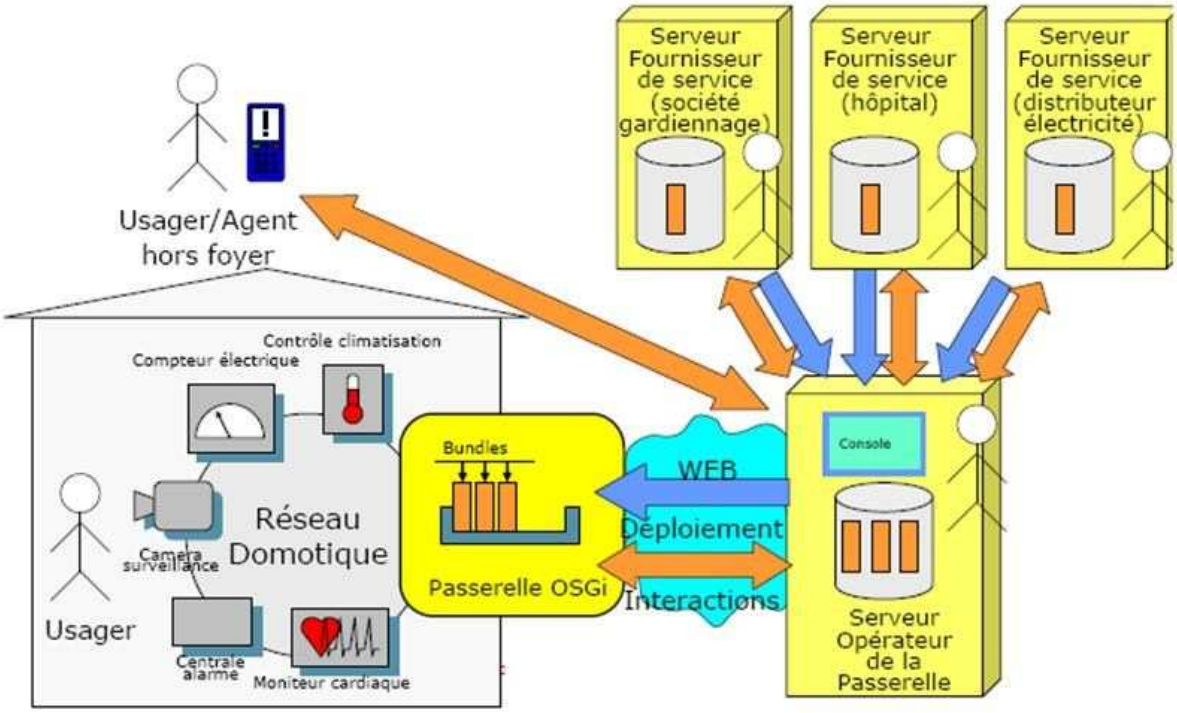


Figure 4-9. Exemple d'architecture de distribution de services (Donsez, 2007)

Ces passerelles revendiquent une propriété que n'ont pas les intergiciels : le dynamisme. En effet, cette architecture se trouve contrainte par les deux parties qu'elle fédère. Un fournisseur de service peut changer, par choix de l'habitant. Par exemple, l'habitant peut vouloir changer de fournisseur d'électricité, ce qui n'implique pas le changement de compteur électrique. Dans ce cas, l'architecture doit permettre des mises à jour, des désinstallations d'anciens services et l'installation de nouveaux. C'est alors qu'intervient le dynamisme, concrétisé par les étapes de déploiement en bleu sur la figure 4-9. Ainsi, sous l'autorité de l'opérateur de la passerelle, un fournisseur de service peut proposer des mises à jour à l'ensemble d'un parc, sous forme de composants dédiés.

Les passerelles de services permettent à des fournisseurs de services de pouvoir déployer des applications au sein d'une installation. En domotique, plusieurs travaux ont déjà été conduits en ce sens. On peut citer par exemple le projet SIRLAN (Caelen *et al.*, 2002), l'intergiciel EnTiMid (Nain *et al.*, 2009), les travaux de Donsez (Bottaro *et al.*, 2007), les travaux de Bjelica (Bjelica *et al.*, 2010) ainsi que les travaux de Bonino (Pellegrino *et al.*, 2006; Bonino *et al.*, 2008). Ces travaux expriment tous la nécessité d'un environnement dynamique ainsi que le besoin d'abstraire les données (Helal *et al.*, 2005). L'architecture classique de ces passerelles de services comporte principalement trois couches :

– une couche bas niveau, ou physique, permettant l'accès à l'information des différents réseaux dédiés en interne (accès aux compteurs intelligents, télévision connectée, réseaux domotiques...)

– une couche d'abstraction, permettant d'uniformiser les données. Cette couche permet de représenter les données issues de la couche bas niveau.

– une couche de services, ou couche externe, permettant de faire le lien avec des applications (services).

Dans leur architecture, un point apparaît de manière critique : la technique pivot utilisée au sein de la couche d'abstraction, aussi bien pour agréger différents systèmes locaux que pour agréger des systèmes locaux et distants (les services). Plusieurs propositions ont été faites. Ainsi, Bonino (Bonino *et al.*, 2008) propose une technique basée sur la sémantique, en utilisant une ontologie pour représenter les différents objets communicants qui composent un bâtiment intelligent. La solution EnTiMid, quant à elle, propose une technique basée sur un modèle schizophrénique (Nain *et al.*, 2009), où les objets ont alors plusieurs « personnalités » : leur comportement « natif », tel qu'implémenté par leur constructeur, et des comportements « services », utilisant des protocoles de plus haut niveau. Cette approche est également utilisée pour les projets ATTRACO (Meliones *et al.*, 2008) et AMETSA (Segarra *et al.*, 2003) qui utilisent le protocole *UPnP* en référentiel pour représenter, au niveau service, des produits utilisant des protocoles propriétaires. D'autres travaux (Miori *et al.*, 2006) proposent des langages spécifiques, tels que *Domonet* ou *oBIX*[32], au niveau de la couche d'abstraction.

Toutefois, ces techniques sémantiques ou schizophrènes ne permettent qu'une interopérabilité sémantique, et non comportementale. L'approche sémantique se révèle un atout majeur par son accessibilité, présentant le produit de manière courante et descriptive. Cependant, elle a pour limitation de ne décrire que l'interface de l'objet, et non son comportement. Son efficacité est alors liée à l'interprétation que l'on fait de l'interface. Or, les applications embarquant une forte expertise métier, tels que dans le domaine de la régulation thermique, nécessitent une connaissance du domaine. Dans l'exemple fil rouge, nous avons décrit les différences de comportement de nature protocolaire qu'il pouvait exister entre des objets identiques. Notre proposition consiste alors à utiliser une technique pivot comportant un référentiel comportemental des objets, tel que KNX.

4.3 Proposition d'architecture pour l'interopérabilité applicative

4.3.1 Méthodologie et démarche

Nous avons proposé précédemment (cf. section 4.1.2) un critère d'interopérabilité : l'interchangeabilité. Ce critère nous permet d'intégrer l'interopérabilité aux différentes couches qui composent un objet intelligent : les couches de communication ainsi que les couches d'application. L'exemple fil rouge nous a permis d'illustrer l'intérêt de ce critère.

Pour adresser le problème d'interopérabilité, nous avons vu trois approches : l'ingénierie dirigée par les modèles, les intergiciels ainsi que les passerelles de service. Notre méthodologie consiste à s'appuyer sur ces trois approches. En effet, les passerelles de services, déclinées des intergiciels, ont une architecture adéquate au dynamisme de l'habitat. Elles permettent de réaliser une médiation non seulement entre objets, mais également entre objets et services.

[32] Open Building Information Exchange, www.obix.org.

Afin que cette médiation puisse satisfaire le critère d'interchangeabilité, nous proposons l'utilisation de modèles au sein de la couche d'abstraction. Ces modèles doivent représenter la connaissance experte de l'objet (types de données, comportement, etc.) et doivent également représenter cette connaissance experte de manière simplifiée pour permettre un développement efficace de services transverses.

4.3.2 Le langage pivot : KNX

KNX est un bus de terrain conçu pour rendre communicantes les installations électriques d'un bâti. La norme (CENELEC EN 50090 et CEN EN 13321-1, ISO/IEC 14543-3, GB/Z 20965, ANSI/ASHRAE 135) est maintenue par l'association KNX (KNX Association, 2003), regroupant plus de 200 membres. Elle est issue d'une fusion entre le protocole EIB[33], le protocole BâtiBus[34] ainsi que le protocole EHS[35]. Par la suite, les spécifications ont peu à peu évolué pour rendre interopérable des solutions standard, comme le protocole M-Bus[36], ainsi que des solutions propriétaires comme OpenTherm[37]. Aujourd'hui, la norme est utilisée par un grand nombre de produits, et offre un modèle d'échange commun sur plusieurs supports physiques, tels que la paire torsadée (deux spécifications : TP0 et TP1), le courant porteur (deux spécifications : PL110 et PL132), la radio et l'infrarouge. Elle offre également la possibilité de transporter les données en utilisant le protocole IP, sans considérations concernant les couches inférieures (Ethernet, wifi, etc.). La figure 4-10 présente l'architecture globale du protocole telle qu'elle est aujourd'hui.

L'architecture KNX définit un modèle à intelligence répartie. Chaque produit contient une ou plusieurs applications. Ces applications exposent chacune un certain nombre de variables. Dans la terminologie KNX, on appelle ces variables « objets de groupe ». Ces objets communicants sont reliés entre eux par une adresse, dite « adresse de groupe », permettant d'établir un échange de nature multicast, entre variables de même type. Ce type est défini par une sémantique, et seuls les objets de sémantiques complémentaires peuvent être associés. Lorsqu'un événement provoque le changement d'une valeur d'un objet, cette nouvelle valeur est alors propagée aux autres objets. Il est également possible d'interroger la valeur d'un objet via un mécanisme de lecture.

[33] European Installation Bus, protocole crée par les sociétés Berker, Gira, Jung, Merten and Siemens AG, utilisant un support filaire type bus.

[34] Protocole ouvert crée par la société Merlin Gerin, utilisant un support filaire type bus.

[35] European Home System, protocole crée et maintenu par l'association EHSA, utilisant un support sur courant porteur.

[36] http://www.m-bus.com

[37] http://www.opentherm.eu

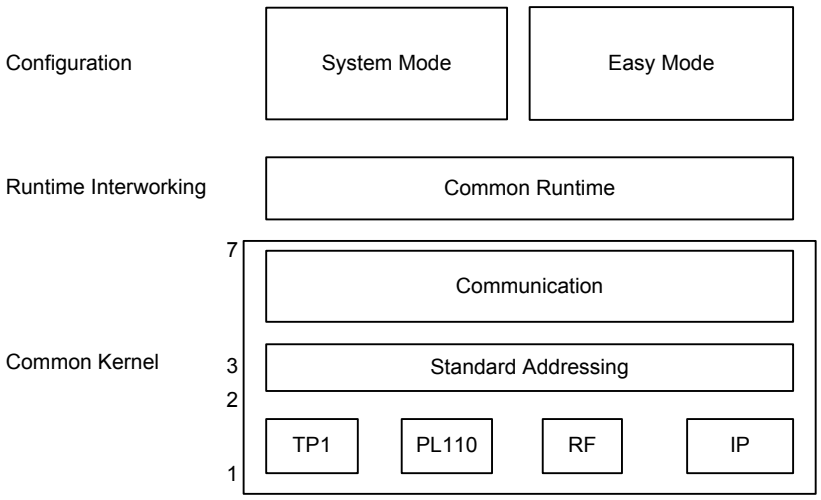


Figure 4-10. Architecture du protocole KNX[38]

Tel que KNX est défini dans la norme, deux couches réalisent l'interopérabilité entre produits. Une couche d'interopérabilité (« *Runtime Interworking* » sur la figure 4-10), qui sert de brique applicative, ainsi qu'une couche de communication (« *Common Kernel* » sur la figure 4-10), qui permet d'échanger des données entre les applications indépendamment du média physique utilisé. Cette couche de communication est ainsi constituée de trois trames communes à l'ensemble des produits KNX : une trame d'écriture de valeur sur une adresse de groupe (*groupValueWrite*), une trame de lecture sur une adresse de groupe (*groupValueRead*), ainsi qu'une trame de réponse à une trame de lecture (*groupValueReadResp*). Ces trames permettent d'échanger des données entre les différents objets de groupe propres à chaque application (*datapoints*). Les données échangées doivent respecter un format correspondant à l'objet de groupe servi.

La couche applicative est constituée de blocs fonctionnels. Comme le montre la figure 4-11, ces blocs, décrits dans la norme, peuvent être assemblés afin de constituer un modèle d'application, appartenant à un domaine d'application. Ils spécifient les objets de communication nécessaires pour réaliser une fonction et définissent le comportement de la fonction, ainsi que ses paramètres. Cette standardisation permet d'assurer un comportement uniforme entre applications, tout en permettant l'extension de ces applications.

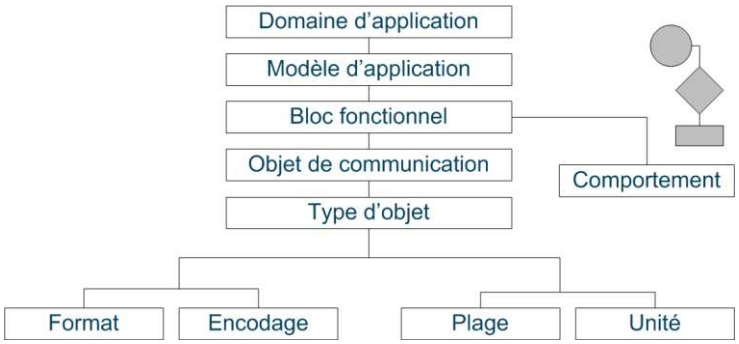


Figure 4-11. Modèle commun du protocole KNX[39]

[38] Avec l'aimable autorisation de l'association KNX
[39] Avec l'aimable autorisation de l'association KNX

4.3.2.1 Modèle d'application

Les modèles d'applications, présentés dans la figure 4-11, sont décrits par la norme KNX (KNX Association, 2002) de manière graphique, en suivant les conventions détaillées en figure 4-12. Cette représentation fait intervenir différents éléments présentés précédemment (figure 4-11) :

- Un nom unique pour l'application, qui, par convention, utilise le préfixe « **CH_** » ;
- Des objets de communication en entrée, situés sur la partie gauche de la représentation graphique
- Des objets de communication en sortie, situés sur la partie droite de la représentation graphique
- Une liste de paramètres, situés sous les objets de communication en entrée.

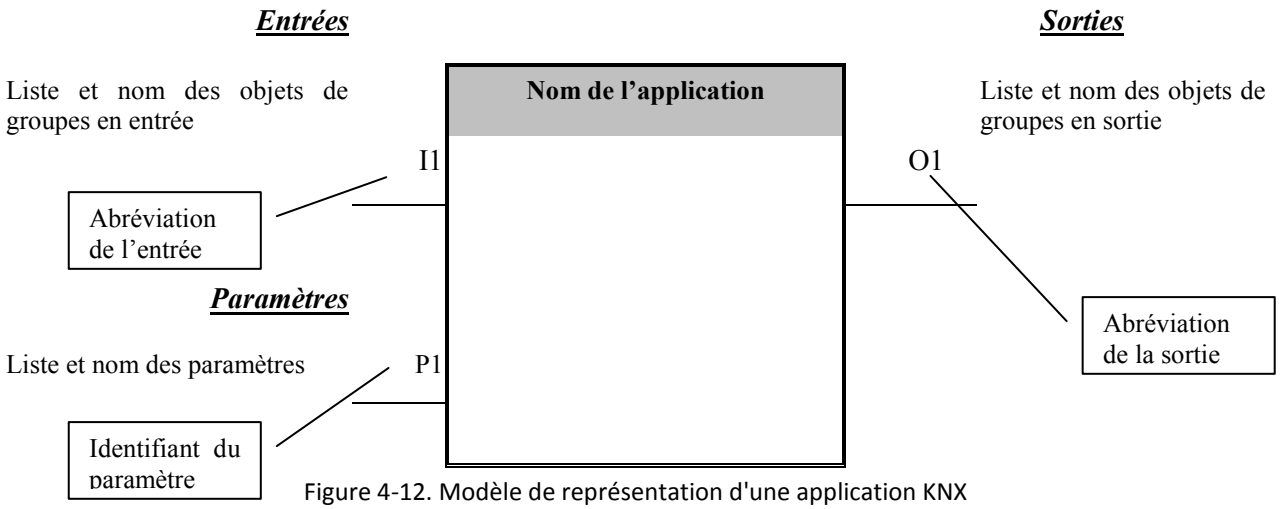


Figure 4-12. Modèle de représentation d'une application KNX

4.3.2.2 Bloc fonctionnel

Les blocs fonctionnels sont, dans KNX, internes à l'application. Ils correspondent à des briques d'applications et ils peuvent alors être composés pour former une application telle que décrite dans le paragraphe précédent (figure 4-12). Ainsi, les blocs fonctionnels sont très similaires aux applications, et en utilisent une représentation proche, présentée en figure 4-13. Ces briques d'applications définissent et décrivent le comportement de l'objet, ainsi que les types de données qui lui sont associés. Dans le cas de l'exemple fil rouge, le bloc fonctionnel de variation, propre à l'application, est ainsi décrit dans la norme par un diagramme de transition à états, des tables décrivant les données, ainsi que des directives ou recommandations quant au processus de variation (« fading-time », mécanismes de forçage, comportement au redémarrage de l'application, etc.).

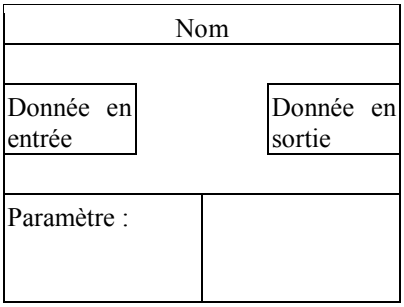


Figure 4-13. Modèle de représentation d'un bloc fonctionnel KNX

La différence majeure de la représentation se situe dans le fond gris de la partie supérieure ainsi que le cadre utilisant une simple ligne. Par convention, le nom de ces blocs fonctionnels utilise le préfixe « **FB_** ». Le protocole KNX consacre un chapitre important à la description de ces blocs fonctionnels (KNX Association, 2000a).

4.3.2.3 Données

Les blocs fonctionnels présentés ci-dessus, composant les applications, représentent des fonctions, et exposent alors les variables représentatives de ces fonctions. La figure 4-11 mentionne ces données sous le terme d'« objet de communication ». Ainsi, les trois types de données (entrée, paramètre, sortie) sont décrits par un format, un encodage, une unité, et une plage (KNX Association, 2010). Un type de donnée est décrit en figure 4-14. Ce type de donnée correspond à l'objet de groupe « contrôle de variation », illustré à l'exemple fil rouge en figure 4-4. Cet objet de groupe permet de contrôler une variation de manière relative : plus, ou moins.

Format:	4 bit: B_1U_3						
octet nr	1						
field names					c	Step-Code	
encoding					B	U	U	U
Range:	c = {0,1} StepCode = [000b…111b]						
Unit:	none						
Resol.:	(not applicable)						
PDT:	PDT_GENERIC_01						

Datapoint Types		
ID:	Name:	Use:
3.007	DPT_Control_Dimming	FB

Data fields	Description	Encoding
c	Increase or decrease the brightness.	See 1.007 0 = Decrease 1 = Increase
StepCode	The amount of intervals into which the range of 0 % … 100 % is subdivided, or the break indication.	- 001b…111b:Step Number of intervals = $2^{\wedge(stepcode-1)}$ - 000b: Break

Figure 4-14. Spécification du type de donné "Contrôle de variation"[40]

En plus des spécifications de données, un code sémantique lui est fourni (les abréviations pour les entrées et sorties mentionnées à la figure 4-12). Cette abréviation permet d'associer un rôle aux données vis-à-vis de l'application. Par exemple, une application de régulation de chauffage peut recevoir plusieurs températures provenant de sondes délocalisées : température de sol, température de l'air, température extérieure. Ces codes sémantiques permettent alors de faire la distinction entre ces trois données. Les codes les plus courants sont présentés dans le tableau 4-6 ci-après.

Ces codes sémantiques sont notamment utilisés pour associer plusieurs applications entre elles, lors des étapes de configuration liées aux rôles d'installateurs et/ou d'intégrateurs (définis dans la section 3.2.2.2). Une association entre deux objets est ainsi automatisable en associant chacun des points de données ayant la même sémantique. Dans l'exemple fil rouge (section 4.1.3), le lien entre l'interrupteur et l'actionneur de la lampe (figure 4-4) peut ainsi se faire en créant un lien entre chacune des données d'entrée ou de sorties ayant le même code.

[40] Avec l'aimable autorisation de KNX

Identifiant	Nom	Abréviation	Format de donnée	Commentaire
1	CC_Switch_OnOff	OO	1.x	Commande On/Off
2	CC_Switch_OnOff_Status	IOO	1.x	Retour d'état On/Off
5	CC_Dimming_Ctrl	DC	3.x	Contrôle de variation (plus, moins, stop)
6	CC_Dimming_Value	DV	5.x	Valeur absolue de variation
11	CC_Move_UpDown	MUD	1.x	Commande Monter/Descendre
13	CC_Move_UpDown_Status	IMUD	1.x	Retour d'état sur la montée/descente

Tableau 4-6. Codes sémantiques associés aux objets de groupe

4.3.3 Architecture

Notre proposition consiste à utiliser le langage KNX comme langage pivot d'une passerelle de service. Dans une telle architecture, la couche d'abstraction se base sur une virtualisation du protocole KNX (Kastner *et al.*, 2002), permettant à la fois le routage de données entre piles de communication dans un format identique, et le routage de données vers des applications virtuelles (alors composées selon le modèle décrit dans la figure 4-11). Enfin, les applications virtuelles intègrent un second mode de communication pour échanger des données de haut niveau (ressources) à des services, via un système de messagerie (ou bus applicatif) pouvant être étendu à une ou plusieurs implémentations. Cette architecture est illustrée en figure 4-15, avec en bas les systèmes physiques, au centre la passerelle de service et au-dessus les services. La virtualisation du protocole KNX dans ce cadre est issue des travaux menés au sein du projet européen SIRLAN (Matinal, 2000; Caelen *et al.*, 2002).

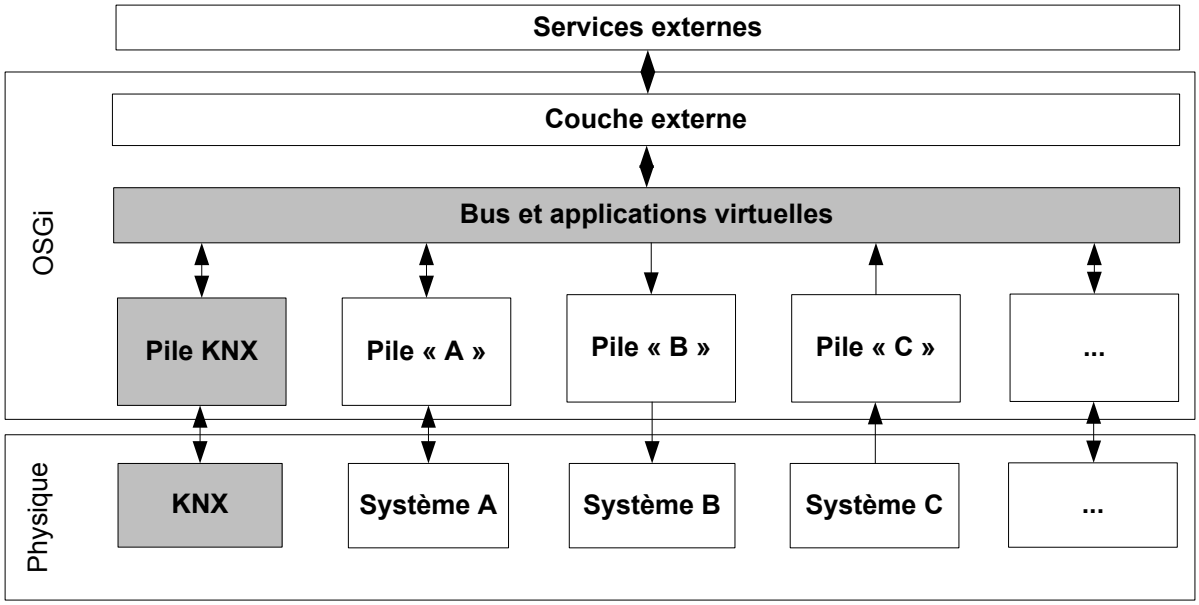


Figure 4-15. Architecture globale de l'intergiciel proposé. Les couches grisées sont les couches conformes à la norme KNX

Ce modèle permet de tirer avantage du protocole KNX au niveau réseau, dans lequel on simplifie le travail de pont par l'utilisation d'un nombre très restreint de trames. Ce travail est également facilité par le mode d'échange propre à KNX, qui permet la communication de manière maître/esclave ou répartie, dont les modes multicast et unicast. Cette architecture permet surtout d'associer à chaque protocole un modèle applicatif commun, modèle dont le comportement est normalisé. Ainsi, les ressources transmises par ces applications peuvent répondre à un comportement uniforme, indépendamment du protocole source.

4.3.3.1 Modèles d'application virtuels

Les modèles d'application virtuelles ont le rôle de pivot au sein de cette architecture. Ils permettent en effet d'intégrer un processus métier ainsi qu'une interface de programmation à destination des développeurs de service. En ce sens, ils doivent disposer de deux moyens de communication :

- Une communication interprocessus (Objet à Objets), pour échanger des données avec d'autres objets
- Une communication processus/service (Objet à Services), pour pouvoir communiquer de manière bidirectionnelle avec le monde extérieur.

La figure 4-16 représente l'interface d'une telle application virtuelle (*VirtualChannel*), comprenant les méthodes relatives aux trames du protocole KNX. La communication de plus haut niveau s'effectue par un système de messageries, à l'instar des bus d'entreprises utilisés au sein des intergiciels, via les interfaces *MessagesInput* pour la réception de données et *MessagesOutput* pour la notification d'événements.

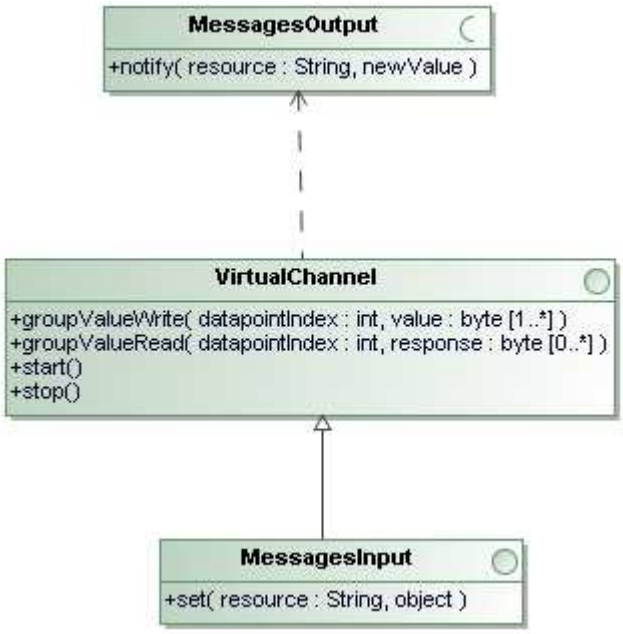


Figure 4-16. Représentation UML de l'interface d'une application virtuelle

4.3.3.2 Modèles de transformation

Les modèles de transformation réalisent l'interopérabilité sur un critère d'interchangeabilité. Dans ce contexte, ils exposent donc des objets physiques, propres à un système particulier, dans le mode d'échange, le format de données ainsi que le comportement de l'objet équivalent KNX. Ainsi, ils sont très dépendants du protocole source, mais doivent se conformer à l'interface décrite en figure 4-17 qui correspond aux trames constituant le protocole KNX. Le modèle peut, par cette interface, envoyer des données sur le bus virtuel, et en recevoir, en fonction de leur adressage. Ces données seront échangées avec l'ensemble des applications concernées, qu'elles soient physiques ou virtuelles.

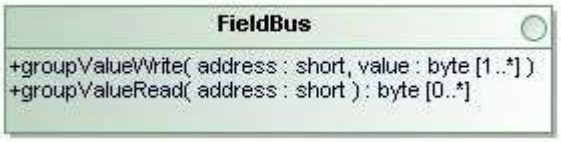


Figure 4-17. Interface UML décrivant la couche de communication du langage KNX.

4.4 Illustration de l'approche

Le modèle proposé s'applique à l'exemple fil rouge de la manière suivante :

– L'objet lampe variée physique est en premier lieu associé à son application la plus proche (sur les critères disponibles : sémantique, comportement, etc.). Dans notre cas, cette application est définie sous le nom « CH_Dimming_Actuator_Basic » (représentée en partie supérieure de la figure 4-4) dans la norme (KNX Association, 2003).

– L'application virtuelle homologue, correspondant à un interrupteur (représentée sur la partie inférieure de la figure 4-4), sera alors implémentée et configurée sur les objets de communication ayant la même sémantique. Cette application doit permettre de recevoir les événements émis par l'objet physique, et également de piloter celui-ci. L'application exposera également une variable d'état, de manière événementielle, à laquelle des services pourront s'abonner. Ces mêmes services pourront également piloter l'objet, par l'intermédiaire d'un point d'entrée sous la forme d'une variable « commande ».

– Si l'objet physique est sur un protocole différent, il est alors obligatoire de transformer les données, et au besoin de corréler celles-ci pour obtenir un comportement identique. Cela correspond dans la plupart des cas à reproduire au sein de la partie protocolaire l'application de manière schizophrénique, avec d'une part la personnalité KNX, et d'autre part la personnalité propre de l'objet physique.

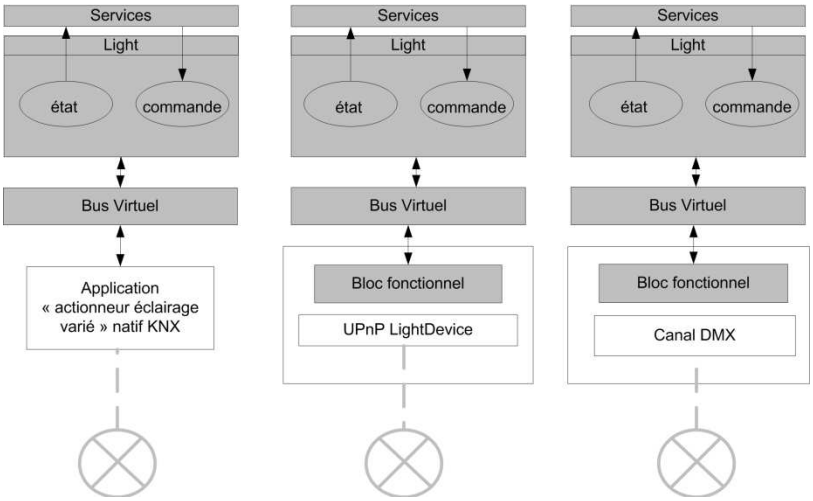


Figure 4-18. Illustration du modèle appliqué à l'exemple fil rouge, avec de gauche à droite le protocole KNX, le protocole UPnP et le protocole DMX. Les parties grisées sont interopérables.

La figure 4-18 montre l'instanciation du modèle propre à l'exemple :

– À gauche se trouve le modèle appliqué au protocole KNX où la lampe, située en bas, est nativement associée à l'application KNX. Son intégration au sein de l'environnement virtuel est alors naturelle, et la communication avec l'application virtuelle représentant l'objet « *Light* » ne requiert aucune manipulation. La couche service (en haut de la figure 4-18) peut alors être notifiée de l'état de l'objet et peut le commander.

– Au centre de la figure 4-18, se trouve le modèle appliqué pour le protocole UPnP. La lampe est alors accessible via un produit « *UPnPLightDevice* », exposant les services « *PowerDevice* » concernant l'état binaire de la lampe et « *DimmingDevice* » concernant la charge de variation de la lampe (illustrés figure 4-5). Ces deux variables d'état sont accessibles par un mécanisme d'abonnement aux notifications d'événements. Ce produit est encapsulé dans une application virtuelle ayant pour rôle de corréler, par fusion de données, ces deux variables et de les inclure au sein de l'environnement virtuel au format adéquat.

– À droite se trouve le modèle appliqué au protocole DMX (détaillé figure 4-6). De manière identique au cas précédent, l'aspect comportemental est ajouté au sein de la couche protocolaire pour obtenir, par fission de données, la variable d'état.

Ainsi, un utilisateur au niveau de la couche service peut accéder aux instances des applications virtuelles « Light » de manière indépendante du protocole utilisé. Dans l'introduction de l'exemple fil rouge, nous avons évoqué un service de visualisation et de contrôle distant. Un tel service est également présenté en figure 4-9, où l'accès distant utilise une architecture passerelle/serveur. Le modèle d'application, dans ce cas, expose deux ressources qui peuvent être accessibles par l'interface logicielle présentée en figure 4-16. Cette interface logicielle peut être implémentée librement dans le but d'acquérir l'état des lampes ainsi que de les commander.

Les comportements des objets physiques vis-à-vis des échanges de l'utilisateur avec la couche service seront identiques, réalisant ainsi une interopérabilité verticale. Dans le cas où un objet physique est configuré pour interagir avec l'un des trois objets physiques, le bus virtuel aura un rôle de pont. Ainsi, de par l'implémentation des blocs fonctionnels en apport des piles protocolaires, on obtient une interopérabilité horizontale entre objets physiques.

4.5 Synthèse

Nous avons, dans ce chapitre, décrit un cadre d'interopérabilité dans le contexte de l'habitat intelligent. Ce cadre est nécessaire de par l'hétérogénéité des objets intelligents qui composent un tel habitat. Ce cadre s'appuie sur des modèles d'objet, modèles qui définissent les données exposées par les objets ainsi que leur comportement, satisfaisant ainsi le critère d'interchangeabilité. L'adaptation du modèle à l'objet physique est réalisée par des modèles de transformation. Ainsi, deux objets physiques hétérogènes peuvent communiquer de manière homogène.

L'interopérabilité entre objets n'est pas suffisante dans le contexte de l'habitat intelligent. En effet, les critères de définition d'une maison intelligente évoqués au début des années 1990 par Sakamura (cf. section 2.3.1.1) évoquent le besoin pour les objets de communiquer également vers l'extérieur, et vice-versa. Ainsi, les notions d'intergiciels et de passerelles de services sont sollicitées pour leur rôle de médiation. Cette communication interne/externe est confrontée à un problème : la compréhension de processus complexes par des développeurs de services. En effet, l'habitat intelligent a une vocation pluridisciplinaire, et les développeurs de service n'ont pas nécessairement la connaissance experte propre au dialogue entre objets. L'abstraction dans ce contexte apporte plus que la généralisation : la simplification, sans pour autant dégrader l'échange entre processus.

Nous n'avons illustré qu'un type d'objet dans ce chapitre : une lampe variée. Cependant, la généricité de la proposition présentée dans ce chapitre ne peut s'estimer que par la mise en application. Nous proposons dans le chapitre suivant une telle mise en application à l'ensemble des objets qui peuvent composer un habitat

5 Cas d'application : l'appartement Domus

Face aux problématiques liées à la nature particulière de l'habitat et la diversité des objets qui le composent (cf. chapitres 2 et 3), la validation du cadre d'interopérabilité exposé au chapitre précédent passe par une intégration à l'échelle. Nous avons donc utilisé une structure expérimentale pour implanter et instrumenter un appartement intelligent : l'appartement Domus.

L'appartement Domus est un espace de recherche destiné à l'étude des usages au sein de l'habitat intelligent. L'objectif, lors de la construction de Domus, était de disposer d'un appartement intelligent, au sens de Sakamura (cf. section 2.3.1.1), intégré dans un environnement propice à l'expérimentation orientée usage. Le cahier des charges peut se résumer ainsi : Domus doit être un appartement réaliste, aussi bien au niveau de la configuration des pièces, du mobilier que de l'équipement. Il doit être complètement adaptable pour pouvoir modifier aisément le comportement de l'équipement ou intégrer de nouveaux équipements. Enfin, l'appartement doit disposer d'une instrumentation permettant de fournir un ensemble de données sur l'usage avec le même niveau de qualité et de complétude qu'un laboratoire d'utilisabilité.

Le processus de conception de l'appartement a fait appel à l'ensemble de ses futurs utilisateurs, en incluant chercheurs, ingénieurs, industriels, mais aussi les utilisateurs considérés comme des habitants occasionnels. Ce processus a débuté par un ensemble de séances de conception participative (Caelen *et al.*, 2005), qui ont permis à l'appartement d'évoluer en fonction des besoins des projets.

Le cadre que nous proposons a été appliqué à la gestion des objets dans l'appartement de 40m². Ce cas d'application permet d'illustrer en particulier l'instrumentation d'un ou plusieurs objets intelligents utilisant des protocoles différents. Cette instrumentation a permis le développement de fonctionnalités transversales qui serviront d'exemple. Enfin, le cadre a également permis de développer des applicatifs de plus haut niveau, applicatifs que nous décrirons.

« *Home Sweet Home* »

5.1 Présentation de l'appartement intelligent Domus

L'équipe de recherche MultiCom[41] du laboratoire LIG[42] s'intéresse à la conception et à l'évaluation de systèmes interactifs. Dans ce cadre, et afin de répondre à ses besoins récurrents en expérimentations, l'équipe a construit une plateforme destinée à la mise en œuvre et à l'évaluation, orientée utilisabilité et usage, d'un large spectre de systèmes interactifs (Jambon *et al.*, 2010a). Cette plateforme a pour point de départ une initiative du ministère de la recherche en 2003 concernant la mise en place d'un ensemble de plateformes usage dans la communauté académique. À cette initiative nationale s'est ajoutée l'initiative locale de construction du « Centre des Technologies du Logiciel », bâtiment destiné à faciliter l'interaction entre les mondes de la recherche et de l'industrie. Cette seconde initiative a permis l'installation de la plateforme dans un espace de 200 m^2 aménageable.

5.1.1 La plateforme expérimentale LIG/MultiCom

La plateforme est utilisée comme support aux expérimentations réalisées par l'équipe elle-même ou en collaboration avec d'autres équipes de recherche, qu'elles soient originaires du laboratoire LIG ou non. La plateforme, de par sa modularité, est également utilisée pour des projets industriels via la filiale de transfert industriel de l'Université Joseph Fourier : Floralis. Cette plateforme fait partie du « Réseau des plateformes des usages »[43] soutenu par l'Association Francophone d'Interaction Homme-Machine[44], laquelle fédère l'ensemble des plateformes d'usage de la communauté académique française.

Actuellement, comme l'illustre la figure 5-1, la plateforme est constituée de six espaces. Un premier espace central, donnant sur l'entrée de la plateforme, a pour rôle principal l'accueil des sujets et des visiteurs (accueil des participants). À partir de cet espace, il est possible d'accéder directement à tous les autres espaces de la plateforme. Un espace est notamment réservé pour les démonstrations des nouveaux dispositifs d'interaction réalisés par l'équipe (espace démos). L'espace d'expérimentation lui-même est constitué de trois pièces : une salle d'expérimentation, un plateau d'expérimentation, et une régie destinée à recueillir les flux d'informations en provenance des deux autres espaces d'expérimentation. Le plateau constitue un espace modulaire de simulation d'environnements interactifs. Il permet l'aménagement d'expérimentations nécessitant une surface importante. La plateforme a, par exemple, été utilisée pour évaluer de nouveaux dispositifs de médiation avec les visiteurs. Pour cela, trois salles d'un Muséum ont été reconstituées de manière réaliste sur la plateforme, en utilisant les véritables collections d'un musée. Actuellement, la plateforme est utilisée en partie (2/5èmes) pour l'appartement Domus.

[41] http://multicom.imag.fr/recherche
[42] http://www.liglab.fr
[43] http://plateformes-usages.imag.fr (visité le 19/10/2011)
[44] http://afihm.org (visité le 19/10/2011)

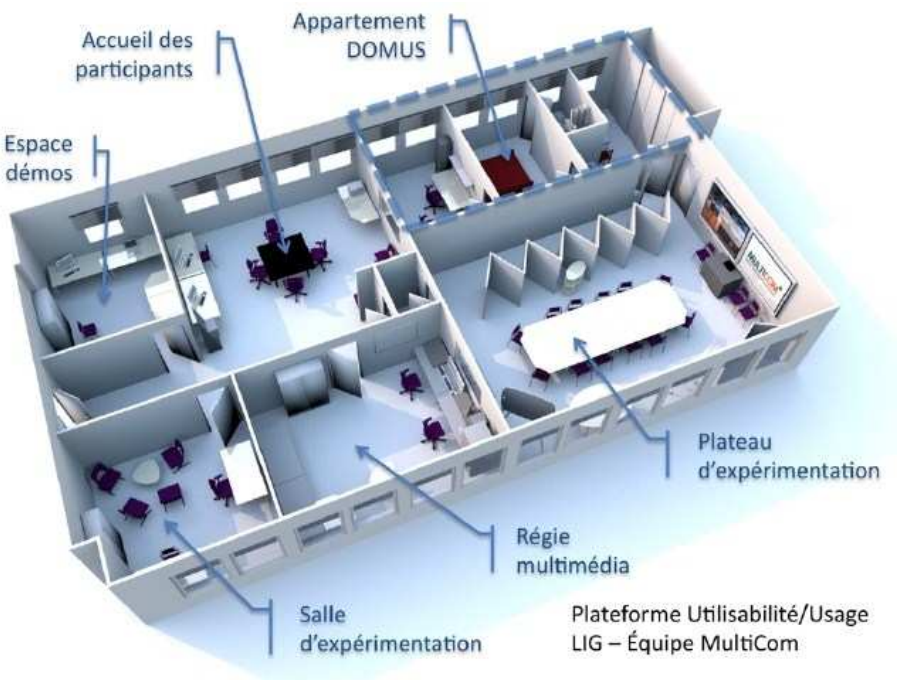


Figure 5-1. Illustration 3D de la plateforme MultiCom

5.1.2 L'appartement Domus

L'appartement Domus[45] a été construit dans le cadre de l'institut Carnot LSI[46]. Il s'agit du prototype d'un appartement intelligent de 40 m², illustré en figure 5-2, figure 5-3 et figure 5-4. Cet appartement est composé de 3 pièces principales : (1) un espace cuisine, servant de lieu d'entrée comprenant un « coin repas » et une kitchenette, (2) une chambre avec salle de bains et (3) un bureau. Il est situé au sein de la plate-forme expérimentale MultiCom (Caelen, 1999; Jambon *et al.*, 2010b) détaillée ci-dessus, et dispose ainsi de ses outils expérimentaux.

Chacune des pièces a été équipée avec du mobilier standard, ainsi que des équipements habituels (luminaires, équipement de cuisine, multimédia, etc.), afin d'en faire un appartement fonctionnel et habitable, au plus proche de la réalité. La kitchenette, par exemple, est pourvue d'espaces de rangements, de plaques de cuissons, d'un évier, d'un réfrigérateur et des ustensiles de cuisine. La chambre dispose d'un lit ainsi que d'espaces de rangements (figure 5-3).

[45] http://domus.imag.fr
[46] http://www.carnot-lsi.com

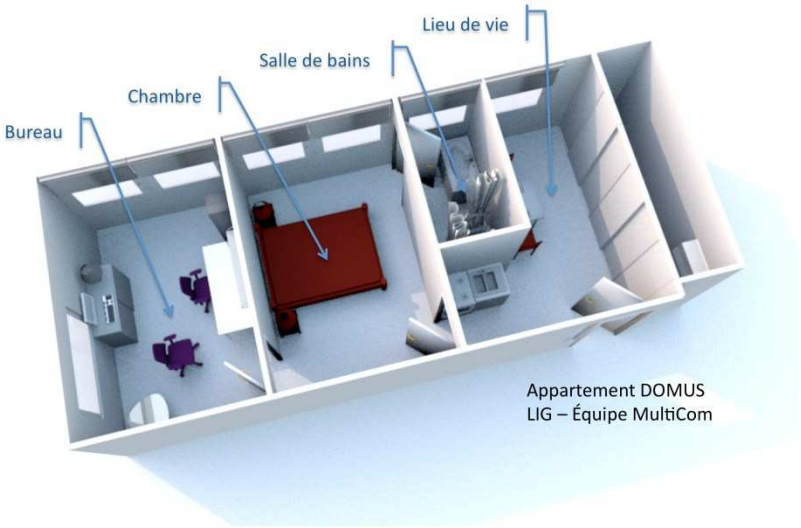


Figure 5-2. Illustration 3D de l'appartement Domus

Figure 5-3. Photos de l'aménagement de l'appartement, avec en haut à gauche l'espace cuisine, en haut à droite la chambre, en bas à gauche le bureau et en bas à droite la salle de bains

En plus de l'aménagement mobilier, l'appartement dispose des réseaux techniques standards : eau, ventilation et électricité. Les réseaux d'eau (eau froide et eau chaude) sont fournis par le bâtiment, la ventilation (double flux) est quant à elle autonome, équipée d'un by-pass pour pouvoir optimiser ses paramètres. Le réseau électrique est spécifique aux architectures domotiques, où la distribution et la gestion des différents objets sont assurées par différents actionneurs situés dans le tableau électrique.

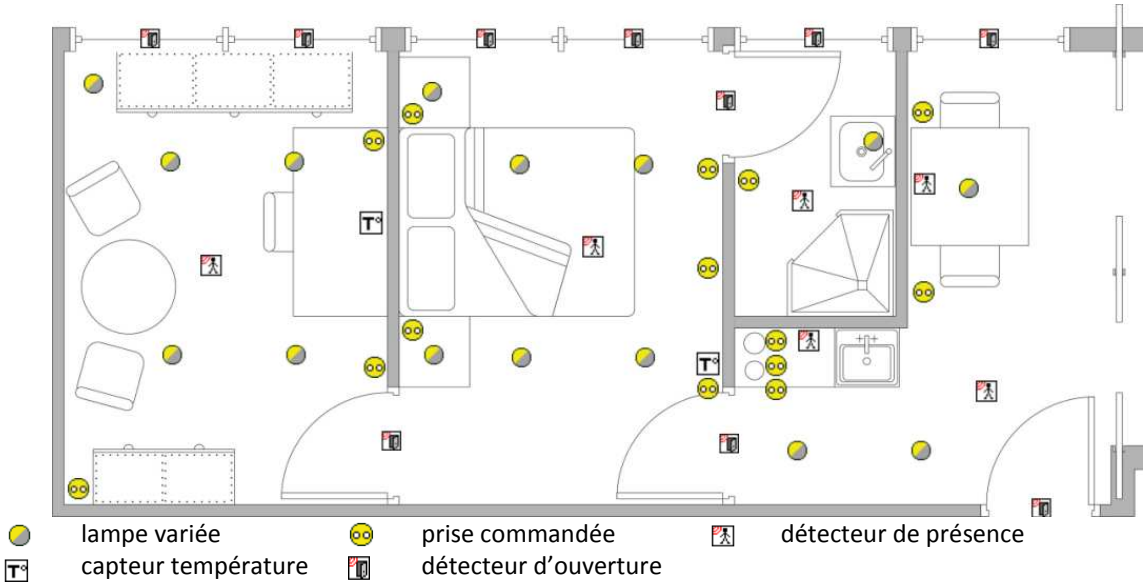


Figure 5-4. Plan partiel d'implantation de capteurs et effecteurs équipant l'appartement Domus

C'est dans ce contexte que nous avons équipé l'appartement avec des objets intelligents, dont la figure 5-4 montre une implantation partielle. Le système d'interopérabilité décrit au chapitre précédent permet de fédérer toutes les technologies présentes au sein de l'appartement.

C'est pourquoi Domus a été équipée, au fil des projets, avec les technologies suivantes :

– KNX pour les réseaux domotiques (éclairage, volets roulants, interrupteurs, capteurs température, luminosité…),

– X2D pour des détecteurs d'ouverture sans fil (portes, fenêtres et placards),

– UPnP/DLNA pour les loisirs numériques (téléviseur, diffusion sonore type multizones),

– RFID pour les interactions tangibles,

– DMX512 pour l'éclairage d'ambiance,

– ZigBee « Green Power » pour des mesures énergétiques localisées.

La figure 5-5 illustre la diversité des technologies et des services présents à Domus. Une description accompagnée de plans d'implantations des objets présents dans l'appartement Domus est fournie en annexes (Chapitre 9).

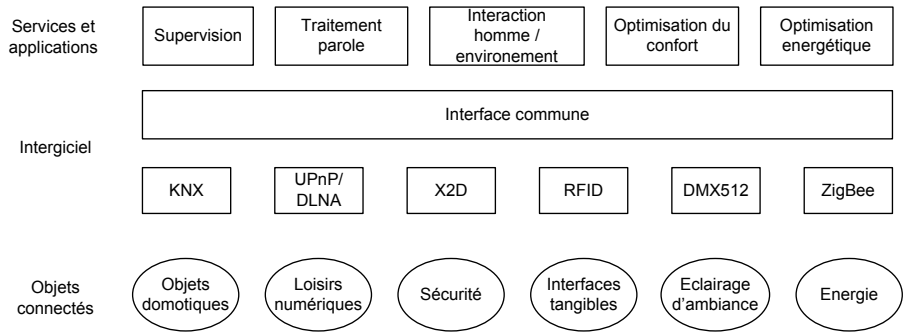


Figure 5-5. Architecture logicielle de l'appartement intelligent (application de la figure 4-15)

5.1.3 Instrumentation d'observation

Comme nous l'avons indiqué, la raison d'être de l'appartement Domus est de fournir un environnement propice à l'évaluation des usages dans l'habitat intelligent. Pour remplir son objectif, Domus doit à la fois être construit comme un habitat réaliste et inclure des instruments nécessaires à l'observation de l'activité des habitants au sein de l'appartement. Cette observation repose sur deux approches différentes.

En premier lieu, l'appartement dispose d'un système « classique » d'observation basé sur six caméras IP haute résolution avec microphones intégrés. Situées au plafond, pour plus de discrétion, ces caméras permettent d'observer l'activité des occupants (figure 5-6). Elles sont utilisées principalement lors des phases de mise au point et lors des expérimentations de courte durée. Elles permettent également d'avoir un retour audio-vidéo lors des expérimentations utilisant la technique du Magicien d'Oz. Pour préserver la vie privée des habitants, les caméras ne sont pas utilisées lors des expérimentations de longue durée incluant une nuit. Nous n'avons pas installé de caméra dans la salle de bain, et les angles de prise de vue des autres caméras ne permettent pas d'observer cette partie de l'appartement. De plus, un système permet de les couper électriquement via un interrupteur général avec voyant de contrôle visible par le sujet. Une régie de contrôle numérique (« régie multimédia » sur la figure 5-1) permet de gérer les caméras et les enregistrements (figure 5-6).

En second lieu, un système de traces numériques permet de capturer l'ensemble des événements induits par les commandes des systèmes de l'appartement, qu'ils aient pour origine les actions de l'utilisateur (par exemple : l'action sur un bouton), ou les décisions des systèmes intégrés à l'appartement (par exemple : le changement d'ambiance lumineuse à l'initiative du contrôleur de confort). Tous ces événements, représentant l'évolution de l'état de l'appartement, sont capturés. Ce système de traces se base sur l'architecture logicielle d'interopérabilité de l'appartement décrite dans la section 4.3.3. En conséquence, l'ajout d'un dispositif à l'appartement implique nécessairement que les traces associées à celui-ci seront automatiquement capturées. Ce système de traces est à la base des travaux en cours sur l'analyse de l'activité.

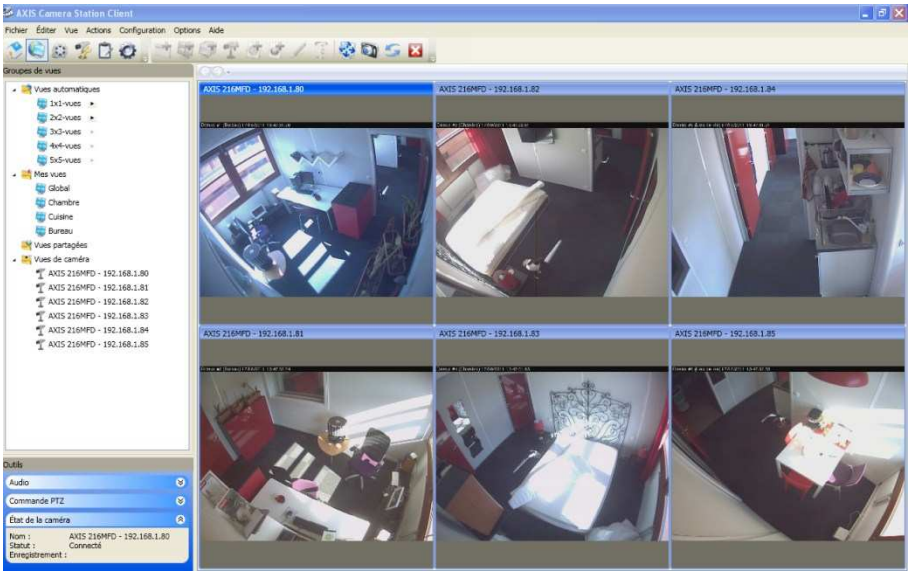


Figure 5-6. Système de contrôle des caméras de l'appartement intelligent

La mise en œuvre du modèle d'interopérabilité dans ce contexte a pour vocation de faire le pont entre les différents protocoles utilisés. Par exemple, l'apparition d'un objet tangible muni d'un tag RFID en un point doit permettre de déclencher une ou plusieurs actions via les autres protocoles, comme l'écoute d'une station de radio via UPnP, ou la variation d'un éclairage via DMX. De plus, l'interopérabilité permet de disposer d'un système de traces à la fois du fonctionnement de l'appartement, mais aussi de l'activité du ou des occupants. Ces traces permettent ainsi d'alimenter un large éventail d'études allant des analyses d'interactions entre systèmes (par exemple, une étude de réponse thermique de l'appartement) jusqu'aux analyses de l'activité des occupants (par exemple, une étude comportementale liée à la sensation de bien-être thermique).

En résumé, grâce au modèle d'interopérabilité mis en place, l'appartement Domus permet l'accueil d'expérimentations variées allant des tests techniques d'installations et de configurations de systèmes domotiques jusqu'à des analyses d'usages de ces mêmes systèmes.

5.2 Intégration des différentes technologies

Du fait de la multitude des objets présents dans Domus, plusieurs technologies différentes sont utilisées : KNX, X2D, DMX, RFID, UPnP, NTP, etc. Pour permettre leur communication, nous appliquons le modèle d'interopérabilité que nous avons présenté au chapitre 4. Les technologies étant hétérogènes, nous avons défini et spécifié plusieurs modèles de transformations, associés aux modèles d'application.

Dans cette section, nous présentons les principales technologies présentes dans Domus, et pour chacune d'entre elles, nous décrirons le ou les modèles d'application et les modèles de transformation associés, que nous illustrerons par un exemple concret appliqué à plusieurs objets. Nous nous sommes ainsi assimilés au rôle « d'intégrateur » propre à la domotique. Nous illustrerons ensuite des services ayant pu être développés en utilisant l'architecture d'interopérabilité, dans une logique de développeurs de services.

5.2.1 KNX

Le protocole KNX, décrit au chapitre précédent, constitue dans l'appartement Domus l'ossature principale, dans le but de connecter les différents « objets du bâtiment ». En ce sens, le réseau KNX est autonome : il ne nécessite pas la mise en œuvre du système d'interopérabilité pour fonctionner et permet ainsi d'assurer les fonctions de base (gestion de l'éclairage, du contrôle d'accès, des stores et volets roulants) en cas d'indisponibilité du système.

L'intérêt du système d'interopérabilité dans ce cadre est de pouvoir piloter les différents objets depuis l'interface de programmation. Ainsi, par le principe des applications paires (propres aux architectures distribuées), chaque objet physique dispose de son complément virtuel, complément exposant alors l'interface de programmation.

5.2.2 X2D

X2D est une technologie propriétaire destiné au bâtiment de la société Française DeltaDore[47], spécialisée dans la production d'automatismes pour le bâtiment tertiaire et résidentiel. Cette technologie utilise plusieurs médias physiques, principalement la radiofréquence et le courant porteur, et s'appuie sur des échanges de nature multicast. La gamme d'applications couvre les objets du bâtiment décrits précédemment (cf. section 3.1.1), avec des automates permettant les fonctions de variation, de commutation, de gestion de chauffage et d'énergie et d'alarmes soit techniques (fuites d'eau, détecteurs de fumée, etc.) ou d'intrusion (ouvertures de portes, détecteurs de mouvements, etc.). Des travaux de passerelles concernant le protocole X2D ont déjà été décrits, notamment vers les technologies Bluetooth et UPnP (Nain *et al.*, 2009; Segarra *et al.*, 2003).

5.2.2.1 Transformation

Le protocole X2D définit pour chaque domaine d'application une trame, contenant une ou plusieurs variables. Par exemple, un détecteur d'ouverture de porte radio n'émettra qu'un seul type de trame à chaque événement, contenant alors la variable d'état ainsi que l'état de la source d'énergie de celui-ci (deux variables). La mise en conformité avec la couche d'interopérabilité se fait donc par ces trames. Un mécanisme de correspondance associe à chaque donnée contenue dans une trame une ou plusieurs adresses de groupe ainsi qu'un format. Les applications des produits utilisant X2D ont un comportement proche voire identique aux applications décrites par KNX, et ne nécessitent donc pas d'apport comportemental. Le tableau 5-1 présente les correspondances entre d'une part les objets X2D et leurs équivalences en KNX.

Ce protocole a été ainsi utilisé sur la plateforme Domus pour la détection d'ouvertures (portes, fenêtres, placards..), sa spécification radio permettant une souplesse d'installation. Les informations issues de ces ouvrants n'ont aucune vocation fonctionnelle directe (vers d'autres protocoles), mais servent aux traces, en particulier pour la localisation de l'habitant ainsi que pour la détection d'activité.

[47] www.deltadore.com

Type d'objet	Famille d'application	Message Type X2D	Bloc fonctionnel associé
Détecteur d'ouverture	« sensors »	DetectionMessage	Status booléen
Compteur d'énergie	« metering »	BasicMeterReadingMessage	Valeur numérique
Lampe	« actuator »	VariationCommandMessage	Variation
Prise	« actuator »	BasicCommandMessage	Commutation

Tableau 5-1. Correspondances entre objets "X2D" et les fonctions KNX équivalentes

5.2.2.2 Exemple : remontée d'information liée à l'ouverture d'une fenêtre

Pour illustrer l'intégration des objets X2D au sein du système, nous nous appuyons sur l'exemple d'une fenêtre équipée d'un détecteur d'ouverture. L'application souhaitée est alors :

- Pouvoir être notifié de l'état de la fenêtre (ouvert/fermé) depuis l'interface de service.
- Notifier la régulation de chauffage de l'ouverture de fenêtre.

Pour ceci, une classe de transformation a été spécifiée. Cette classe permet de recevoir les messages issus de l'interface radio X2D, et de les identifier (par leur type et leur adresse source). Pour chaque trame de type « *DetectionMessage* » reçue, la classe identifie de manière unique la source, et extrait la donnée utile (relative à l'état d'ouverture de la fenêtre). Cette donnée est alors adressée (par une ou plusieurs adresses de groupe), et est ensuite transmise sur le bus virtuel, se propageant ainsi à l'ensemble des dispositifs.

5.2.3 DMX

De nombreuses applications nécessitent un protocole dédié, sur des domaines très spécifiques. Nous nous sommes confrontés à ce cas pour la réalisation d'un éclairage dynamique, contrôlable en couleurs. L'existant nous a conduits à intégrer un protocole d'éclairage spécialisé : le protocole DMX (Digital MultipleXing). Ce protocole (USITT, 1990) est couramment utilisé sur des lieux ayant un nombre important de points lumineux nécessitant une fréquence de modification des consignes très importante (salles de concert, théâtres, studio de télévision). Cette intégration, mentionnée dans l'exemple fil rouge, a nécessité un travail approfondi sur la qualité de services et les nœuds de contention, qui nous a amené à développer des filtres au sein du bus virtuel, pour ne propager l'information qu'aux piles protocolaires réceptrices, évitant ainsi toute saturation des protocoles à moindre débit.

5.2.3.1 Modèle d'application

Le modèle d'application correspondant à l'éclairage dynamique n'as pas été défini dans la norme KNX. En conséquence, nous avons étendu et proposé (Gallissot *et al.*, 2010) le modèle illustré en figure 5-7. Ce modèle utilise les blocs fonctionnels et le comportement issus du domaine de l'éclairage. Cependant, les données correspondantes aux composantes rouges, bleues et vertes de la couleur ne pouvaient être dissociées sous leur forme de variation, celles-ci devant être transmises de manière synchrone. Nous avons donc utilisé le point de donnée « RGB » défini par la norme KNX (DPT_Colour_RGB - 232.600).

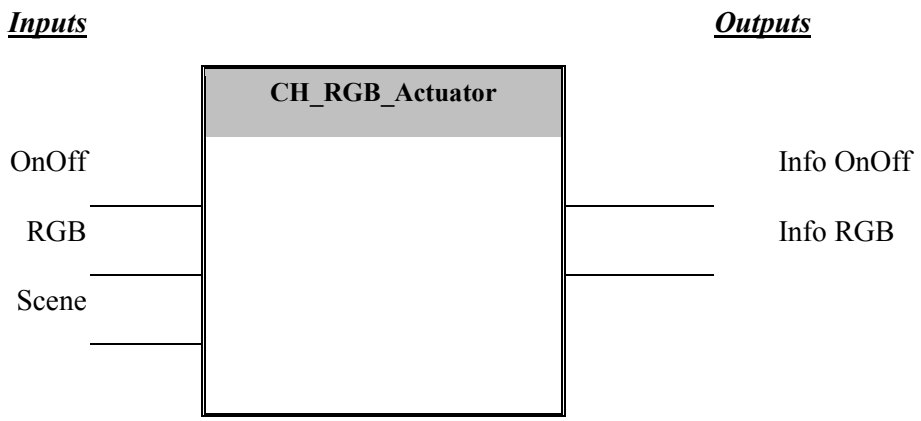


Figure 5-7. Modèle d'application pour l'éclairage dynamique

5.2.3.2 Modèle de transformation

Le modèle de transformation entre KNX et DMX est simplifié du fait que la valeur utile, la couleur, est codée de manière identique. Cependant, des blocs fonctionnels ont dû être inclus afin de satisfaire le modèle d'application. Ces blocs fonctionnels correspondent aux fonctionnalités de scènes et de commutation.

5.2.3.3 Exemple : la commutation groupée d'éclairage

La commande groupée d'éclairage est une fonctionnalité courante et typique de l'habitat intelligent car elle permet de piloter plusieurs objets à partir d'une seule interface (en rupture avec l'intégration traditionnelle où « un objet = une interface »). Cela évite, entre autres, la multiplication de ces dernières. L'éclairage dynamique étant un éclairage secondaire, nous avons souhaité l'intégrer avec l'éclairage principal.

5.2.4 RFID

L'intégration du RFID au sein du système permet d'interagir avec le bâtiment intelligent via des objets tangibles. L'utilisation de cette technologie n'est pas nouvelle dans ce domaine, et des produits basés sur le protocole KNX existent déjà, en particulier pour le contrôle d'accès. Cependant, la diversité de la technologie RFID ainsi que le contexte d'étude nous a incités à développer cette interopérabilité.

5.2.4.1 Modèle de transformation

La transformation dans le cadre de ce protocole consiste à établir une structure de correspondance, détaillée au tableau 5-2, permettant d'associer à un événement, identifié par le lecteur RFID source et la valeur lue, une valeur à émettre au bus virtuel sur une adresse de groupe.

Lecteur source	Evénement déclencheur	Identifiant	Adresse de destination	Valeur à émettre
Adresse source du lecteur	OnTagAppear	Numéro de série de l'étiquette RFID	Adresse de groupe associée à l'événement	Valeur prédéterminée associée à l'événement
	WhileTag		Adresse de groupe associée à l'événement	Valeur prédéterminée associée à l'événement
	OnTagRemoval		Adresse de groupe associée à l'événement	Valeur prédéterminée associée à l'événement

Tableau 5-2. Structure d'une base pour la transformation RFID vers KNX

5.2.4.2 Exemple

5.2.4.2.1 Contrôle d'accès

L'une des caractéristiques de la technologie RFID est de pouvoir identifier de manière unique un objet, qu'il soit doté ou non de capacités de communication. Cette identification peut permettre le contrôle d'accès aux bâtiments dans le cas où une personne peut être identifiée par le moyen d'un badge RFID.

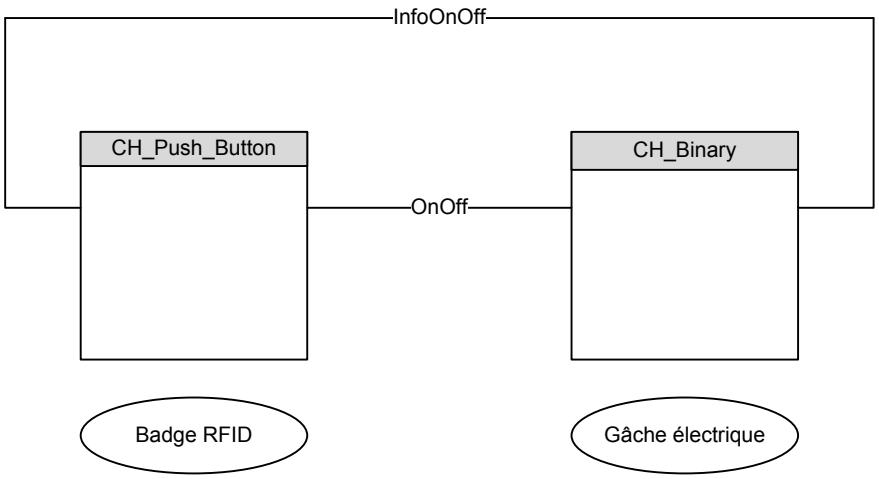


Figure 5-8. Topologie pour le pilotage d'une gâche électrique par l'intermédiaire d'un badge RFID

Evénement déclencheur	Identifiant	Adresse de destination	Valeur à émettre
OnTagAppear	123456789	1/5/1	1

Tableau 5-3. Configuration du modèle de transformation pour l'exemple.

5.2.4.2.2 Interfaces tangibles

Au-delà du contrôle d'accès, les événements détectables par le biais des dispositifs RFID peuvent être transformés afin de déclencher d'autres types d'actions. La figure 5-9 représente de tels objets ayant été utilisés dans ce cadre. Le modèle de transformation est alors similaire à celui utilisé précédemment : ce modèle se présente comme un bouton poussoir, où la détection d'un objet correspond à un appui sur le bouton, et la disparition de l'objet correspond au relâchement du bouton.

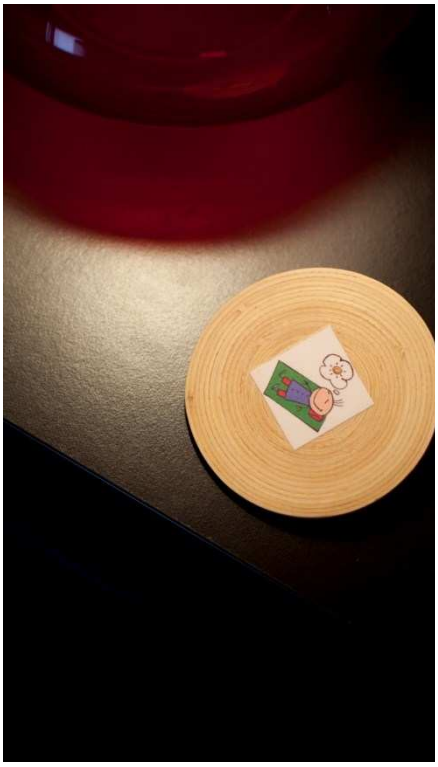


Figure 5-9. Exemples d'objets d'interaction, avec à gauche un objet affordé pour déclencher un scénario de coucher, à droite un objet affordé pour couper le son d'un dispositif sonore

5.2.5 UPnP (Universal Plug and Play)

Le protocole UPnP (Universal Plug and Play) est un protocole issu du monde informatique. Il est maintenu par l'UPnP Forum qui publie les spécifications et standardise les services afin d'assurer une compatibilité entre constructeurs. Il se base sur une architecture orientée webservices, où chaque produit propose un ou plusieurs services, contenant chacun des variables d'état. Grâce à un mécanisme de découverte sur le réseau, un point de contrôle peut alors utiliser les méthodes publiées par les services, et s'inscrire aux événements de ces mêmes services. L'UPnP forum a standardisé un nombre de services variés, avec la gestion de points d'éclairages, la gestion du domaine thermique, ainsi que la gestion du multimédia. Ce dernier point fait l'objet d'une appellation différente de par son succès : DLNA (Digital Network Living Alliance).

Ce protocole étant de plus en plus présent dans les produits de marché, nous en avons donc intégré les fonctions multimédia au sein de notre plateforme (pour une télévision compatible ainsi qu'un système de diffusion audio multi-pièces). Ce travail incluait une rupture par son orientation sur un domaine différent de la construction d'un bâtiment ainsi que par sa technologie. La mise en œuvre s'est effectuée via un point de contrôle hybride, permettant d'exposer les services des produits découverts en tant qu'application compatible avec le bus virtuel. Une difficulté réside dans les différences d'implémentations entre constructeurs. Ainsi, le contrôle de produits aux fonctionnalités identiques et exposés via une définition de service commune, mais provenant de constructeurs différents nécessite des implémentations au cas par cas, la sémantique des webservices n'étant pas garante du comportement.

5.2.5.1 Modèle UPnP

Le protocole UPnP repose sur un modèle applicatif illustré en figure 5-10. L'élément principal est un produit (« *device* »), qui peut contenir d'autres produits. Chaque produit contient un ou plusieurs services. Ces services sont composés d'actions et de variables. Chacune de ces 4 entités contient des propriétés descriptives, telles que des identifiants, des icônes, des informations quant à la nature du produit (constructeur, modèle, etc.) ou des informations quant à la nature de l'entité.

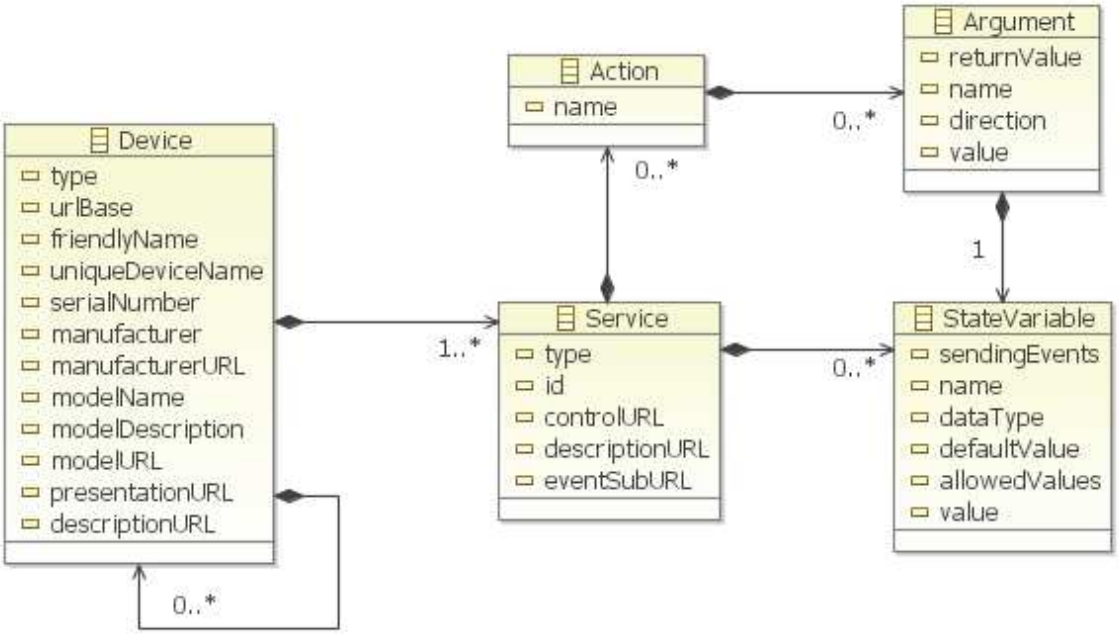


Figure 5-10. Modèle Ecore décrivant un objet UPnP

À partir de ce modèle de principe, nous avons identifié plusieurs règles et éléments de transformation, utilisés en fonction de l'application souhaitée. Ces « transformateurs » interviennent à plusieurs niveaux.

5.2.5.2 Modèle de transformation

5.2.5.2.1 DataMaps

Les « *Datamaps* » sont des transformateurs de données. Ces données sont décrites sémantiquement au sein de l'entité « *StateVariable* » (figure 5-10) et définies dans les spécifications du protocole UPnP. Le tableau 5-4 synthétise les types UPnP décrits par le standard, leur description, la classe de transformation que nous leur avons associée, ainsi que leur équivalent KNX.

Type UPnP	Description UPnP	Transformateur	Type KNX
TYPE_BIN_BASE64	MIME-style Base64 encoded binary BLOB.	ByteArray	24.001
TYPE_BIN_HEX	Hexadecimal digits representing octets.		
TYPE_BOOLEAN	True or false.	Boolean	1.xxx
TYPE_CHAR	Unicode string.	Char	4.00x
TYPE_DATE	A calendar date.	Date	11.001
TYPE_DATETIME	A specific instant of time.	DateTime	19.001
TYPE_DATETIME_TZ	A specific instant of time.		
TYPE_I1	1 Byte int.	SignedValue	6.00x 8.00x 13.00x
TYPE_I2	2 Byte int.		
TYPE_I4	4 Byte int.		
TYPE_INT	Integer number.		
TYPE_NUMBER	Same as r8.	Float	9.0xx 14.0xx
TYPE_R4	4 Byte float.		
TYPE_R8	8 Byte float.		
TYPE_FIXED_14_4	Same as r8 but no more than 14 digits to the left of the decimal point and no more than 4 to the right.		
TYPE_FLOAT	Floating-point number.		
TYPE_TIME	An instant of time that recurs every day.	Time	10.001
TYPE_TIME_TZ	An instant of time that recurs every day.		
TYPE_UI1	Unsigned 1 Byte int.	UnsignedValue	5.00x 7.00x 12.00x
TYPE_UI2	Unsigned 2 Byte int.		
TYPE_UI4	Unsigned 4 Byte int.		
TYPE_STRING	Unicode string.	String	16.00x 24.001
TYPE_URI	Universal Resource Identifier.		
TYPE_UUID	Universally Unique ID.		

Tableau 5-4. Transformation des données entre le protocole UPnP et le protocole KNX

5.2.5.2.2 TriggeredMap

Les « *TriggeredMap* » sont des classes de transformation permettant d'invoquer une ou, séquentiellement, plusieurs méthodes UPnP à partir d'une donnée en provenance du bus virtuel. Il y a deux modes de fonctionnement :

1. Appel d'une ou plusieurs actions UPnP indépendamment de la valeur reçue, en utilisant une table d'arguments fixes en accord avec l'action.
2. Appel d'une action UPnP en fonction de la valeur reçue. Cette valeur est alors transformée par les « *DataMaps* » (cf. 5.2.5.2.1 ci-dessus), et complétée au besoin par une table d'arguments fixes en accord avec l'action.

La valeur de retour de l'action, si existante, peut être transformée et retournée.

5.2.5.2.3 EventMap

Les « *EventMap* » permettent la transformation d'événements d'une « *StateVariable* » vers le système d'abstraction. Pour ceci, il est nécessaire que le système s'abonne à un service dont la variable possède la propriété « événementielle ». À chaque événement reçu, la valeur est alors transformée par une « *DataMap* » puis transmise sur le bus virtuel.

5.2.5.2.4 GetterSetterMap

Pour connaître l'état d'une variable et pour la modifier, un service peut exposer une variable par des actions. Ses actions sont dans la majorité des cas sous la forme « *Get* » et « *Set* » (obtenir et définir). Ainsi, nous avons défini une classe de transformation, nommée « *GetterSetterMap* », permettant d'accéder à une variable uniquement par des actions. Le « *set* » est alors appelé à la réception d'une valeur par la méthode « *groupValueWrite* » et le « *get* » à la réception d'une requête par la méthode « *groupValueRead* ». Les appels se font de manière identique aux « *TriggeredMap* ».

5.2.5.2.5 Cas spécifiques

Les quatre transformateurs de données ci-dessus constituent des transformateurs primitifs, dans le sens où ils fonctionnent au niveau de la donnée. Comme nous l'avons vu précédemment (§ 4.1.3), le protocole UPnP peut avoir des limitations quant au comportement de l'objet qu'il représente. Dans ce cas, une classe de transformation doit contenir les primitives nécessaires ainsi que la logique de l'objet, tel que définie par le modèle d'interopérabilité.

5.2.5.3 Exemple

Nous avons utilisé le protocole UPnP en particulier dans le cadre des objets bruns présents dans l'appartement Domus, soit un téléviseur et trois points de diffusion sonore implémentant le protocole. Plusieurs applications ont été développées, dont la gestion du volume par des services et le déclenchement de radios par des interfaces tangibles.

5.2.5.3.1 Déclenchement d'une radio

Le déclenchement d'une radio concerne en particulier les points de diffusion sonore. En utilisant le service « *AVTransport* » des produits de type « *MediaRenderer* », on peut demander au produit de jouer un média, par une URL pointant vers le contenu (*setTransportURL(…)*). Cependant, l'implémentation de cette méthode est libre : à son appel, le produit peut prendre l'initiative de jouer le media ou non. Dans ce dernier cas, il faut invoquer la méthode *play()* du même service[48].

L'intégration au sein du système utilise les transformateurs de type « *TriggeredMap* ». Pour chaque URL possible, un transformateur est instancié. Ce transformateur s'exécute lorsqu'il reçoit une donnée quelconque. Dans notre cas, ces transformateurs s'exécutaient à partir de données en provenance d'objets tangibles, identifiés au moyen du dispositif RFID décrit précédemment (cf. 5.2.4.2.2 et figure 5-9).

5.2.5.3.2 Variation du volume

De manière similaire, nous avons souhaité pouvoir contrôler le volume des dispositifs multimédia à partir du système. En particulier, avoir la possibilité de rendre ces dispositifs muets en utilisant un objet tangible (cet objet est illustré à droite de la figure 5-9). Cependant, la variation du volume est similaire à la variation d'une lampe variée (utilisée dans l'exemple fil rouge au paragraphe 4.1.3), dans le sens où la notion de volume n'est pas explicitement liée à la notion du « *Mute* ». Ainsi, un dispositif avec le volume positionné à 0 ne se considère pas comme muet, tout comme le même dispositif muet peut annoncer que son volume est différent de 0.

---

[48] Cette différence d'implémentation se retrouve par exemple entre les produits du fabricant Sonos (www.sonos.com), pour laquelle il faut invoquer les deux méthodes, et l'environnement multimédia XBMC (xbmc.org), implémenté pour mettre tout nouveau contenu multimédia systématiquement en lecture.

Nous avons donc spécifiquement créé un transformateur pour cette application. Ce transformateur en contient trois autres : deux « *GetterSetterMap* », l'un pour accéder à la variable « *Mute* », l'autre pour accéder à la variable « *Volume* », le service « *RenderingControl* » exposant ces deux variables par les méthodes « *SetMute* », « *GetMute* », « *SetVolume* » ainsi que « *GetVolume* ». Afin d'être notifié en temps réel de tout changement de valeur de ces deux variables, un transformateur de type « *EventMap* » a été étendu. En effet, les variables ne sont pas événementielles dans la description du service. Les événements sont reçus par l'intermédiaire d'une variable « *LastChange* », encapsulant au format XML les changements des autres variables du service. Ainsi, ce transformateur d'éventements a été spécifiquement étendu pour extraire les variables au cas où une notification adéquate serait reçue. Enfin, ce transformateur implémente le bloc fonctionnel d'une manière similaire à l'exemple fil rouge.

5.2.6 Synchronization NTP (Network Time Protocol)

La synchronisation des processus et la programmation horaire sont des fonctionnalités jugées importantes dans le cadre du bâtiment intelligent (Bjelica *et al.*, 2010). L'heure et la date sont des variables primordiales, mais cependant, les systèmes d'automatisme n'étant pas prévus pour être connectés à un serveur de temps, cette information peut s'avérer coûteuse à obtenir. La virtualisation des automatismes nous permet dans notre cadre de pouvoir utiliser des technologies adaptées de distribution de l'heure et de la date, tel NTP (*Network Time Protocol*, spécifié par la RFC 1305[49]) pour redistribuer cette information au sein des autres systèmes. L'intégration au sein du système d'interopérabilité a été facilitée par l'existence dans les spécifications KNX d'une application « *System Clock* » correspondant à ce besoin. Cette application se compose de deux modèles : un serveur de temps et un client de temps.

5.2.6.1 Modèle d'application

Les informations de temps peuvent être utilisées à de multiples fins (programmation horaire, simulation de présence, etc.), c'est pourquoi nous ne nous sommes intéressés qu'à la partie fonctionnelle. Nous décrivons ci-après les deux blocs correspondants, une partie serveur (à gauche de la figure 5-11) ainsi qu'une partie cliente (à droite de la figure 5-11). Ces deux blocs sont construits à partir de la norme KNX (KNX Association, 2000b).

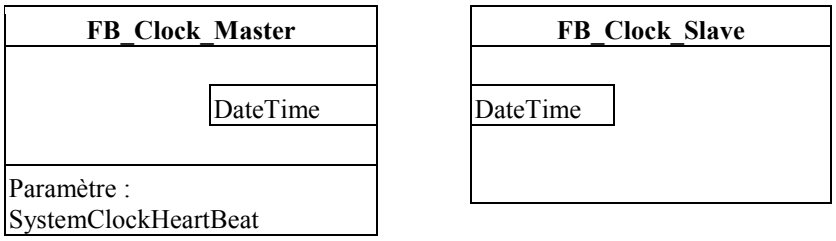


Figure 5-11. Bloc fonctionnel d'un serveur de temps et du client associé

5.2.6.2 Modèle de transformation

La transformation entre le protocole NTP et les blocs fonctionnels correspondants s'effectue en deux points :

[49] http://www.ietf.org/rfc/rfc1305.txt

1. Le format de la donnée : les blocs fonctionnels utilisent un format de donnée complexe. En effet, une structure de six octets contient l'ensemble des informations de temps : date et heure mais aussi le fuseau horaire, l'information heure d'été/heure d'hiver, etc.
2. L'envoi cycle d'information : la donnée contenant les informations de temps doit être envoyée cycliquement, avec une période définie par le paramètre « *SystemClockHeartBeat* » représenté en figure 5-11.

5.3 Utilisation de l'interopérabilité : développement de services de l'habitat

5.3.1 Interfaces homme/habitat

5.3.1.1 Comfortice

La supervision « *Comfortice* »[50] est une composition de l'architecture développée dans la section 4.3.3 et du logiciel d'interface homme-machine « Vijeo Designer »[51]. Dans le cadre de l'appartement Domus, cette supervision sert à associer à chaque objet une interface utilisateur, à partir de la couche d'abstraction et des données de configuration de l'appartement. La figure 5-12 montre ainsi l'interface correspondant au bureau (image de synthèse), où sont disposés les différents objets intelligents, sous forme de pastille. Chaque objet dispose ensuite d'une interface dédiée, comme le montre la figure 5-13. Ces interfaces sont directement associées aux ressources exposées par les applications virtuelles.

[50] www.comfortice.com
[51] Développé et commercialisé par Schneider Electric (www.schneider-electric.fr)

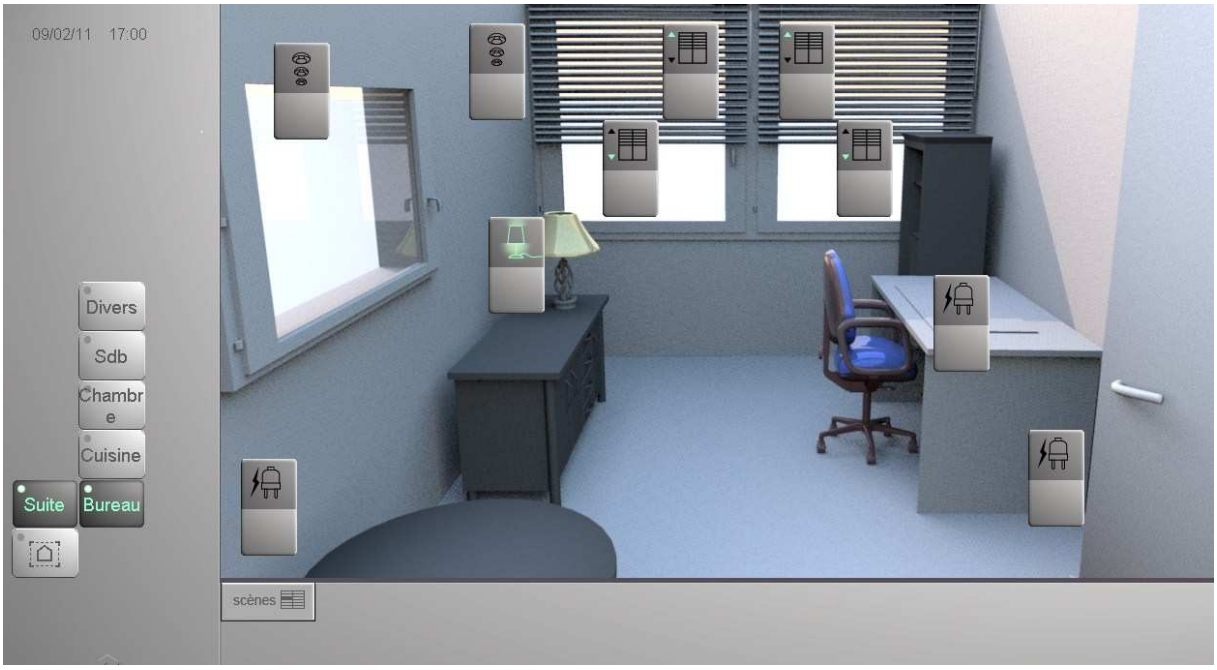


Figure 5-12. Copie d'écran de l'interface de supervision « Comfortice » pour le bureau de l'appartement Domus.

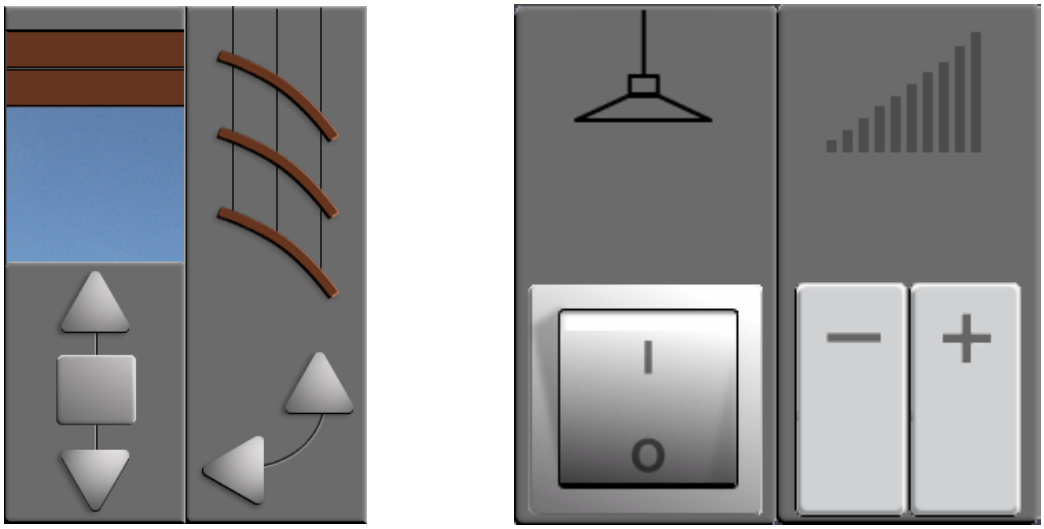


Figure 5-13. Exemple d'interfaces virtuelles d'objets dans le cadre de la supervision "Comfortice" avec à gauche une commande/contrôle pour des stores vénitiens, et à droite une commande/contrôle pour un éclairage plafonnier varié

5.3.1.2 OpenRemote

OpenRemote[52] est une suite de supervision pour les habitats intelligents OpenSource, développée en partie par les fondateurs de la suite JBoss[53]. OpenRemote, dont l'architecture est présentée en figure 5-14, est composé de deux entités :

[52] www.openremote.org
[53] www.jboss.org

- un serveur, appelé « *Boss Controller* », permettant de se connecter aux différents systèmes domotiques locaux. Ce serveur permet également de centraliser les définitions de différentes interfaces
- des clients, appelés « *OR Consoles* », dont le rôle est de présenter les interfaces (principalement tactiles) à l'utilisateur qui pourra ainsi piloter les objets de l'habitat.

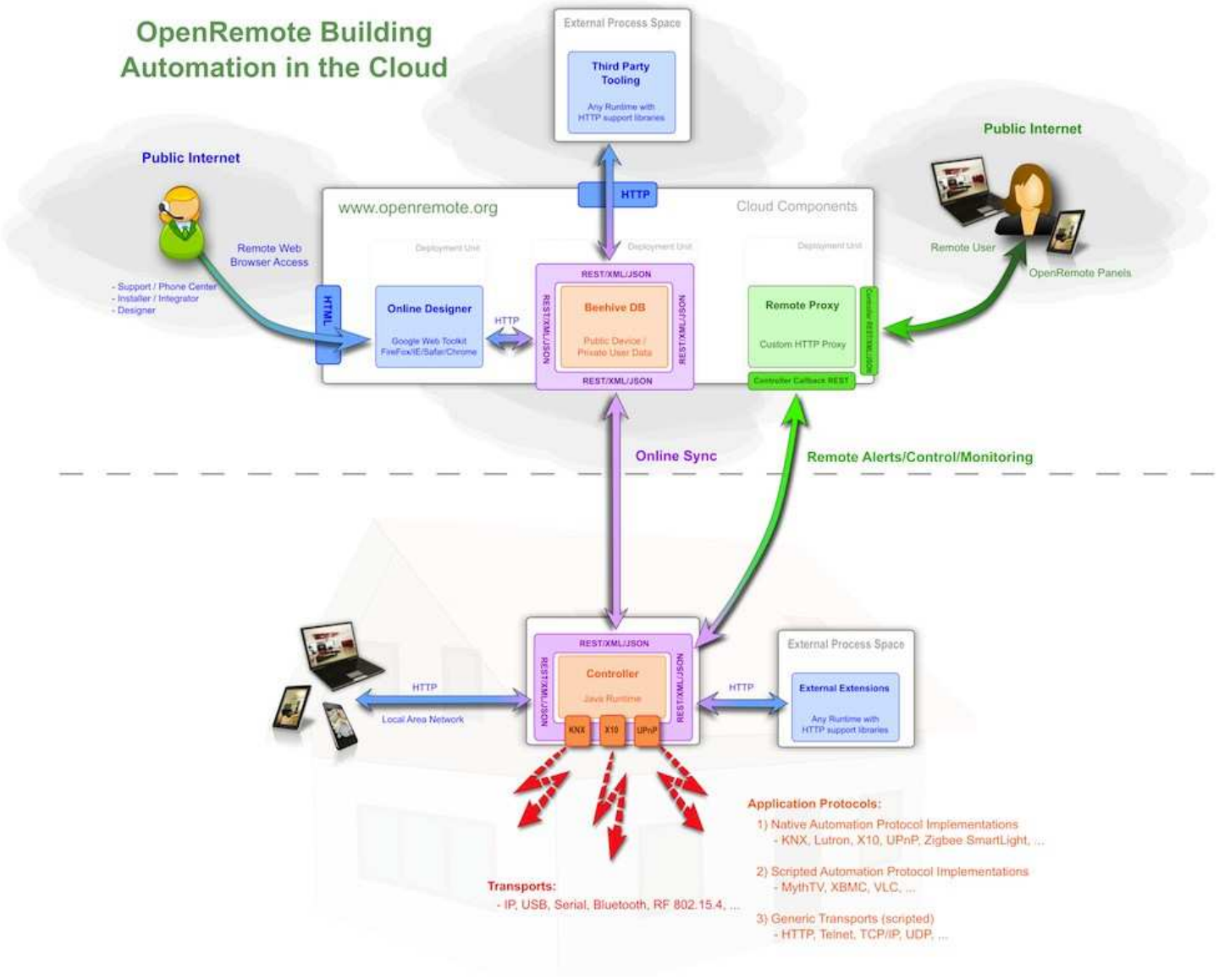


Figure 5-14. Architecture de la suite OpenRemote[54]

Le protocole d'échange entre ces deux entités est sous la forme « REST ». Notre implémentation s'est substituée au serveur (« *Boss Controller* »), et la couche d'abstraction a été étendue à ce protocole REST, dont les spécifications propres à l'application sont ouvertes.

[54] D'après le site officiel

Cette intégration fut développée dans le cadre du développement de plusieurs interfaces. L'une d'entre elles, présentée dans le chapitre 8 en figure 8-1, fut utilisée dans un cadre expérimental. Une autre, présentée en figure 5-15 ci-après, fut utilisée dans le cadre du développement d'un scénario propre à l'habitant-concepteur, qui sera développé à la section 5.3.3.

Figure 5-15. Interface tactile sur client OpenRemote pour Android

5.3.1.3 TangiLight

Au cours de nos travaux, l'appartement Domus a été équipé avec un éclairage d'ambiance, indirect, comme le montre la figure 5-16. Cet éclairage se décompose en 26 segments indépendants, répartis sur les trois pièces principales de l'appartement (un plan d'implantation est fourni en annexe, cf. section 10.5 - figure 10-5). Chacun de ces segments est pilotable par le protocole DMX, dont l'intégration est décrite à la section 5.2.3.

Figure 5-16. Exemple d'éclairage d'ambiance dans la cuisine de l'appartement Domus

L'une des problématiques de cet éclairage est sa complexité. En effet, chaque segment d'éclairage peut prendre 16 777 216 valeurs différentes (nombre de couleurs gérées). Les contrôles classiques du bâtiment (interrupteurs, variateurs à molette, etc.) ne peuvent exploiter une telle dimension de données. D'autre part, les applications courantes de ce type d'éclairage concernent la variation temporelle, par cycles prédéfinis ou programmables, faisant appel à des logiciels spécialisés et experts.

Afin de rendre plus accessible la programmation de tels cycles d'éclairage dynamique aux habitants, nous avons conçu et développé une application spécifique, appelée « TangiLight » (Gallissot *et al.*, 2010), en référence à son interface tangible. Cette application se décompose en deux parties. En premier lieu, l'interface tangible pour l'interaction homme/machine et en second lieu un modèle d'application spécifique, gérant le séquençage temporel[55].

Le matériel utilisé pour cette application a été développé au cours d'un projet ANR appelé TTT. Il a été appelé TangiSense (Kubicki *et al.*, 2011) en référence à la tangibilité et le sens humain. Il s'agit de plusieurs dalles munies d'antennes RFID, chaque dalle étant équipée d'une matrice de 8 par 8 antennes RFID et 16 par 16 LED pour assurer une rétroaction visuelle. La figure 5-17 représente une telle dalle.

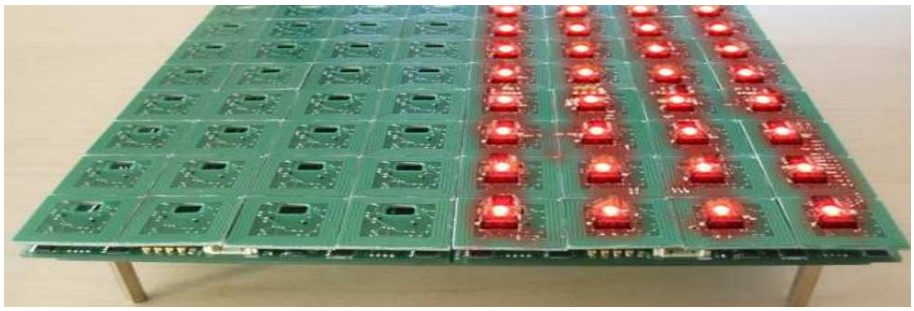


Figure 5-17. Photo d'une dalle TangiSense

[55] Une vidéo de démonstration du dispositif est disponible à l'URL http://www.youtube.com/watch?v=y4CT1w1ljGA

Ce dispositif physique est utilisé par l'application pour, d'une part fournir un retour visuel du cycle programmé à l'utilisateur et, d'autre part, lui permettre de modifier ce cycle et ses paramètres (en particulier la période de révolution). L'application en cours d'utilisation est représentée en figure 5-18. Cette figure fait apparaître le cycle sous forme de cercle (au centre de la figure), une zone de sélection de couleur à gauche, et des objets munis d'étiquettes RFID avec lequel l'utilisateur pourra sélectionner une couleur et la disposer sur le cercle.

Figure 5-18. L'interface tangible TangiLight

L'interface est pilotée via un service dédié au sein de la passerelle, service lié à un modèle d'application spécifique (représenté en figure 5-20). L'architecture complète est illustrée en figure 5-19, avec de gauche à droite :

- Le dispositif physique décrit ci-dessus ;
- Une application au sein de la passerelle, sous forme de service. Cette application permet de communiquer avec le dispositif physique ;
- Une application virtuelle spécifique (« *CH_RGB_Sequencer* »), détaillée en figure 5-20, dont les ressources permettent le dialogue avec le service associé ;
- Plusieurs objets physiques, communiquant avec l'application virtuelle par l'intermédiaire du bus virtuel et des différents modèles de transformation.

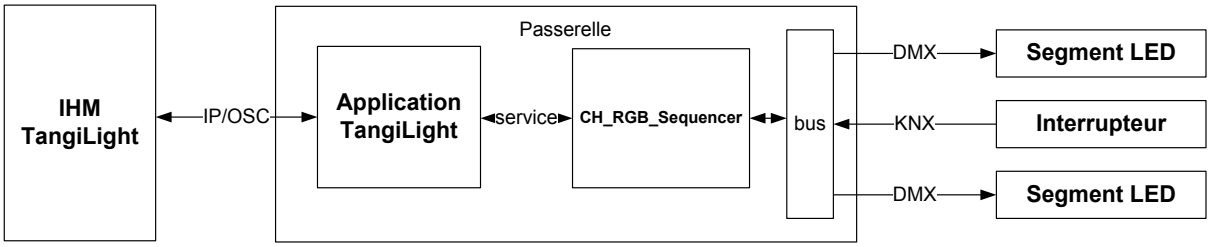


Figure 5-19. Architecture d'intégration Interface/Service/Application virtuelle pour TangiLight

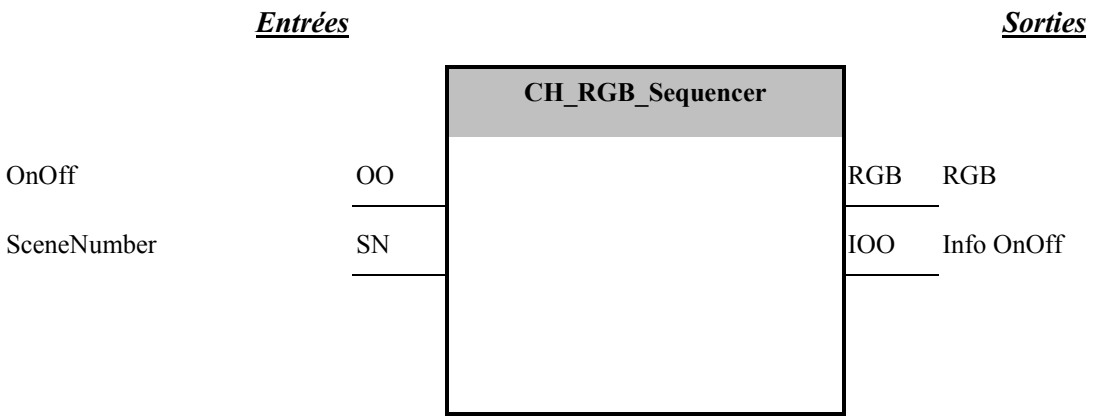


Figure 5-20: Représentation de l'application virtuelle CH_RGB_Sequencer

Index	Nom	Code principal	Code secondaire	Type
1	RGB	CC_RGB (private)		232.600
2	Info OnOff	CC_Switch_Status_OnOff		1.001
3	OnOff	CC_Switch_OnOff	CC_Logical	1.001
4	Scene Number	CC_Scene		

Tableau 5-5. Liste des objets de groupe pour l'application CH_RGB_Sequencer (figure 5-20)

5.3.2 Interface pour le développement de services

Dans une démarche de collaboration avec d'autres équipes de recherche, la plateforme Domus a été utilisée dans plusieurs contextes. Ainsi, en support d'expérimentations visant à valider des technologies pour l'habitat, le système est utilisé aussi bien en tant qu'outil de collecte d'informations en provenance des objets que pour l'envoi de données vers ces objets. Pour s'adapter aux besoins des différentes expérimentations qui ont eu lieu, la couche service a été étendue.

5.3.2.1 SOAP

Pour le projet ANR SweetHome[56], dont le thème est centré sur la commande domotique vocale (Vacher *et al.*, 2011), ainsi que pour le projet ANR CASPER[57], portant sur la reconnaissance d'activité (Brdiczka *et al.*, 2009), la couche service a été étendue via le protocole SOAP (*Simple Object Access Protocol*) pour permettre l'accès à l'information ainsi que la commande de divers équipements à distance. Ce système a été également utilisé dans le cadre de la validation expérimentale des travaux exposés ci-après (chapitre 8), qui ont donné lieu à la création d'un corpus de données (Gallissot *et al.*, 2011).

[56] http://sweet-home.imag.fr/
[57] http://www-prima.imag.fr/casper/

Cet export est réalisé de manière déstructurée : le service permettant de s'abonner à des ressources provenant d'applications virtuelles (présenté en figure 4-16) est exposé sous la forme d'un webservice SOAP. Des clients peuvent alors interroger ce service pour lire la dernière valeur associée à une ressource, ou alors pour enregistrer une URL de notification à laquelle l'implémentation du service enverra tout changement de valeur. Le webservice expose également une méthode permettant d'envoyer une valeur sur une ressource particulière. Du fait de la latence relative à l'utilisation de ressources informatiques importantes (traitements XML), ajoutée à la latence du réseau (selon le nombre de nœuds entre la passerelle et le client), un horodatage des données a été mis en place.

5.3.2.2 UPnP

Le système de traces a été également étendu au protocole UPnP. Ce protocole permet à d'autres personnes, dans l'utilisation ponctuelle de Domus, de comprendre facilement les objets de l'appartement et d'y accéder d'une manière toujours aisée. L'avantage est que de nombreux composants logiciels sont accessibles à la communauté. Cet export a également été utilisé dans le cadre des expérimentations pour les travaux d'Emeric Fontaine[58].

L'export d'objets en UPnP est réalisé par la structuration des ressources issues des applications virtuelles en application UPnP, dont le modèle a été présenté précédemment (paragraphe 5.2.5.1 - figure 5-10). Le tableau 5-6 établit la correspondance entre les objets physiques, le produit UPnP correspondant ainsi que leurs services contenus.

Produit physique	**Produit UPnP correspondant**	**Services contenus**
Prise	PoweredDevice	PowerService
Lampe	DimmedLight	PowerService
		DimmingService
Volet roulant, rideaux	ShutterDevice	ShutterService
Capteur (Température, électricité, eau, humidité…)	CounterDevice	CounterService
LED	ColoredLight	PowerService
		ColoredDimmingService
Bouton physique	ButtonDevice	ButtonService
Détecteur d'ouverture	OpenningDetectorDevice	OpeningDetectorService
Détecteur de présence	PresenceDetectorDevice	PresenceDetectorService

Tableau 5-6. Correspondances d'export d'applications par le protocole UPnP

Les méta données relatives aux capacités d'auto-description des produits UPnP (constructeur, nom du modèle, etc.) étaient alors, soit dépendantes du type de l'application virtuelle (type de produit), soit dépendantes de l'instance de l'application virtuelle (numéro de série, identifiant unique), soit statiques et préconfigurées.

[58] Dans le cadre du projet ANR Continuum (https://continuum.unice.fr)

5.3.3 Fonctions d'agrément

L'utilisation régulière de la plate-forme Domus nous a conduits à développer des fonctionnalités de confort d'usage, à l'image de ce que Robert-Houdin qualifiait en 1867 de services d'agrément (cf. section 2.3.2.1.1). Ces services ne sont pas nouveaux, mais, par leur proximité vis-à-vis des habitudes des habitants, sont souvent perçus comme originaux. La plupart de ces services sont d'ailleurs décrits par Meyer (Meyer, 2004). Nous nous sommes placés ainsi dans le rôle d'habitants-concepteurs, développant des fonctions pour notre propre confort d'usage, à l'image de ce que Kaplan décrit en figure 2-8. Ces développements sont également issus de plusieurs séances de conception participative au sein de l'équipe de recherche, ainsi que du retour des visiteurs et habitants ponctuels de l'appartement.

Entre autres, nous avons réalisé un système de diffusion de messages à l'habitant, quasi-identique à celui de Meyer (Meyer 2004, hack 31), en utilisant les dispositifs audio et vidéo dont nous disposions. Par exemple, lorsque l'utilisateur s'authentifie à l'entrée de l'appartement au moyen du contrôle d'accès (cf. section 5.2.4.2.1), un message d'accueil personnalisé (par le choix de la voix et de l'information à émettre) est diffusé dans la pièce adjacente à l'entrée : la cuisine. Il peut également demander l'heure à tout moment, utilisant un objet tangible sur lequel est imprimé un symbole d'horloge. En fonction de la localisation, et en fonction de son activité, un message sonore lui indiquera l'heure, à la manière d'une horloge parlante. Au cas où il serait dans la chambre et que la télévision serait allumée, un message textuel incrusté à l'image se substituerait alors au message sonore.

Ce système de messagerie permet également d'afficher les informations relatives à l'agenda électronique de l'utilisateur, en lui rappelant des entrées prévues dans la journée, ou des rappels liés à ces entrées. Le système se connecte en effet à l'agenda électronique de l'utilisateur, permettant alors de connaître les entrées imminentes ou prévues prochainement. Cette fonctionnalité illustre l'interaction entre le monde extérieur et les objets de l'habitat.

Meyer présenta également un système permettant de « détecter un voleur de bière » (Meyer 2004, hack 38). Nous avons développé une fonction similaire, également proche du hack 42 de l'auteur (« superviser la porte du réfrigérateur »). Notre système s'appuie sur la localisation de l'habitant. Lorsque celui-ci se rapproche d'un point géographique défini (le frigidaire dans notre cas), des photos sont prises au moyen des caméras, à l'endroit où il est localisé. Si le point géographique s'avère être manipulé (ouverture de la porte du frigo par exemple), les photos prises sont enregistrées et envoyées par courrier électronique à l'intéressé. Dans le cas contraire, elles sont effacées. Ce « hack » est facilement généralisable à l'ensemble de la plateforme. L'appartement dispose en effet d'une couverture importante par des caméras, pour les besoins d'expérimentations. Ces caméras permettent de localiser les utilisateurs, augmentant l'ensemble des traces issues des autres technologies. Ainsi, on peut définir de manière générique un point, lié à un événement perceptible qui sera déclencheur. En définissant également plusieurs zones périphériques, on peut alors incrémenter un indice de proximité, et adapter alors les réactions de l'environnement.

D'autres fonctionnalités citées dans (Meyer, 2004) ont été implémentées, comme le réveil par le lever du jour (Meyer 2004, hack 51), la programmation horaire du son « *Big Ben* » (Meyer 2004 , hack 53). La simulation du lever du jour consiste à faire varier l'intensité lumineuse des différents points d'éclairage de la chambre à une heure préprogrammée, et sur une échelle de temps relativement longue (perceptible). Cette fonctionnalité correspond au « *fading time* » que certains automatismes haut de gamme proposent. La programmation du déclenchement du son correspondant à la tour horlogère « *Big Ben* » intègre un algorithme fonctionnel, bornant les heures de fonctionnement (afin d'éviter toutes nuisances nocturnes) et restaurant la lecture précédente sur le dispositif multimédia d'écoute, si une possible écoute est interrompue par cette programmation.

Nous avons également développé un mode « fête » pour l'appartement Domus, à l'instar de ce que Zack Anderson, alors étudiant du MIT avait fait, dans le cadre de son système « MIDAS »[59]. La particularité de ce mode réside dans son déclenchement, ce qu'Anderson décrivait comme un « *party button* ». Nous avons utilisé, pour ce développement, un bouton d'arrêt d'urgence, dont l'affordance est irrésistible. À l'appui de ce bouton, les volets se ferment, les lampes se mettent à leur intensité minimale et une présélection de musique et de jeux d'éclairages dynamiques sont alors joués. Une extension de ce bouton, par le biais d'une interface tactile sur client mobile (illustrée en figure 5-15), a été réalisée par le biais des travaux décrits précédemment avec OpenRemote.

Enfin, disposant d'un compteur électrique communicant, nous avons souhaité suivre notre consommation énergétique par le biais du service « *PowerMeter* » de Google (suspendu depuis). Ce service offrait une interface graphique permettant de visualiser la courbe de charge (consommations) et fournissait également des synthèses de manière hebdomadaire (la figure 5-21 en montre un extrait). Cette fonctionnalité représente un cas de besoin d'interopérabilité, dans le sens où le fournisseur de services imposait sa propre interface logicielle aux fabricants de compteurs électriques communicants, interface logicielle alors incompatible avec les type de données ainsi que le comportement de l'objet dont nous disposions.

[59] http://web.mit.edu/zacka/www/midas.html

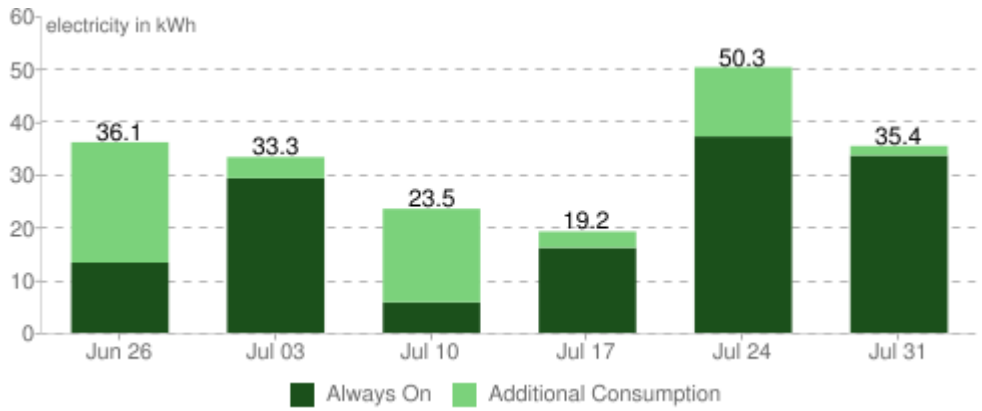


Figure 5-21. Consommations électriques journalières de l'appartement Domus du26 au 31 Juillet 2011

5.4 Retour d'expérience et synthèse

5.4.1 Retour d'expérience

L'utilisation de la plate-forme Domus se heurte à quelques limitations dont les causes sont principalement dues à son bâtiment d'accueil.

Afin de préserver l'intégrité du bâti, il n'a pas été possible d'avoir une évacuation d'eaux usées, ce qui implique que l'appartement n'a pas de toilettes. L'évacuation des eaux utilise le réseau des eaux pluviales. En conséquence, l'utilisation de produits de nature chimique est prohibée au sein de l'appartement. De plus, le bâtiment dans lequel est installée la plate-forme expérimentale étant labellisé « Haute Qualité Environnementale », les pare-soleils extérieurs n'ont pas pu être remplacés par des stores vénitiens, plus courants pour les applications de « *sun-tracking* » par exemple. Enfin, la politique de gestion thermique du bâtiment exclut toute gestion individualisée, ou par zones. Il n'est donc pas possible d'intégrer une gestion thermique dédiée de l'appartement, qui souffre des malfaçons à l'échelle du bâtiment (en particulier la non-mise en service du système de réfrigération « *free-cooling* » pour les périodes chaudes).

En plus des limitations liées à la construction et à l'aménagement, les expérimentations menées sur la plateforme ont été rendues difficiles du fait du contrôle d'accès sécurisé. Le bâtiment d'accueil nécessite en effet un accès par badges personnels et une télésurveillance surveille la présence d'individus sur les périodes nocturnes, et déclenche une alarme dès lors qu'une présence est constatée. Pour les besoins des expérimentations nécessitant que le sujet dorme dans l'appartement, ces contraintes de sécurité ont dues être temporairement modifiées. Cependant, il a été difficile pour le prestataire de services en charge de l'alarme du bâtiment de mettre en œuvre efficacement un système d'inhibition d'alarme adapté à nos besoins. Il est ainsi arrivé que l'alarme d'intrusion soit déclenchée par un sujet lors d'une expérimentation comprenant une nuit dans Domus.

Comme nous l'avons indiqué, nous avons souhaité une plate-forme d'expérimentation adaptable. Cette caractéristique de l'appartement Domus permet au personnel permanent et temporaire de notre équipe, mais également d'équipes partenaires, de venir y faire les expérimentations nécessaires à leurs travaux de recherche. Au fil de la conduite des projets, les différents intervenants, bien qu'appréciant ce mode de fonctionnement, ont noté un manque de référentiel technique commun. Afin de répondre à ce besoin, nous avons mis en place une démarche qualité et une documentation complétée « au jour le jour » sous forme d'un cahier de laboratoire national[60] dédié à l'appartement. De plus, cette vocation d'espace adaptable nécessite la gestion de plusieurs « versions » simultanées de l'appartement. En effet, l'appartement servant à la fois de vitrine technologique, de support d'expérimentation et de lieu de travail, l'ensemble technologique se doit de garantir une cohérence de « service minimum ». En ce sens, le système d'interopérabilité s'est révélé un atout majeur pour garantir le passage d'une configuration à une autre en quelques minutes seulement. Enfin, les systèmes techniques (capteurs, effecteurs, etc.) doivent également être modifiés régulièrement pour adapter l'équipement aux besoins des expérimentations. Cela implique un outillage et des qualifications adaptés. En particulier, les travaux de nature électriques étant cadrés normativement et légiférés (AFNOR, 2010), des formations et habilitations d'une partie du personnel ont été nécessaires.

5.4.2 Synthèse

Nous avons présenté dans ce chapitre plusieurs travaux réalisés en application de l'architecture proposée au chapitre 4. La figure 5-22 représente ces développements (dans l'encadré au centre), ainsi que les objets et services concernés (respectivement les parties inférieures et supérieures de la figure). Ces développements se sont appuyés sur un référentiel commun : le protocole KNX, avec une méthodologie respectant le critère d'interchangeabilité. Ce critère d'interchangeabilité s'est illustré par plusieurs applications, comme l'interaction avec des objets tangibles, se faisant alors de manière similaire à des boutons poussoirs, permettant alors une interopérabilité au niveau applicatif entre des objets *a priori* hétérogènes.

L'abstraction proposée au chapitre 4 a également permis le développement de services, comme des interfaces utilisateur tactiles et tangibles pour l'habitant, mais également des services de plus haut niveau, dans le cadre de projets de recherche (projets ANR CASPER, SweetHome, ReactivHome), utilisant alors des interfaces logicielles. Cette abstraction a également permis le développement de certains services embarqués.

[60] http://www.cnrs.fr/infoslabos/cahier-laboratoire/

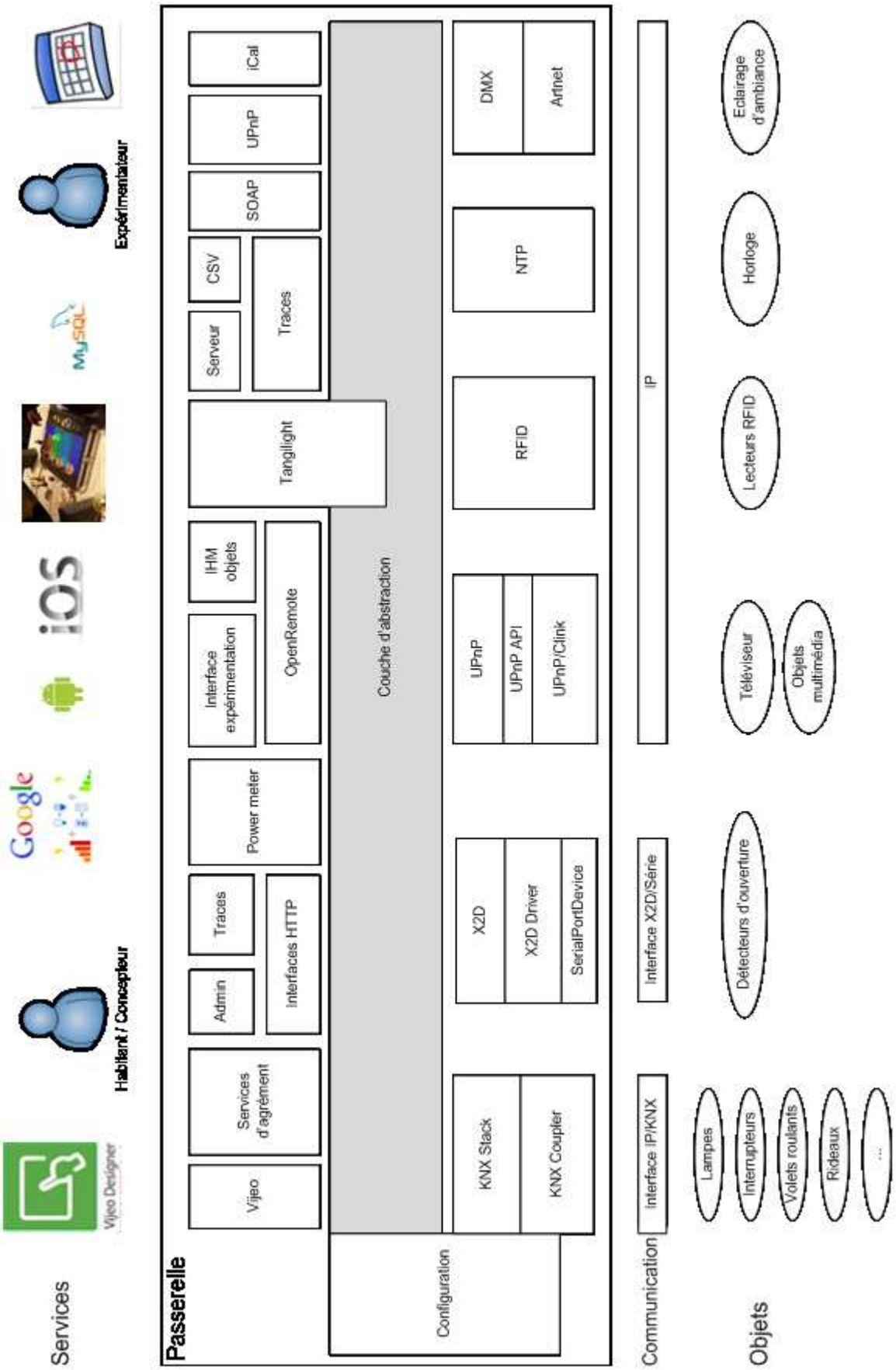


Figure 5-22. Schéma partiel de l'architecture objets/passerelle/services

Discussion

Au cours de cette partie, nous avons défini l'habitat intelligent, comme héritier de la domotique bénéficiant des avancées majeures de l'intelligence ambiante. Nous avons illustré ce concept d'habitat intelligent au travers d'exemples concrets, des réalisations faites par des particuliers ou alors des personnes reconnues dans ce domaine. Cependant, ces réalisations restent des cas isolés, crées « sur mesure » pour des besoins spécifiques d'habitation, de démonstration ou de recherche. Souhaitant alors considérer un habitat intelligent générique, nous nous sommes intéressés à ses constituants : les objets intelligents. Ces objets sont en effet l'essence de l'habitat intelligent, de par leur capacité de raisonnement et leur interconnexion. Cependant, les objets intelligents introduisent plusieurs problématiques, en particulier leur interopérabilité.

Les problématiques d'interopérabilité ne sont pas nouvelles. En amont de l'habitat intelligent, la domotique était déjà confrontée à ce problème, comme l'illustrent les propos de Brun et Descamps ainsi que les propos de Sakamura, repris par Cancellieri (Brun *et al.*, 1988; Cancellieri, 1992). Dans ce contexte, deux approches ont été considérées par les industriels. La première est de définir un protocole propriétaire, leur permettant ainsi de maîtriser l'ensemble technique et commercial de leur offre. La seconde approche est de former un consortium afin de proposer et maintenir des normes (Lefebvre, 1997; Wacks, 2002). Ces normes ont pour rôle de permettre d'une part l'interconnexion de leurs applications, et d'autre part la pérennité de leurs produits.

Aujourd'hui, l'intelligence ambiante ambitionne de rendre communicants un grand nombre, si ce n'est tous, d'objets du quotidien, afin de créer un environnement numérique de perception et de réaction. Les problématiques d'interopérabilité ressurgissent alors. Il est clair que les solutions issues de la domotique ne peuvent s'appliquer tel quel à l'intelligence ambiante, ces solutions étant marquées d'une forte expertise métier. Cependant, les acquis de la domotique, en particulier le centrage des normes sur la plus haute couche du modèle OSI, peuvent inspirer les développements à venir, dans l'esprit des initiatives IPSO et SENSEÏ.

Durant cette partie, nous avons régulièrement associé l'habitant à l'habitat. L'utilisateur est de plus en plus présent dans l'orientation des recherches menées dans des domaines qualifiés « d'innovants ». Norman (Norman, 1993), dont nous avons précédemment repris la définition d'affordance, illustrait alors les méthodes centrées utilisateur comme suit :

- « *La science trouve, l'industrie applique, l'homme se conforme* » Slogan de la foire mondiale de Chicago tenue en 1933 ;
- « *Les gens proposent, la science étudie, la technologie se conforme* » Norman (Norman, 1993).

Cette orientation, « centré utilisateur », est-t-elle indispensable à l'habitat intelligent ? Tel que nous l'avons présenté, l'habitat intelligent est dépendant d'un « habitant intelligent ». En effet, les réalisations permettant d'illustrer le concept d'habitat intelligent ne sont pas anonymes, voire éponymes, et mettent en avant tant le concepteur que la technologie déployée. Les réalisations particulières de Robert-Houdin et Knuvers en sont l'exemple type. Kaplan décrit ainsi ces « habitants-concepteurs » comme des « fanatiques absolus », là où les méthodes d'innovation ascendantes les décrivent comme des « Géo Trouvetou » (Millier, 1999). Meyer (Meyer, 2004) en est un exemple, nommant ses « bricolages » des « *hacks* », développements ingénieux et créatifs. Dans son livre, Gordon Meyer explique en préface qu'il « *il n'y a pas de meilleur endroit [que chez soi] pour appliquer votre énergie créatrice et vos prouesses techniques* ».

Nous pouvons ainsi remarquer que l'habitat intelligent, tel qu'il existe aujourd'hui, reste un habitat personnel, façonné par et pour l'habitant. Dans cette optique, nous remarquons que face au caractère particulier de l'habitat, les plateformes de recherches constituent un outil de premier plan, voire indispensable afin d'assimiler certaines problématiques conditionnelles du transfert technologique des recherches vers l'industrie. Cependant, ces plateformes nécessitent des ressources, notamment pour la maintenance, très importantes, et ainsi, les *Living Labs*, rassemblant au sein d'une même structure académiques, industriels et utilisateurs, sont une démarche encourageante.

Partie 2 : L’espace intelligent (point de vue humain)

Nous avons vu dans la partie précédente ce qu’est un habitat intelligent, et nous avons proposé un modèle d’interopérabilité au niveau des objets intelligents que nous avons appliqué au sein de l’appartement intelligent Domus. Maintenant, dans cette deuxième partie, il s’agit de franchir un pas de plus : concevoir puis construire des services - à l’échelle de l’habitant - de l’habitat et de son environnement pour un meilleur confort.

L’un des points essentiels de l’habitat, sans doute son rôle majeur après la protection physique des personnes et des biens, est la recherche de confort par ses habitants, même si cette notion reste imprécise et sujette à des interprétations subjectives. Malgré cette difficulté, l’habitat intelligent ambitionne d’améliorer le confort à divers niveaux, tout en veillant aux économies de ressources. Cette ambition se heurte à des problèmes nouveaux : tandis que l’habitat obtient son qualificatif « d’intelligent » par la technologie qu’il intègre, le confort est une notion labile et subjective et mal définie.

Cette partie propose quelques solutions, la technologie de l’habitat intelligent pouvant apporter une contribution à l’amélioration du confort.

6 De la pierre au foyer

La recherche du confort et du bien-être de l'habitant est l'une des raisons d'être de l'habitat. En ce sens, de nombreux travaux ont été effectués, dans divers domaines tels que l'architecture - sur les formes et les matériaux ou la décoration -, l'urbanisme, les sciences humaines comme la psychologie jusqu'à la littérature qui décrit de somptueuses demeures ou calque le caractère d'un personnage sur celui de son habitat, pour comprendre l'origine de la sensation de confort et la symbiose qui peut en résulter avec les habitants. En conséquence, on distingue plusieurs approches du confort, tels que le confort subjectif, le confort matériel ou le confort sensoriel. Dans la littérature, l'habitat n'est pas exempt de cette multiplicité d'approches.

Nous commencerons dans ce chapitre, par un état de l'art sur le confort lié à l'habitat. Pour ceci, nous analyserons en premier lieu les définitions générales admises pour définir la notion de confort. Nous détaillerons, par la suite, deux grandes approches qui sont appliquées par des normes pour définir le confort dans l'habitat. La première approche est la caractérisation du bâti, la seconde approche est la perception de l'habitant vis-à-vis de l'environnement.

En discussion, nous ferons une synthèse des différentes méthodologies ayant servi à l'élaboration de ces approches de confort, et nous tracerons les grandes lignes du confort multicritères.

« *Là où naît l'ordre, naît le bien-être* »

Le Corbusier

6.1 Qu'est-ce que le confort ?

Il s'avère très difficile de définir le confort. La plupart des individus ont une représentation spontanée de ce concept, mais ne peuvent l'exprimer de manière formelle, ni définir des critères pour affirmer un jugement sur ce qui est confortable. Le TLF[61] donne actuellement deux définitions proches du confort : « *Ensemble des commodités matérielles qui procurent le bien-être* » et « *Tout ce qui assure le bien-être de l'esprit et sa tranquillité* ». Ces deux notions s'associent au bien-être de la personne, la première sous un angle matériel, la seconde sous un angle subjectif (psycho-perceptif).

La notion de confort est très labile et dépendante du contexte. Sèze (Sèze, 1994) dénote ainsi le confort comme un « OSNI », un Objet Scientifique Non Identifié. En effet, identifier le confort revient à connaître ses propriétés alors que celui-ci ne peut être obtenu que par un jugement subjectif d'une personne, envers « quelque chose » dans un contexte donné. Avant d'introduire tout travail sur le confort, il est d'usage de préciser le contexte : on parle ainsi du « confort de …», par exemple, le confort dynamique, le confort d'usage, le confort matériel, … (Amphoux, 1989; Chelkoff, 2002; Delepaut, 2007). Dans notre contexte, nous limiterons les approches du confort à l'habitat, par la perception qu'en a l'habitant.

Au sein de la littérature académique, deux approches concernant la notion de confort sont fréquemment citées. La première vise à définir le confort par l'absence d'inconfort (Hertzberg, 1958) comme un point d'équilibre, car s'il est difficile de définir le premier, il est *a priori* plus aisé de définir le second. Cependant, cette approche est critiquée, car, pour certains, l'absence d'inconfort ne conduit non pas au confort mais à un état de neutralité, un « entre-deux », qui n'induit aucune forme *d'agréabilité* autrement dit de plaisir. La seconde approche, définie par Slater (Slater, 1986), consiste à concevoir le confort comme « *un état plaisant d'harmonie physiologique, psychologique et physique entre un être humain et son environnement* ». Cette définition permet d'introduire le critère d'agréabilité et de bien-être, qui sont, selon l'auteur, des critères indispensables pour se différencier de l'état de neutralité.

Dans le contexte des normes de construction de l'habitat, les approches visant à définir la notion du confort concernent pour la plupart des travaux liés à l'environnement thermique d'un bâtiment. Ainsi, deux définitions sont courantes. La première par Fanger (Fanger, 1973), exprime le confort comme un état de neutralité : « *Etat d'esprit exprimant la satisfaction de son environnement. Le sujet ne peut pas dire si il veut avoir plus froid ou plus chaud* ». Une seconde a été proposée par Givoni (Givoni *et al.*, 1978), dans le cadre de ses recherches sur le confort thermique : « *Conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation du corps sont à un niveau d'activité minimum* ». Givoni recherchait alors un moyen de mesurer le confort thermique, et exprime également une notion de neutralité de la personne vis-à-vis de son environnement, mais cette fois-ci par une approche physiologique (mécanismes d'autorégulation). Ces deux définitions reprennent la notion de subjectivité liée au confort, la mesure étant centrée sur l'habitant, et indépendante du bâti.

[61] Trésor de la Langue Française (atilf.atilf.fr)

Nous étudierons plus en détail deux approches du confort. La première concerne le confort lié au bâtiment. Le rôle premier d'un bâtiment est en effet d'abriter l'occupant, en créant un environnement intérieur plus confortable que l'environnement extérieur. Les paramètres de confort sont alors variés : nombre de pièces, fonctions des pièces, performances énergétiques, impact écologique, emplacement géographique, etc. La seconde approche concerne le confort sensoriel, lié à la perception de critères d'ambiance par l'habitant, tels que la température, l'humidité, la luminosité. Cette approche motive particulièrement la communauté scientifique, car cette perception met en œuvre un nombre important de variables, qui doivent alors être liées avec la sensation de confort d'un habitant et permettre en retour d'agir sur elles pour une meilleure gestion du confort.

6.2 La mesure du confort lié au bâti

Le confort n'a pas attendu l'omniprésence technologique pour s'appliquer au bâtiment. Celui-ci a impacté les domaines architecturaux au cours des différentes générations. Engrand (Engrand, 2003) rapporte ainsi une définition de 1928 du dictionnaire *Le Larousse*, où le confort moderne est « *un ensemble des dispositions (…) telles que le chauffage central, salle de bains, ascenseurs, électricité, etc.* ». Cette définition du confort moderne s'illustre par les travaux contemporains de l'architecte Le Corbusier (Le Corbusier, 1924), qui définit alors l'architecture moderne, marquée par son fonctionnalisme. Le Corbusier décrit une maison comme une « machine à habiter », où l'architecture doit être l'expression des usages.

Actuellement, le confort d'un bâtiment s'exprime en partie par la structure du bâtiment, son emplacement et sa composition. Ces critères architecturaux servent, comme nous le verrons ci-après, à définir le confort social (selon l'INSEE), le confort sanitaire (selon l'OMS) ainsi que le confort écologique et énergétique.

6.2.1 Les critères Institutionnels

Pour des organisations telles que l'OMS ou l'INSEE, les critères de mesure du confort de l'habitat s'estiment par l'architecture. Ainsi, l'INSEE publie régulièrement des enquêtes (Castéran *et al.*, 2008) où le confort de l'habitation est analysé en fonction de la superficie disponible par habitant, de la présence et du type de chauffage, de la qualité de propriétaire du logement par l'occupant ainsi que de l'équipement sanitaire (étude présentée au tableau 6-1).

	1984	1988	1992	1996	2002	2006
Sans eau ou eau courante seulement	7,9	4,9	3,0	1,7	0,8	0,6
Eau, WC, sans installation sanitaire (1)	4,4	2,8	2,0	1,3	0,8	0,5
Eau, installation sanitaire (1), sans WC	2,7	1,9	1,2	1,1	0,9	0,5
WC, douche ou petite baignoire	27,1	25,7	26,2	26,1	26,9	24,0
WC, grande baignoire	57,9	64,8	67,7	69,9	70,6	74,5
Ensemble	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

(1) : Installation sanitaire : douche, petite ou grande baignoire.
Champ : France métropolitaine.

Tableau 6-1. Eléments de confort des logements, *Source : INSEE, enquêtes Logement (2006).*

Pour définir un « confort de base », L'INSEE s'appuie sur des critères d'inconfort présentés au tableau 6-2.

« Logements sans confort »
Sans confort sanitaire : absence d'un des éléments (eau courante, installation sanitaire, WC intérieurs)
Immeuble insalubre ou menaçant de tomber en ruine
Aucune installation pour faire la cuisine
Aucun moyen de chauffage ou avec des moyens de chauffage sommaires
Electricité déficiente : installation non encastrée, fils non protégés par des baguettes, ou pas de prise de terre
Signes d'humidité sur les murs
Infiltrations d'eau ou inondations provenant d'une fuite d'eau dans la plomberie

Tableau 6-2. Critères de l'INSEE utilisés pour déterminer l'inconfort des logements en 2008

Des études similaires à celles de l'INSEE sont menées, par d'autres organismes, à différentes échelles ou aires géographiques. L'organisation mondiale pour la santé (OMS) mène ainsi plusieurs travaux dans le cadre de ses actions pour la santé. Certaines de ces études concernent les logements (OMS, 2007), et se concentrent sur des critères en vue de comparer l'efficacité des textes et des politiques sanitaires appliqués au logement d'un pays à l'autre. Les critères pris en compte dans ces études sont :

- l'environnement immédiat : proximité (agréable) de parcs ou jardins ou proximité (désagréable) de voies de chemin de fer, routes, etc.
- les matériaux de construction : interdiction de certaines matières composites, comme le plomb dans les peintures et canalisations, etc.
- la conception, l'accessibilité et l'agencement général de l'espace,
- les commodités de base : obligation réglementaire dans certains pays à disposer d'un espace de préparation et de cuisson de la nourriture, ainsi que la présence de salle de bains et WC,
- le chauffage, la ventilation, l'éclairage, l'humidité, etc.
- la lutte contre la vermine, la protection contre les incendies et la gestion de l'environnement ou des déchets.

Les approches de confort de l'INSEE et l'OMS sont basées sur des données d'ordre statistique ou réglementaire, et se déterminent par des points qui sont majoritairement considérés comme inconfortables. Elles permettent ainsi de juger, sur une large échelle territoriale, la qualité des logements et d'établir des catégories. Cependant, ces critères ne sont pas issus des souhaits ou des jugements des habitants, et sont définis par des tiers. De plus, les critères servant à quantifier le confort sont évolutifs. Par exemple, actuellement l'INSEE note certains moyens de chauffage comme sources possibles d'inconfort (tableau 6-2). Selon l'INSEE, des cheminées comme seuls moyen de chauffage de l'habitat sont considérées comme inconfortables. Or, ce moyen de chauffage était la norme dans le passé, avant les progrès techniques actuels.

6.2.2 Les Réglementations Thermiques

Les réglementations thermiques sont des textes réglementaires dont le but est d'encadrer les performances des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC). Elles s'adressent également aux domaines de la production d'eau chaude sanitaire ainsi qu'à l'éclairage (RF, 2000; RF, 2005; RF, 2012). Ces réglementations s'appliquent uniquement aux bâtiments neufs et ont pour but de réduire la consommation énergétique des nouveaux bâtiments.

Il y a eu plusieurs réglementations thermiques jusqu'ici publiées, chaque réglementation (RT1974, RT1982, RT1988, RT2000 et RT2005) ayant pour but de diminuer la consommation énergétique par rapport à la précédente et en fonction des progrès techniques. Leur période d'application va de 5 à 9 ans. La prochaine à entrer en application est la RT2012, dont certains textes sont déjà en application pour des zones géographiques spécifiques[62]. Une réglementation future est planifiée à l'horizon 2020. Le tableau 6-3 présente ces différentes réglementations, leurs objectifs ainsi que la période durant laquelle elles ont été, ou seront en vigueur.

Nom	Objectif sur la consommation énergétique	Période d'application
RT1974	-25% par rapport aux précédentes normes	1976 à 1981
RT1982	-20% par rapport à la RT1974	1982 à 1989
RT1988	Inclusion des bâtiments à usage tertiaire	1990 à 1999
RT2000	-20% par rapport à la RT1988 pour le résidentiel -40% par rapport à la RT1988 pour le tertiaire	2001 à 2006
RT2005	-15% par rapport à la RT2000	Depuis 2006
RT2012	Objectif de 50 kWhep/m^2/an	à partir du 1er janvier 2013

Tableau 6-3. Présentation des différentes réglementations thermiques

La réglementation thermique de 2005 associe un label particulier destiné à reconnaître la performance énergétique des maisons bioclimatiques. Ce label, appelé BBC[63], fixe une norme imposant des consommations maxima de 50 kWhep/m^2/an (soit l'objectif de la RT 2012). Il est conditionnel à certains dispositifs fiscaux. La mesure se fait sur cinq critères : le chauffage, le rafraîchissement, la ventilation, l'eau chaude sanitaire et les auxiliaires de chauffage, et l'éclairage. La mesure est ensuite pondérée par un coefficient en fonction de la zone climatique et de l'altitude. Ce label certifie ainsi les performances énergétiques (donc économiques) du bâtiment en fonction de son emplacement géographique, mais sans toutefois prendre en compte son usage lié à son occupation.

L'application des réglementations thermiques s'effectue par un diagnostic du bâtiment. Ce diagnostic est effectué selon une méthode officielle, comme la « 3CL-DPE » actuellement en vigueur, permettant d'estimer le comportement énergétique du bâtiment (diverses consommations et émissions de gaz à effet de serre). Cette méthode permet d'établir le « Diagnostic de Performance Energétique » (DPE), nécessaire pour toute construction neuve et en location.

L'approche des réglementations thermiques a pour bénéfice d'intégrer des paramètres écologiques à l'habitat, prenant ainsi en compte les objectifs du développement durable. Ainsi, cette méthode permet d'estimer un bâti sous des angles de confort économique et écologique. Cependant, cette approche a pour défaut de ne pas intégrer l'habitant dans le calcul. Les DPE sont ainsi calculés indépendamment de l'usage du bâtiment, utilisant des critères arbitraires comme l'utilisation d'une température de « confort » de 19°C en saison hivernale, température qui, *a priori*, n'est pas la plus confortable pour des habitants.

[62] Zones dites ANRU (Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine)
[63] Pour Bâtiment Basse Consommation

6.2.3 Démarche Haute Qualité Environnementale (HQE)

La démarche « Haute Qualité Environnementale » (HQE) est une démarche volontaire visant à labelliser un bâtiment en se basant sur différentes cibles présentées au sein du tableau 6-4. Elle se différencie des réglementations thermiques, et leurs labels associés, par un nombre plus important de critères, permettant de prendre en compte les différents cycles de vie du bâtiment (construction, occupation, rénovation et déconstruction). En particulier, la prise en compte du cycle d'occupation permet d'intégrer l'agréabilité de l'environnement intérieur, et donc le confort des habitants.

Cette labellisation est gérée par l'association HQE, dont une présentation est faite par Mandallena (Mandallena, 2006). Cette association a été créée en 1996 par plusieurs organismes, tels que l'ADEME[64], le CSTB[65] et la FFB[66]. L'objectif initial de cette démarche est de reconnaître certains bâtiments dont les performances environnementales sont supérieures aux réglementations en vigueur, telles que présentées dans le paragraphe précédent. De plus, les performances énergétiques ne sont pas prioritaires dans cette démarche, qui privilégie alors la « qualité » des cibles.

La certification HQE s'obtient par la distinction de sept cibles parmi les quatorze présentées au tableau 6-4. Cette distinction se fait par un organisme de certification agréé par l'association HQE. Parmi les cibles, au minimum trois doivent être classées comme « très performantes » et quatre comme « performantes ». Cependant, les notions de performances ne sont pas décrites quantitativement (ADEME, 2007), la classification des cibles étant à l'appréciation de l'organisme en charge de l'étude.

Composante	Domaine	Cible
Environnement extérieur	Ecoconstruction	Relation harmonieuse des bâtiments avec leur environnement immédiat
		Choix intégré des procédés et produits de construction
		Chantier à faibles nuisances
	Eco-gestion	Gestion de l'énergie
		Gestion de l'eau
		Gestion des déchets d'activité
		Entretien et maintenance
Environnement intérieur	Confort	Confort hygrothermique
		Confort acoustique
		Confort visuel
		Confort olfactif
	Santé	Conditions sanitaires
		Qualité de l'air
		Qualité de l'eau

Tableau 6-4. Critères pour la labellisation "HQE"

[64] Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (www.ademe.fr)
[65] Centre scientifique et technique du bâtiment (www.cstb.fr)
[66] Fédération Française du Bâtiment (www.ffbatiment.fr)

Cette démarche présente deux types de confort. En premier lieu, l'obtention du label permet d'attester une reconnaissance environnementale, et ainsi le confort écologique. En second lieu, l'habitat peut présenter un confort sensoriel, lié à l'agréabilité de l'environnement intérieur. Cependant, cette forme de confort n'est pas identitaire du label, qui n'exige pas la reconnaissance de performance d'au moins une des cibles du domaine « Confort » en vue de son obtention.

6.2.4 Discussion sur les critères de mesure du confort lié au bâti

Le bâti a un rôle prédéterminant pour mesurer la notion de confort. En ce sens, divers critères mesurables du bâti sont retenus afin d'établir des classifications de confort. Ainsi, nous avons présenté des démarches institutionnelles, réglementaires et associatives qui caractérisent le bâti, dans divers objectifs : des objectifs sanitaires, des objectifs énergétiques et des objectifs environnementaux. Ces objectifs correspondent respectivement au confort « de base » (sanitaire), au confort économique et au confort écologique. Cependant, très peu de ces approches situent le confort comme subjectif à l'habitant, les mêmes règles étant appliquées pour tous et quel que soit l'habitant. Or, nous avons vu à la section 3.2.2.4 de la partie précédente que des études sur l'habitat intelligent montraient qu'il existait une relation complexe entre un habitat et ses occupants, cette relation ayant un caractère à la fois sociétal, physiologique et psychologique.

L'une des études dans ce contexte, réalisée par Saizmaa (Saizmaa *et al.*, 2008), analyse la question de la conception des maisons intelligentes. Intitulée « Smart Home Design: Home or House ? », cette étude montre que l'habitat est différent d'un bureau, et ne peut pas être caractérisé que par des critères architecturaux (matériaux de construction, disposition des pièces, etc.). L'auteur développe ainsi la notion d'« *homeliness* », notion associant l'habitat à des appropriations psychologiques, émotionnelles, physiques, sociales et spirituelles. Ekambi-Schmidt (Ekambi-Schmidt, 1972) s'est également intéressée aux relations entre l'habitat et ses occupants, et notamment la représentation que les habitants se construisent de leur lieu de vie. Ses travaux mettent en évidence une dimension du verbe « habiter » différente de celles alors connues. Cette notion se construit sur l'appropriation par l'habitant des différents éléments de l'habitat, ainsi que sur l'établissement d'un lien affectif entre l'occupant et sa demeure. Moser (Moser, 2009) décrit ainsi cette relation comme base du « *chez-soi* », un espace physique et abstrait au sein duquel l'habitant doit pouvoir s'identifier et s'exprimer.

6.3 La mesure du confort par les habitants

Dans le chapitre précédent, nous avons montré plusieurs méthodes d'évaluation du confort d'un habitat, méthodes liées au bâti et qui ne prennent pas en compte la personne. Ces méthodes ont pour limite de ne pas, ou peu, prendre en compte l'habitant et sa perception de l'environnement intérieur, perception qui pourtant conditionne le confort sensoriel. Ce type de confort est particulièrement développé depuis l'apparition de l'électricité, ayant permis d'intégrer au bâti des moyens d'éclairage, de production de chauffage et de climatisation, qui facilitent le réglage des appareils et tendent de ce fait à se généraliser avec l'habitat intelligent. La domotique s'est en effet développée sur les mêmes technologies et fonctions que la « Gestion Technique du Bâtiment » (GTB), dont la gestion du confort sensoriel est l'objectif principal. La recherche de ce confort dans les bâtiments est régulièrement dénommée « confortique » (Ascher *et al.*, 1987; Brun *et al.*, 1988).

Le confort sensoriel lié à l'habitat peut être vu comme une synthèse de quatre éléments, comme le montre la figure 6-1 : l'environnement externe, le bâtiment, l'environnement interne et l'habitant, qui aura alors un rôle de juge pour définir sa perception du confort. Cette perception de confort peut alors être liée aux grandeurs physiques de l'environnement interne, elles-mêmes étant liées à l'action du bâtiment sur l'environnement externe.

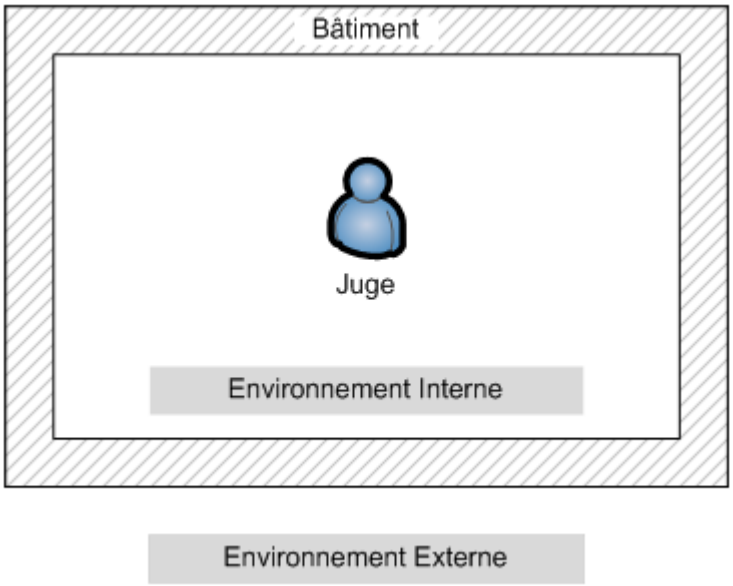


Figure 6-1. Positionnement du juge vis-à-vis de l'environnement externe, du bâtiment et de l'environnement interne

Le confort sensoriel est composé de quatre domaines : confort thermique, confort lumineux, qualité de l'air et confort acoustique. La figure 6-2, extraite de la norme EN 15251, intitulée « *Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique* » (AFNOR, 2007), illustre le rôle des domaines pour la définition du confort sensoriel. Pour chaque domaine (thermique, visuel, air, acoustique), sont définies des grandeurs physiques associées à des formules mathématiques qui permettent de quantifier le confort. Nous présenterons ci-après l'association entre ces grandeurs physiques et leur domaine de confort.

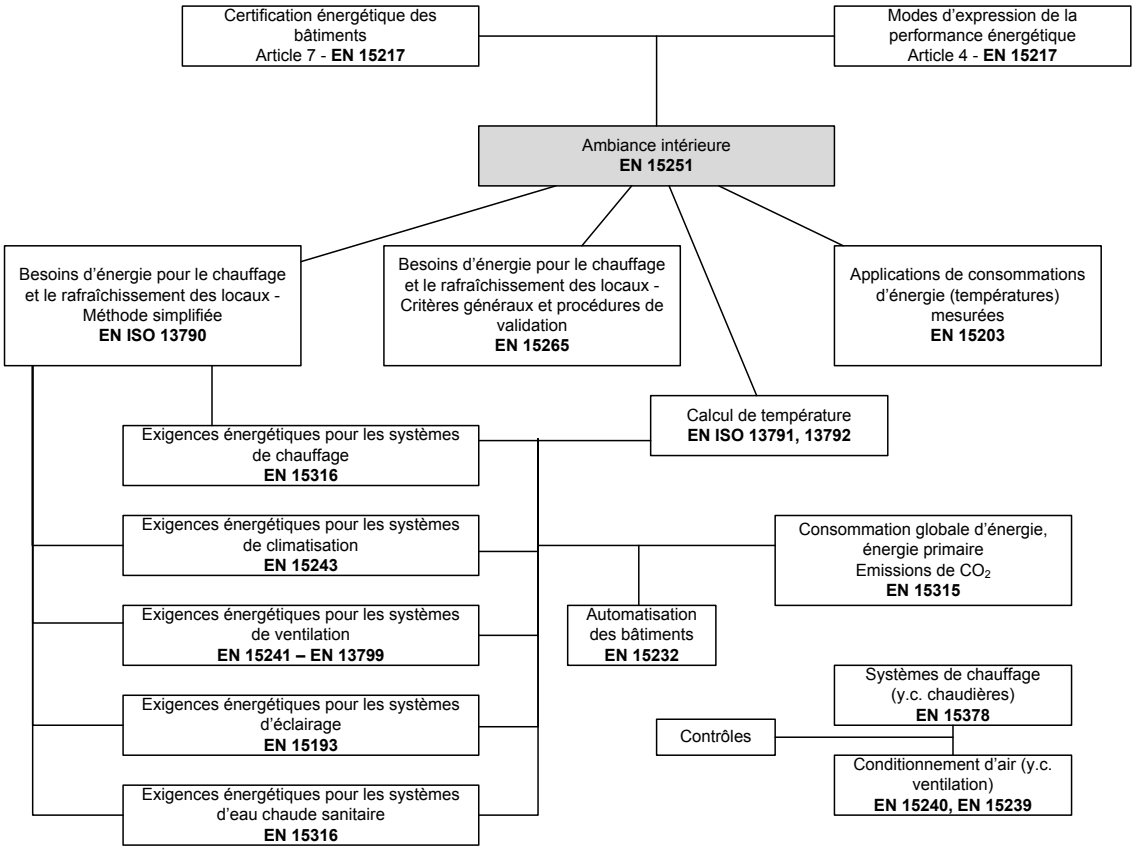


Figure 6-2. Diagramme de liens entre les normes relatives à l'énergie et l'ambiance intérieure des bâtiments (AFNOR, 2007)

6.3.1 Le confort thermique

Le « confort » thermique est considéré souvent comme la source principale d'inconfort, en témoignent les nombreux travaux dédiés (Van Hoof, 2008; Djongyang *et al.*, 2010). La détermination du confort thermique doit sa complexité aux mécanismes physiques dont il est dépendant. En effet, le confort thermique se considère sous deux axes, soit :

- Le premier axe est la compréhension des échanges thermiques entre l'utilisateur et l'environnement interne, ainsi qu'entre l'environnement interne et l'environnement externe. Cette compréhension passe en partie par des modélisations fines de la structure du bâti, caractérisant « l'enveloppe du bâti », modélisations servant à l'application des lois de thermodynamique. Ces lois distinguent plusieurs types d'échanges thermiques : la conduction, la convection et le rayonnement, disposant chacun de leurs modèles mathématiques. Ces lois s'appliquent également à l'humain, celui-ci étant homotherme : il doit maintenir une température interne constante, en régulant sa production et ses échanges de chaleur en fonction de l'environnement.
- Le second axe du confort thermique est la perception liée à l'occupant. L'occupant, sur le seul critère thermique, possède en tant qu'humain des mécanismes de régulation, qu'ils soient physiologiques (liés à son métabolisme et à son activité), comportementaux (par exemple ses vêtements) ou psychologiques (expérience passée d'une ambiance thermique). Ces mécanismes sont difficiles à intégrer lors de la conception d'un bâtiment, tout comme ils sont difficiles à mesurer par des capteurs.

La figure 6-3 illustre la complexité de formuler le confort thermique, et plus particulièrement l'influence de la température des parois (source de rayonnement thermique) vis-à-vis de la perception de l'occupant (illustrée par l'habillement dans cette figure). Les résultats « extrêmes » (en haut de la figure 6-3) disqualifient la température de l'air comme seul indicateur de confort thermique, même si les conditions ayant mené à ce résultat ne sont réalisables qu'au sein d'une chambre climatique expérimentale.

Parmi les travaux sur l'évaluation du confort thermique (Van Hoof, 2008; Djongyang *et al.*, 2010), trois méthodes d'évaluation sont couramment utilisées : la méthode dite du « Température au thermomètre-globe mouillé » (Yaglou *et al.*, 1956), le modèle décrit par Fanger (Fanger, 1973) ainsi que la méthode dite « adaptative » énoncée par Humphreys et Nicol (Humphreys *et al.*, 1998). Ces approches sont devenues normalisées pour des contextes généraux, et servent de base à des cas d'application spécifiques, comme pour les bâtiments naturellement ventilés (Moujalled, 2007; Brun, 2011).

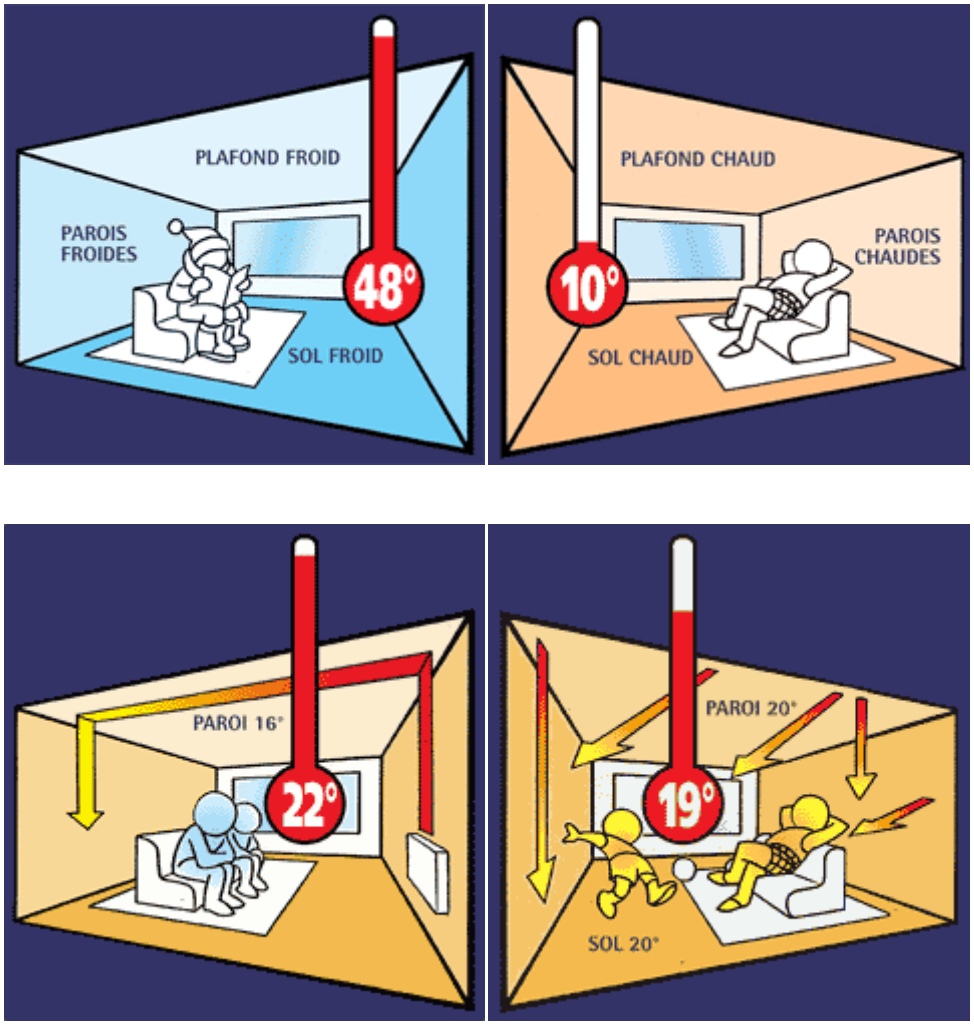


Figure 6-3. Résultat d'une expérimentation sur la perception thermique[67]

[67] Source : www.promodul.fr, d'après une expérience menée au MIT

6.3.1.1 Wet Bulb Globe Temperature (ou Température au thermomètre-globe mouillé)

L'indice Wet Bulb Globe Temperature (WGBT) a été développé en 1956 par l'armée Américaine (Yaglou *et al.*, 1956) qui souhaitait mesurer les effets potentiels du rayonnement du soleil sur ses soldats. Depuis, cet indice a été repris pour l'évaluation du confort thermique, car il intègre les variables principales (et pour lesquelles des capteurs existent) composant le confort thermique : la température de rayonnement, la température de l'air et l'humidité. Cet indice est normalisé (ISO 7243) pour définir le confort thermique dans les ambiances chaudes et humides. Le calcul de cet indice s'effectue selon (1).

$$WGBT = O.77T_W + 0.2T_g + O.1T_d \quad (1)$$

T_W est la température humide naturelle
T_g est la température de globe (mesurée avec un thermomètre à globe noir)
T_d est la température sèche
Pour la mesure à l'intérieur d'un bâtiment, on estime que $T_g = T_d$

Afin d'appliquer l'indice à l'échelle d'un corps humain, l'indice WGBT est pondéré selon trois points de mesures : la tête, l'abdomen et les chevilles (2).

$$WGBT_{corps} = \frac{WGBT_{tête} + 2WGBT_{abdomen} + WGBT_{chevilles}}{4} \quad (2)$$

Cet indice, bien que souvent utilisé (ISO 7243) est critiqué pour certaines limitations (Budd, 2008). Ces limitations concernent l'absence de la prise en compte des paramètres propres aux personnes, comme l'activité ou encore l'habillement. Certaines limitations ont également été émises en ce qui concerne les instruments de mesure. Le calcul de l'indice WGBT s'effectue en effet à partir de grandeurs physiques spécifiques, nécessitant des capteurs appropriés comme le thermomètre à globe noir ou encore des thermomètres de température sèche. Budd (Budd, 2008) rapporte que ces capteurs sont sources de biais : leur calibration étant difficile, la mesure obtenue est fréquemment erronée. Dans cette étude, Budd rapporte également que la qualité des capteurs et leur positionnement sont primordiaux pour l'obtention d'un résultat représentatif du confort thermique.

6.3.1.2 Modèle de Fanger (PPD et PMV)

Fanger est reconnu pour l'importance de ses travaux concernant le confort thermique, et en particulier son modèle éponyme (Fanger, 1973). Ce modèle est constitué de trois équations. La première (3) correspond à l'équilibre du bilan thermique humain, modélisant les échanges de chaleur entre l'homme et son environnement.

$$S = M \pm P \pm C \pm R \pm E \quad (3)$$

M : métabolisme énergétique lié au travail et au métabolisme de base;
P : échanges thermiques par conduction ;
C : échanges thermiques par convection
R : échanges thermiques par rayonnement
E : échanges thermiques par évaporation
S : stock de chaleur

À partir du bilan thermique humain, Fanger (Fanger, 1967) a établi une équation de confort, où les différents échanges sont calculés à partir des variables exprimées en (4). Certaines unités, telles que le *clo* et le *met*, sont prédéterminées en fonctions de tables ou d'abaques, mais ont néanmoins une correspondance en unités du système international. Les étapes complètes de calcul sont détaillées dans plusieurs communications (Deval, 1984; Morel *et al.*, 2008). L'hypothèse de Fanger est que le confort est optimum lorsque le résultat de cette équation est nul (S = 0), traduisant ainsi un équilibre thermique entre l'homme et son environnement.

$$f(M, I_{cl}, v, t_r, t_a, P_w) = S \quad (4)$$

M : Taux métabolique (unité : met) ;
I_{cl} : indice d'habillement (unité : clo) ;
v : vitesse de l'air ($m.s^{-1}$) ;
t_r : température radiante moyenne (°C)
t_a : température ambiante, de l'air (°C)
P_W : pression de vapeur d'eau dans l'air ambiant (Pa)
S : stock de chaleur, issu de (3)

À partir d'études réalisées en chambre climatique, Fanger a recueilli les sensations de plusieurs sujets soumis à différentes ambiances thermiques. Il en a déduit un indice de confort, appelé PMV (« *Predicted Mean Vote* »), qui correspond à la sensation de confort de différentes personnes soumises à une même ambiance thermique. Cet indice se calcule par l'expression (5), en fonction du résidu S de l'équation de confort (4).

$$PMV = (O,303e^{-0,036M} + 0,028)S \quad (5)$$

M : taux métabolique
S : résidu du bilan thermique

La table de correspondance, présentée dans le tableau 6-5, permet d'associer le PMV à la sensation thermique ressentie par l'habitant.

PMV	Sensation thermique
+3	Très chaud
+2	Chaud
+1	Tiède
0	Neutre
-1	Frais
-2	Froid
-3	Très froid

Tableau 6-5. Sensations thermiques associées à l'indice PMV

Cet indice et les sensations associées sont désormais normalisées, et sont utilisés dans des conditions dites normales (ou tempérées). Le PMV permet d'estimer le pourcentage de personnes insatisfaites par rapport à l'ambiance thermique : le PPD (« *Predicted Percentage of Dissatisfied* »), selon l'expression (6). La courbe du PPD, telle qu'illustrée en figure 6-4, montre deux propriétés qui sont alors associées selon Fanger au confort thermique :

1. La satisfaction des personnes vis-à-vis d'une ambiance thermique est symétrique : le froid gêne dans les mêmes proportions que le chaud ;
2. Il y a, quelles que soient les situations, toujours 5% de la population qui est insatisfaite quant à l'ambiance thermique.

$$PPD = 100 - (95e^{-(0{,}03353PMV^4 + 0{,}2179PMV^2)}) \quad (6)$$

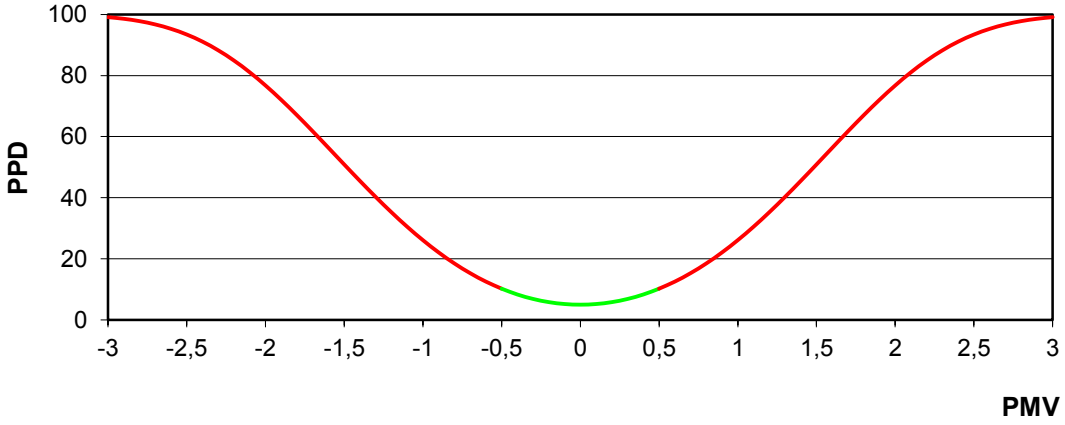


Figure 6-4. Courbe du PPD en fonction du PMV

Les indices PMV et PPD, malgré leur large utilisation, sont critiqués (Van Hoof, 2008). Ces critiques portent en particulier sur la symétrie du modèle, ce qui mène les auteurs à des propositions pour des modèles excentrés et non-symétriques. De même, ce modèle ne prend pas en compte l'aspect transitif et l'inertie thermique qui bruitent les mesures lorsque les fluctuations climatiques sont fréquentes (Talotte *et al.*, 2006).

Le modèle de Fanger (et en général les modèles analytiques) a été défini à partir de données issues d'expérimentations menées au sein de chambres climatiques. Ces chambres permettent d'identifier les différents paramètres contribuant au confort thermique : les températures, la vitesse de l'air, l'humidité, l'éclairage ou encore le niveau sonore mais aussi les paramètres relatifs aux sujets, comme l'activité, la tenue vestimentaire, la température cutanée, etc. Ce cadre d'étude permet de comprendre et de pondérer ces différents paramètres, mais les modèles obtenus sont difficiles à mettre en œuvre sur le terrain. En réponse, les modèles dits adaptatifs ont été définis.

6.3.1.3 L'approche adaptative

L'approche adaptative a été énoncée par Humphreys et Nicol (Humphreys *et al.*, 1998), qui cherchaient alors à intégrer dans les mesures de confort thermique l'adaptation physiologique et comportementale caractéristiques des individus. Selon les auteurs, les occupants s'adaptent ainsi à leur environnement pour compenser la plupart des fluctuations, et l'inconfort n'est lié qu'à des contraintes excessives (Nicol *et al.*, 1995). Cette approche consiste à déterminer, à partir d'observations expérimentales *in situ*, une relation linéaire entre la température intérieure souhaitée par les occupants (température de confort) et la température extérieure. Ces observations ont mené à plusieurs résultats, qui, de par leur nature empirique et subjective, sont dépendants des conditions dans lesquelles les mesures de référence ont été acquises. Le tableau 6-6 synthétise les résultats issus d'études menées en Europe.

Pays	$\boldsymbol{T_{MR80} \leq 10°C}$	$\boldsymbol{T_{MR80}} > 10°\boldsymbol{C}$
France	$0.049T_{MR80} + 22.58$	$0.206T_{MR80} + 21.42$
Grèce	n.a.	$0.205T_{MR80} + 21.69$
Portugal	$0.381T_{MR80} + 18.12$	$0.381T_{MR80} + 18.12$
Suède	$0.051T_{MR80} + 22.83$	$0.051T_{MR80} + 22.83$
Royaume-Uni	$0.104T_{MR80} + 22.58$	$0.168T_{MR80} + 21.63$
Où T_{MR80} correspond à une moyenne des températures extérieures		

Tableau 6-6. Détermination des températures de confort thermique adaptatif dans le cadre du projet SCATs (McCartney *et al.*, 2002)

Cette approche permet d'induire certains facteurs difficiles à mesurer du confort thermique, comme la vêture, l'activité, le métabolisme, ainsi que les facteurs psychologiques. Mais cette approche, par son caractère empirique, permet également d'inclure certains paramètres sociétaux, comme l'expliquent les auteurs. En effet, ceux-ci relèvent les adaptations à l'ambiance thermique par les occupants envisageables en fonction des situations (reportées en partie au tableau 6-7).

Actions envisageables en réponse au froid	Actions envisageables en réponse au chaud
Vasoconstriction (réduit l'afflux sanguin à la surface de la peau)	Vasodilatation (augmente l'afflux sanguin à la surface de la peau)
Accroître la tension des muscles et frissonner	Transpirer
Ajouter des vêtements	Se dévêtir
Augmenter la consigne de température du thermostat	Boire une bière
Se plaindre au gestionnaire du bâtiment (espérant que quelqu'un augmentera la consigne de température)	Mettre en marche un ventilateur
Rendre visite à un ami ou aller à la bibliothèque (espérant un environnement thermique plus chaud)	Aller nager (sélectionner un environnement plus frais)
Construire une nouvelle maison	Ouvrir une fenêtre
Emigrer dans un pays plus chaud (prospecter un lieu plus chaud pour le long terme)	Aller nager
S'acclimater (laisser le corps et l'esprit être plus résistant au stress thermique)	

Tableau 6-7. Exemples d'adaptations envers l'inconfort thermique, d'après Humphreys et Nicol (Humphreys *et al.*, 1998)

Certaines de ces actions dépendent, ou peuvent dépendre, des habitudes, des coutumes, des normes sociales ou techniques d'une zone géographique. Ainsi, réaliser une enquête sur un échantillon de population représentatif permet d'appliquer les résultats de l'étude à l'ensemble de la population. Les auteurs notent alors que les personnes sont adaptées à leur environnement, et se réadaptent si cet environnement est « plus chaud » ou « plus froid » que d'habitude. Cette approche est donc relative aux habitudes des personnes, contrairement au modèle de Fanger (cf. section 6.3.1.2) ainsi qu'à l'indice WGBT (cf. section 6.3.1.1), qui sont objectifs. Nous mentionnerons de nouveau cette méthode, qui a été appliquée à l'habitat intelligent par Mozer (Mozer, 1998; Mozer, 1999).

6.3.2 Le confort visuel

Selon Bodart (Bodart, 2002), le confort visuel est une sensation liée à la perception nette et sans fatigue d'une ambiance colorée agréable. Le confort visuel est ainsi lié au sens de la vue, et se caractérise physiquement en fonction des variables présentées au tableau 6-8. La gestion de l'éclairage est un domaine aux applications multiples, ayant des répercussions sur le confort, mais également sur la productivité et la santé (Webb, 2006; Ladouceur, 2008; El Baamrani, 2009). L'éclairage est ainsi réglementé, que ce soit l'éclairage public ou l'éclairage sur le lieu de travail. Il est aussi exploité en architecture d'intérieur et au sein du domaine commercial et marketing, pour la mise en valeur de volumes ou de produits (Rieunier, 2009). Nous étudierons le confort visuel en présentant les caractéristiques de la lumière et sa participation possible à l'inconfort perçu.

Terme	Définition	Symbole	Unité
Flux lumineux	La quantité d'énergie émise par une source sous forme de rayonnement visible dans toutes les directions par unité de temps	F	Lumen (lm)
Intensité lumineuse	Mesure de l'importance du flux lumineux émis dans une direction donnée par une source ponctuelle.	I	Candela (cd)
Luminance	Mesure de l'aspect lumineux d'une surface éclairée ou d'une source, dans une direction donnée et dont dépend la sensation visuelle de luminosité. L'appareil de mesure : luminancemètre	L	cd / m²
Eclairement lumineux	La quantité de lumière reçue sur une surface d'un mètre carré. L'appareil de mesure : luxmètre.	E	Lux (lx), 1 Lux = 1 Lumen / m
Contraste	Appréciation subjective de la différence d'apparence entre deux parties du champ visuel vues simultanément ou successivement. Il peut s'agir d'un contraste de couleur, d'un contraste de luminance.	n.a.	n.a.

Tableau 6-8. Variables constituant les éléments de grandeurs qualifiants du confort visuel

6.3.2.1 Caractérisation de la lumière

La luminosité est la variable principale du confort visuel. De nombreux travaux expriment ainsi son importance pour permettre de distinguer les objets (Boray *et al.*, 1989; Sanselme, 2008; Bellia *et al.*, 2011). Deux caractéristiques principales de la lumière sont, dans ce contexte, retenues comme critère de confort : l'intensité lumineuse et la composition spectrale de la lumière. L'intensité lumineuse peut s'exprimer sous diverses grandeurs physiques. En un point unique, en tant que récepteur, on l'exprimera en lux. Les autres variables caractérisant l'intensité lumineuse correspondent aux sources, et permettent d'estimer alors la contribution de ces sources à l'intensité lumineuse, en fonction de la localisation du récepteur vis-à-vis de la source.

Une autre caractéristique de la lumière participant au confort visuel est sa composition. La lumière peut en effet se caractériser par son spectre, correspondant ainsi aux différentes couleurs (longueurs d'ondes) qui la constituent. Dans le domaine de l'éclairage des espaces intérieurs, on exprime fréquemment cette constitution spectrale de la lumière en température de couleur (en degrés Kelvin). Cette correspondance s'établit à partir du rayonnement d'un corps noir à différentes températures, et est formalisée par la loi de Planck. Un éclairage chaud est donc, paradoxalement, un éclairage dont la température est faible (1000°K) comparé à un éclairage froid dont la température est plus élevée (supérieur à 30000°K). Un éclairage à température neutre correspond à une température de 2700°K.

La composition spectrale a de multiples effets sur l'homme et le confort visuel en particulier. Le diagramme de Kruithof (figure 6-5) présente ainsi trois zones en caractérisant la lumière par l'éclairement et la température de couleur. Ce diagramme a été établi à la suite d'enquêtes auprès de sujets soumis à des éclairages variables en luminosité et en température, et a permis de définir une zone « Trop chaude » (zone A), une zone « Trop froide » (zone C) et une zone de confort (zone B).

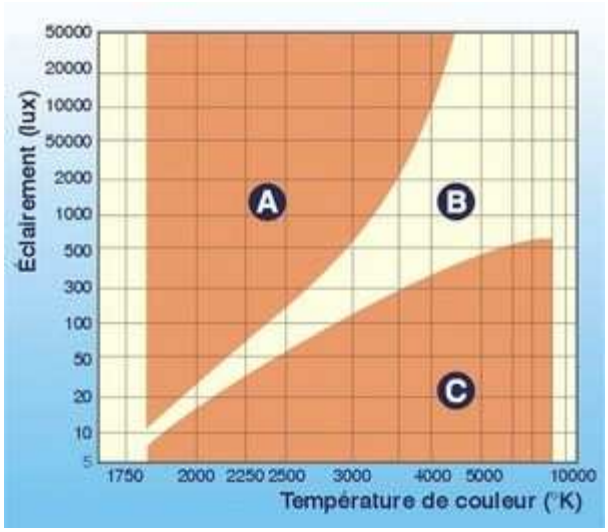


Figure 6-5. Diagramme de Kruithof

Un autre moyen de déterminer le confort visuel par les caractéristiques de la lumière est le rapport entre l'éclairage artificiel et l'éclairage naturel. Certaines réglementations définissent ou recommandent des plages d'acceptabilité de ce rapport, alors déterminé par le Facteur de Lumière Jour (FLJ). Ce facteur se définit comme le rapport entre l'éclairement naturel intérieur (E_{int}) et l'éclairement extérieur (E_{ext}) simultanés sur une surface horizontale. Il s'exprime en pourcentage (7).

$$FLJ = \frac{E_{int}}{E_{ext}} * 100 \qquad (7)$$

Enfin, la couleur de la lumière, cette fois-ci au sens propre et non en température, a de multiples effets physiologiques et psychologiques. La figure 6-6, proposé par Chaudron (Chaudron, 2005), présente ainsi plusieurs couleurs d'éclairage, qui, associées à un dynamisme, provoquent des humeurs. Un autre effet des couleurs est la production de la mélatonine, l'hormone du sommeil. Des études menées notamment au sein de l'AFE[68] ont montré que des personnes soumises régulièrement à des éclairages artificiels, comme des infirmières de nuit, avaient des troubles du sommeil et des dépressions nerveuses fréquentes, contrairement à des personnes soumises à un éclairage naturel comme les sportifs qui s'entraînent à l'extérieur.

[68] Association française de l'Eclairage (www.afe-eclairage.com.fr)

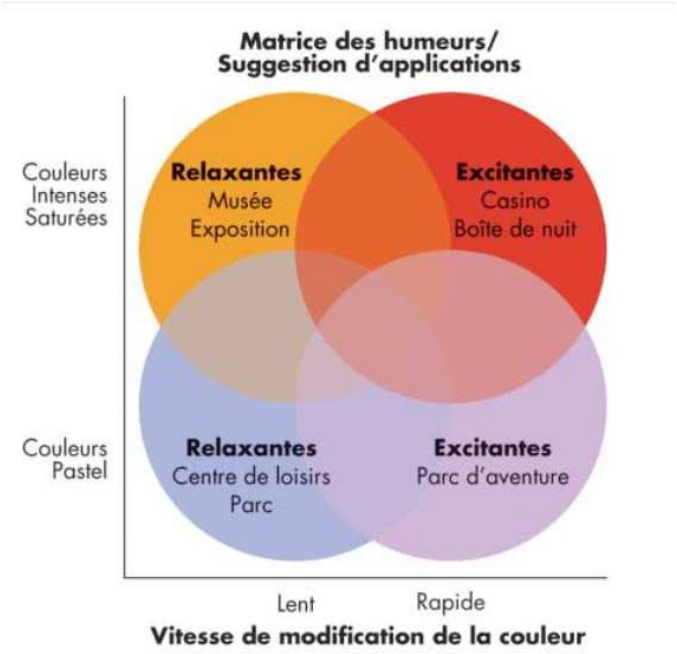


Figure 6-6. Couleurs d'éclairage et humeurs associées (Chaudron, 2005)

6.3.2.2 Taux d'éblouissement unifié (UGR)

L'éblouissement est une variable difficile à mesurer, car la lumière est directive et réfléchissante. L'éblouissement peut donc être direct ou indirect (réfléchi). De nombreuses méthodes (Wienold *et al.*, 2006) ont été définies avec l'objectif de définir un indice permettant de caractériser l'éblouissement. Parmi celles-ci, l'indice UGR (« *Unified Glare Ratio* », soit taux d'éblouissement unifié) est le plus communément utilisé (Fontoynont, 1999), en partie au sein des normes relatives à l'ambiance visuelle. Cet indice s'exprime en (8), à partir de variables spécifiques à la caractérisation de la lumière et en fonction de la position de l'observateur.

$$UGR = 8 \log \frac{0{,}25}{L_b} \sum_{i=1}^{n} \frac{L_i^2 \omega}{p^2} \tag{8}$$

L_b : luminance de fond (en candela/m²)
p : facteur de Guth, fourni dans des tables spécifiques, représentant la position d'un luminaire par rapport à l'axe vertical.
L_i : Luminance de la source d'éblouissement (en candela/m²)
ω : angle solide (stéradian) des parties lumineuses de chaque luminaire au niveau de l'œil de l'observateur.

UGR	Sensation
10	Perceptible
16	Acceptable
22	Inconfortable
28	Intolérable

Tableau 6-9. Echelle d'inconfort associée à l'UGR

Les sensations d'inconfort liées à l'éblouissement sont reportées au sein du tableau 6-8.

6.3.2.3 Critères du confort visuel

Contrairement au confort thermique, il n'existe pas d'indice général exprimant une forme globale de confort visuel, ni d'approche centrée utilisateur pour l'identifier. La forme la plus courante pour définir le confort visuel est en fonction de critères spécifiques, tels que nous les avons présentés dans cette section, et dont les valeurs recommandées sont détaillées sur le tableau 6-10.

Zones	Luminosité	UGR	Indice de rendu[69]
Zone de circulation et couloirs	100	28	40
Escaliers	150	25	40
Magasins, entrepôts	100	25	60
Magasins de vente	300	22	80
Zone de caisse	500	19	80
Espaces publics, halls d'entrée	100	22	80
Guichets	300	22	80
Restaurants, hôtels Réception, caisse, concierge	300	22	80
Cuisines	500	22	80
Bâtiments scolaires - Salles de classe en primaire et secondaire	500	19	80
Salle de conférences	500	19	80
Salle de dessin industriel	750	16	80
Eclairage des bureaux :			
– classement	300	19	80
– dactylographie, lecture	500	19	80
– poste CAO	500	19	80
– réception	300	22	80
– archives	200	25	80

Tableau 6-10. Valeurs recommandées par la norme NF EN 12464-1

La difficulté à exprimer le confort visuel en fonction de l'ensemble des critères physiques caractéristiques de la lumière est sans doute liée à l'importance de l'activité et à des aspects psychologiques. Par exemple, le confort visuel dans une pièce, comme un salon, est fortement dépendant de l'activité de la personne : travail (forte luminosité), lecture (luminosité localisée) ou loisirs multimédias (faible luminosité). Cependant, comme le montre le tableau 6-10, il est possible à activité connue de déterminer des relations entre le confort visuel et les grandeurs physiques. La mesure du confort visuel est donc fortement liée à la mesure de l'activité des occupants.

[69] Indice de rendu de couleur, permettant de quantifier la répartition spectrale d'une lumière par rapport à l'éclairage naturel.

6.3.3 La qualité de l'air

La qualité de l'air est caractérisée par une propriété spécifique, qui tend à ne pas utiliser le terme « confort » pour la désigner : certains composants sont imperceptibles, car inodores, mais peuvent avoir un effet très néfaste (voire mortel comme le CO résultant d'un mauvais chauffage) sur la santé, et le comportement des habitants, comme le souligne Roulet (Roulet, 2010) en présentant le « Syndrome du bâtiment malsain ». On tend ainsi à avoir deux approches de la qualité de l'air : une approche sanitaire, concernant les produits inodores (imperceptibles) ayant un risque potentiel pour la santé, et une approche olfactive (perceptible), comme l'odeur de tabac ou les odeurs de cuisine. Le tableau 6-11 reporte les sources de pollution courantes au sein des habitations.

Source	Polluants
Air extérieur : chauffages, transports	SO_2, NO_x, CO, hydrocarbures
Industries, nature, agriculture	Poussières, bactéries, spores, pollens
Occupants	Odeurs, CO_2, vapeur d'eau, particules
Tabac, feux ouverts	CO, aldéhydes, particules
Combustion de gaz	CO, CO_2, vapeur d'eau, NO_x, particules
Matériaux	Aldéhydes, amiante, solvants, composantes organique volatiles
Produits divers	Odeurs, solvants, COV
Terrain	Radon, méthane

Tableau 6-11. Sources courantes de pollution de l'air et polluants associés

La difficulté de la mesure de la qualité de l'air est double. Pour l'approche sanitaire, il y a les composants imperceptibles par l'humain, qui dégradent cette qualité de l'air, et dont le nombre important rend difficile la spécification de capteurs. Par exemple, le radon est issu de la radioactivité naturelle. Il est imperceptible, et sa mesure dépend d'un capteur spécifique, capable de détecter la radioactivité. Pour l'approche olfactive, l'agréabilité d'une odeur est subjective, et dans ce cas, les nez artificiels, faisant office de capteurs, ne peuvent donner d'indications certaines quant à l'inconfort lié à l'ambiance olfactive. Des analyses sensorielles doivent être menées en parallèle pour, statistiquement, prédire l'agréabilité d'une odeur.

Afin de définir des critères de confort liés à la qualité de l'air, des expérimentations empiriques ont été menées, sur des échantillons importants de personnes. Les résultats de ces expérimentations ont permis de déterminer des formules, exprimant alors le pourcentage d'insatisfaits lié à l'ambiance olfactive. Fanger (Fanger, 1988) détermina ainsi la formule (9) à partir de ces observations. Cependant, l'utilisation de cette méthode présente des difficultés dues à la nature des variables utilisées (Boulet, 2009), comme la concentration en odeurs corporelles qui est difficilement mesurable.

$$PD_{odeurs} = 395e^{\frac{-1,83}{C_i^{0,25}}} \tag{9}$$

Où :

- PD_{odeurs} : pourcentage d'insatisfaits lié aux odeurs de l'air intérieur (%)
- C_i : concentration en odeurs corporelles des personnes présentes dans la pièce (décipol)

Afin de pallier ces difficultés de mesure, des travaux rapportés par Emmerich (Emmerich *et al.*, 2003) montrent qu'un indicateur global peut être représentatif de la qualité de l'air : le CO_2. En effet, cette particule, étant produite par l'homme, qualifie la présence humaine ainsi que le renouvellement de l'air. Un taux élevé de CO_2 témoigne alors d'un nombre important de personnes dans l'espace, et/ou d'un manque de ventilation, traduisant probablement une forte concentration de polluants dans l'air. Des études (ECA, 1992) ont alors permis de déterminer la formule (10) à partir de la concentration de CO_2 intérieure et extérieure.

$$P_{ins} = 395e^{-15,15(CO_2^{int} - CO_2^{ext})^{-0,25}} \quad (10)$$

Où :

- P_{ins} : pourcentage d'insatisfaits lié aux odeurs de l'air intérieur (%) ;
- CO_2^{int} : concentration en CO2 de l'air intérieur (en ppm) ;
- CO_2^{ext} *:* concentration en CO2 de l'air extérieur (en ppm).

6.3.4 Le confort acoustique

Le confort de nature acoustique est, d'après une étude menée pour l'INSEE (Martin-Houssart *et al.*, 2002), la source première de gêne des habitants de grandes agglomérations. À l'échelle du territoire, il concerne 51 % des Français. Le confort acoustique dans les bâtiments est défini comme la maîtrise du bruit (CERTU, 2002). Cette maîtrise consiste principalement à diminuer les bruits indésirables perçus par les occupants. D'après Boulet (Boulet, 2009), une ambiance acoustique convenable dépend de trois critères, correspondant à la source des pollutions sonores (alors sources d'inconfort) :

- La pollution sonore intérieure, provenant des équipements, des déplacements, de l'activité ;
- La pollution sonore voisine, provenant des logements mitoyens ;
- La pollution sonore extérieure, provenant des transports, des bâtiments voisins (par exemple une école), des travaux à proximité, etc.

On caractérise le bruit par les critères d'intensité (niveau de bruit) et de fréquence. Ces deux critères sont fréquemment unifiés dans le contexte du confort acoustique, par l'unité dB(A). Cette unité permet de pondérer le bruit correspondant à chaque octave (en tenant compte de la fréquence), et ainsi d'obtenir une variable unique. La pondération s'effectue en fonction d'une courbe isosonique prévue à cet effet. Le dB(A) est notamment utilisé pour les normes en vigueur concernant le confort acoustique. Par exemple, la norme EN 15251 indique un niveau de pression acoustique pondéré compris entre 25 dB(A) et 40 dB(A) pour les pièces résidentielles.

Déterminer le confort acoustique est relativement simple en comparaison aux autres formes de confort que nous avons présentées, car il a une certaine forme de régularité due souvent à son origine humaine (surtout dans les villes). Ainsi, l'inconfort acoustique peut s'estimer en fonction de l'environnement tel que la proximité d'écoles, de voies de transports (routier, ferroviaire et aérien) et de commerces. Cette proximité, tout comme *a priori*, le voisinage, peut se prévoir et être corrélée avec des cycles actimétriques.

Le confort acoustique a également pour inconvénient de ne pas avoir de moyen dynamique de régulation de l'environnement intérieur, contrairement au confort thermique (par le chauffage et la climatisation), au confort visuel (par l'éclairage et les occultations) et à la qualité de l'air (par la ventilation ou la diffusion de parfums). On peut rarement contrôler le bruit, on ne peut que le limiter ou le subir. Ainsi, les méthodes orientées sur le bâti, comme celles présentées en section 6.2, s'avèrent être les seules pouvant quantifier une estimation du confort acoustique. Cette quantification, qui n'est donc pas subjective, explique probablement que le bruit soit la première source de gêne des habitants des grandes agglomérations.

6.3.5 Synthèse

La détermination du confort ainsi que la mesure de celui-ci est une vaste problématique. En effet, le confort est un critère important vis-à-vis des attentes des habitants envers un habitat, comme l'ont montré les études citées précédemment (Ekambi-Schmidt, 1972; Eggen *et al.*, 2003; Saizmaa *et al.*, 2008; Bonino *et al.*, 2011). Cependant, les aspects «humains » du confort rendent difficile la mise en œuvre de méthodes efficaces et satisfaisantes de gestion de l'habitat pour les habitants. Le tableau 6-12, issu des travaux de Boulet (Boulet, 2009), représente les paramètres d'ambiance d'un environnement intérieur, leur grandeur physique principale, ainsi que leur récepteurs associés à un domaine de confort.

Physique		**Physiologique**		**Psychosociologique**
Ambiances	**Gradeur principale des mécanismes physiques**	**Récepteurs**	**Voies nerveuses**	**Déclaration de confort**
Lumineuse	Luminance	Yeux		Visuel
Acoustique	Pression acoustique	Oreilles		Auditif
Thermique	Température	Peau		Thermique
Qualité de l'air	Concentration des polluants	Nez		Olfactif

Tableau 6-12. Phénomènes mis en jeu par rapport à la sensation de confort ressentie par l'individu, d'après Boulet (Boulet, 2009)

Déterminer le confort implique de déterminer les facteurs qui conduisent à une perception d'agréabilité, ou de neutralité selon la définition du confort que l'on retient. Ces facteurs sont bien souvent subjectifs aux personnes, difficilement quantifiables et dans la plupart des cas difficilement mesurables. La plupart des approches utilisées actuellement visent à sélectionner un nombre restreints de facteurs, les plus représentatifs. Par exemple la concentration de CO_2 dans l'air pour la qualité de l'air, ou, industriellement, la température de l'air pour le confort thermique.

6.4 Discussion : le confort multisensoriel

Nous avons vu au cours de ce chapitre plusieurs approches du confort. Deux définitions se distinguent pour le définir : la première concerne la définition du confort par l'absence d'inconfort, la seconde oriente le confort vers un état de bien-être et d'agréabilité. Lorsque l'on souhaite étudier le confort, il convient aussi de préciser sa portée. Ainsi, l'on parle de confort physiologique, de confort social, etc. Appliqués à l'habitat, ces types de confort se différencient : les aspects sociaux (le voisinage de l'habitat), des aspects psychologiques (habiter dans sa région natale) et des aspects sensoriels (confort des ambiances) (Chelkoff, 2002). La figure 6-7 situe ces différents aspects entre l'habitat et l'habitant.

Dans le cadre de nos travaux, nous étudierons le confort multisensoriel c'est-à-dire portant sur les paramètres : thermique, qualité de l'air, éclairage et acoustique. Ces quatre formes sont chacune associées à un sens perceptif de l'habitant : thermique/toucher, visuel/vue, qualité de l'air/odorat, acoustique/ouïe, c'est pourquoi on parle de *confort multisensoriel*. On fait souvent l'hypothèse de considérer que le confort thermique n'influe pas de manière signifiante sur le confort visuel, et vice-versa : il s'agit de méthodes mono sensorielles. Cela n'est vrai qu'en première approximation, autour des valeurs nominales de neutralité.

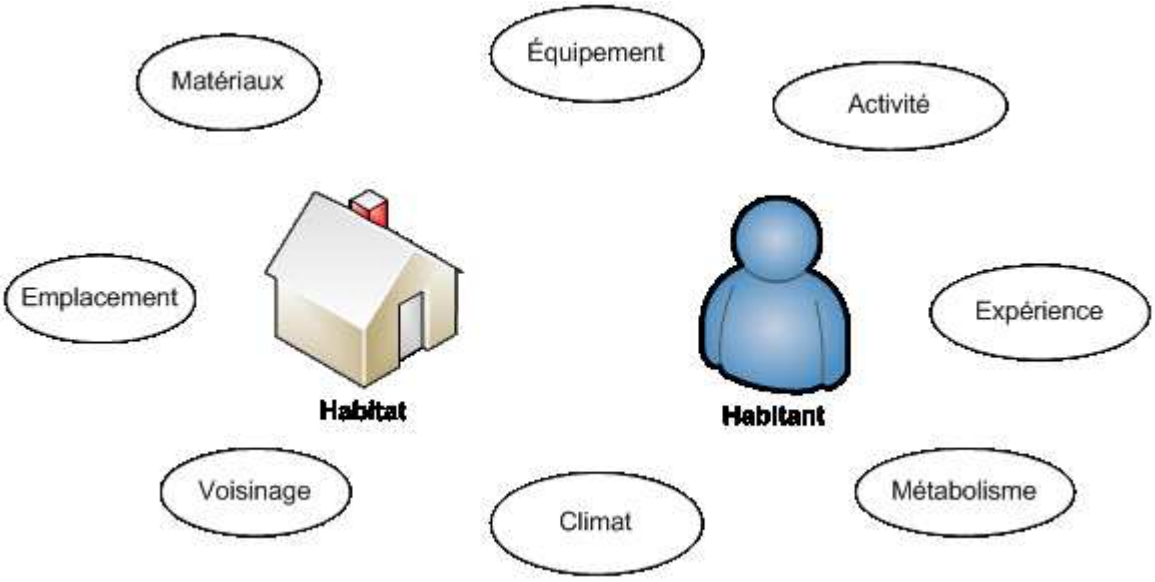


Figure 6-7. Critères de confort liés à l'habitat et l'habitant

Or, certains liens existent entre les différentes catégories de confort. Ces liens peuvent être évidents : par exemple, l'humidité est un critère utilisé à la fois pour déterminer le confort thermique (notamment pour le modèle de Fanger vu à la section 6.3.1.2 ainsi que l'indice WGBT vu à la section 6.3.1.1) et la qualité de l'air (les normes imposant des seuils d'humidité relative). Dans ce cas, la régulation du confort hygrothermique peut être contrariée, l'humidité étant à la fois une variable de régulation pour les ventilations et pour le chauffage, régulations pouvant avoir des objectifs différents. Par exemple, une ventilation hygroréglable peut avoir pour objectif de réduire l'humidité relative d'un logement, dans une situation ou l'humidité favorise le confort thermique (selon les méthodes vues en section 6.3.1).

Une autre forme de lien entre les différentes catégories de confort est due à la perception sensorielle humaine. En effet, très tôt, les recherches ont montré des liens entre différentes modalités sensorielles et le confort. Un exemple concerne les couleurs d'éclairage, domaine visuel, que l'on qualifie de chaudes ou de froides ; adjectifs thermiques. Des travaux ont, par la suite, défini d'autres liens entre les types de confort. Woods (Woods, 1979), par exemple, a établi un lien entre la perception olfactive et l'enthalpie de l'air. Cain (Cain *et al.*, 1983) montre dans ses recherches que des températures chaudes et une humidité relative élevée décuplent les problèmes liés à l'odorat.

Centnerovà et Boerstra (Centnerovà *et al.*, 2010), dans une étude intitulée « *Comfort is just more than thermal comfort* », relèvent deux types d'interaction entre les quatre formes de confort que nous avons présentées précédemment (section 6.3) :

- Si deux ou plusieurs paramètres sont (légèrement) en dehors des bornes préférées, est-ce qu'ils se complètent ou ont-ils des effets indépendants ? (par exemple si l'ambiance est un peu fraîche, se sentirait on plus réchauffé/refroidi si l'ambiance est également un peu trop bruitée) ;
- Est-il possible de contrer un effet négatif avec un positif ? (par exemple une ambiance trop bruitée, mais très lumineuse).

Ces interactions nous conduisent à étudier le confort d'une manière globale, en prenant en compte les liens entre les différents types de confort « mono-sensoriels », afin de définir une notion multisensorielle du confort.

6.4.1 Liens entre conforts

Confort thermique et confort visuel sont souvent confrontés, avec notamment des relations supposées entre la luminosité et la perception thermique, ainsi que la relation entre les températures (couleurs) d'éclairage et la perception thermique. Cette hypothèse est ancienne, et se révèle au quotidien. Par exemple, on utilise pour certains thermostats du bleu et du rouge pour représenter respectivement le froid et le chaud, devenant même un critère ergonomique. Fanger, déjà cité pour le modèle PMV et PPD, a mené une étude (Fanger *et al.*, 1977) dans une chambre climatique, testant alors plusieurs ambiances lumineuses en maintenant des paramètres thermiques fixes. Suite à cette étude, il conclut que l'interaction était si faible qu'elle pouvait être considérée comme insignifiante. Candas et Dufour (Candas *et al.*, 2005) ainsi que Webb (Webb, 2006) sont plus réservés dans les conclusions des études similaires qu'ils ont menées.

Dans leur étude, Candas et Dufour (Candas *et al.*, 2005) ont maintenu, dans une chambre climatique au sein de laquelle était appliquée une ambiance thermique « légèrement chaude », 48 sujets soumis à deux éclairages différents : l'un « chaud » (2700°K), l'autre froid (5000°K). Les résultats obtenus montrent que le confort thermique perçu par les participants était meilleur à l'éclairage froid qu'à l'éclairage chaud, la différence étant faible mais selon les auteurs, significative. Ils expliquent en conclusion de cette étude que ce lien entre température d'éclairage et perception thermique se concrétise par une vasodilatation sous une forte luminosité, ainsi qu'une température d'éclairage faible (chaude). Cette vasodilatation influe alors physiologiquement sur la température interne du corps, donc sur le confort thermique.

Webb (Webb, 2006), dans son étude à propos des effets non-visuels de la lumière, décrit l'importance de la lumière pour le corps humain, au-delà du seuil de perceptibilité et du lien avec le confort thermique. L'auteur explique ainsi qu'un bon éclairage a des effets sur la sécrétion de plusieurs hormones, comme la mélatonine, et favorise l'assimilation des vitamines D. Les conséquences sont nombreuses, notamment sur la qualité du sommeil, sur l'humeur et sur l'attention des personnes : traitement cognitif et concentration (Gifford, 1988; Boray *et al.*, 1989; Bellia *et al.*, 2011). Ainsi, le confort visuel s'exprime au-delà du sensoriel, la lumière étant, en son abondance, source de bien-être ou, en son absence, source de mal-être, comme en témoignent les dépressions hivernales dans les zones géographiques proches des pôles.

Si les liens entre conforts thermique et visuel ont une place majeure au sein de la littérature, d'autres liens ont également été révélés par certains travaux. Par exemple, des expérimentations où sont intervenus Clausen et Fanger (Clausen *et al.*, 1993; Fang *et al.*, 1998) mettent en évidence un lien entre la température opérative, critère du confort thermique, ainsi que la perception de la qualité de l'air. Ces travaux se justifient physiquement, la température traduisant une forme d'énergie moléculaire qui influe sur la composition de l'air, ainsi que sur la concentration des composants perceptibles.

Ces liens remettent en cause l'indépendance des conforts « mono-sensoriels » tels que nous les avons présentés, ce qui s'avère plus difficile pour définir le confort de manière globale.

6.4.2 Le confort global

Les liens entre types de confort, présentés ci-dessus, posent alors une difficulté accrue dans l'objectif d'obtenir un environnement intérieur confortable : l'optimisation de chaque domaine de confort ne suffit pas, les liens entre ces conforts doivent être intégrés.

Peu de travaux ont eu lieu dans l'objectif de définir une méthodologie de mesure du confort multisensoriel global au sein d'un bâtiment. Rohles, Woods et Morey (Rohles *et al.*, 1989) ont mené une étude visant à développer un indice de confort global de l'environnement intérieur. Pour cette étude, le questionnaire reproduit en figure 6-8 a été soumis à 200 sujets. Chaque sujet devait ainsi restituer sa perception de l'environnement, en pondérant les quatre domaines principaux (acoustique, qualité de l'air, éclairage et thermie). Chaque pondération était ensuite détaillée en fonction des constituants de chaque domaine. Les résultats issus de ce questionnaire furent analysés pour déduire une échelle multicritère, en pondérant alors les jugements subjectifs. Sur cette échelle, les 12 variables sont alors notées de 1 (totalement inacceptable) à 6 (très acceptable), et sont pondérées par les coefficients issus de l'étude.

Cette approche présente l'avantage de déterminer le confort d'une manière globale, et totalement subjective puisqu'aucun paramètre de l'environnement (grandeur physique) n'intervient. Cependant, elle présente une limitation majeure, reconnue par les auteurs : si une variable est jugée totalement inacceptable, et que les autres sont satisfaisantes, le mécanisme de pondération jugera alors l'environnement comme satisfaisant. Par exemple, pour un individu notant toutes les variables comme acceptables (5), à l'exception de la fumée de cigarette qui est notée totalement inacceptable (1), la note pondérée sera de 4,6, soit acceptable. Il est fort imaginable que cela ne reflète pas le confort de l'utilisateur, certaines valeurs et certains types d'inconfort pouvant être critiques

Dans cet exemple de fumée de cigarette, il serait intéressant d'analyser l'impact de l'inconfort sur les autres critères. En effet, cette odeur de cigarette peut influer sur les scores de l'odeur et de la ventilation. En autre mesure, les liens entre le confort que nous avons vus à la section précédente indiquent que, en conditions gênantes, d'autres notes pourraient être dégradées, même si elles avaient été jugées acceptables en temps normal. Haldi et Robinson (Haldi *et al.*, 2010a) rapportent ce comportement comme un « effet de revanche », d'après le terme de Leeaman et Bordass (Leaman *et al.*, 1999), qui traduit la frustration des occupants quant à leur problèmes d'interactions avec le bâtiment.

Part 1		**Part 2**		
A_____	Acoustics	The acoustical environment		
			____	Loudness
			____	Pitch
			____	Distracting sounds
		(A)	____	Total (from part 1)
B_____	Air Quality	The environmental air quality		
			____	Odor
			____	Dust
			____	Tobacco Smoke
		(B)	____	Total (from part 1)
C_____	Lighting	The lighting environment		
			____	Brightness
			____	Glare
			____	Shadows
		(C)	____	Total (from part 1)
D_____	Thermal	The thermal environment		
			____	Temperature
			____	Humidity
			____	Air movement
		(D)	____	Total (from part 1)
100%	Total indoor environment			

Result mean	**%**
Temperature	15.8
Brightness	11
Tobacco smoke	9.9
Loudness of the sound	8.7
Noisy distractions	8.6
Lighting glare	7.9
Odor	7.5
Air movement	7.2
Humidity	7.1
Dust	6.6
Shadows	5.1
Pitch	4.6

Figure 6-8. Questionnaire et résultat pour mesurer l'acceptabilité de différents paramètres intérieurs (Rohles *et al.*, 1989)

Bruant (Bruant, 1998) rapporte cette limitation en signifiant que cette approche suppose une additivité des inconforts. Il suggère ainsi une méthode de pondération non-linéaire afin de prendre en compte des valeurs ayant un écart important avec la note finale. Cette approche de pondération non-linéaire est notamment reprise dans des travaux liés à la perception sensorielle. En 2002, Ernst et Banks (Ernst *et al.*, 2002) ont ainsi réalisé une expérimentation afin de comprendre les liens entre des modalités visuelles d'une part, et haptiques de l'autre. Leurs résultats indiquent que la sensation produite par ces deux modalités peut être prédite de manière probabiliste, par une technique de fusion de capteurs. Des travaux similaires affirment ces résultats, indiquant ainsi une additivité sensorielle (Stein *et al.*, 2008; Ma *et al.*, 2008; Angelaki *et al.*, 2009; Hospedales *et al.*, 2009). Une sensation, telle que le confort sensoriel, serait ainsi issue du traitement simultané par le cerveau de plusieurs perceptions, telle que la perception thermique, la perception visuelle, la perception olfactive ainsi que la perception acoustique.

De nombreux travaux ont eu lieu pour comprendre le lien entre les stimuli (grandeurs physiques) d'un environnement et la perception, classant ainsi le confort comme une représentation globale, un résultat d'ensemble. Il n'y aurait donc pas plusieurs conforts sensoriels (thermique, visuel, acoustique, olfactif), mais un confort qui se construirait sur l'ensemble des perceptions. Delepaut (Delepaut, 2007), dans son analyse cognitive du confort, ouvre ainsi une discussion sur la perception synesthésique du confort global (en figure 6-9). Dans ce contexte, la synesthésie n'est pas une pathologie, comme le prétend trop souvent le corps médical (trouble de la perception), mais une propriété humaine conduisant à des interactions entre modalités sensorielles. Dans cette hypothèse, le confort serait un concept construit à partir de la perception simultanée des modalités sensorielles.

« *Les approches psychologiques de la synesthésie présupposent que la perception se construit à partir de phénomènes analytiques. Les différents phénomènes sensoriels seraient ensuite couplés pour pouvoir identifier un objet. On sera donc conduits à discuter, à partir du concept de confort, dans quelle mesure la perception des objets du monde peut être considérée comme la somme des composantes sensorielles, ou au contraire, s'inscrivent dans une perception globale, à propos de laquelle le courant Gestaltiste dès les années 1930, avait déjà avancé des arguments* »

Figure 6-9. Discussion sur le lien entre la perception synesthésique et la notion de confort (Delepaut, 2007)

7 Méthode adaptative du confort multisensoriel pour l'habitat intelligent

Au chapitre précédent, nous avons étudié différentes approches couramment utilisées pour définir le confort au sein des habitats. Nous avons vu que ces approches ont des limitations, notamment dues à la subjectivité du confort.

L'habitat intelligent offre de nouvelles possibilités pour une étude du confort sensoriel plus fine et plus proche de l'utilisateur. L'instrumentation de l'habitat, tel que présenté durant la première partie de ce mémoire, permet d'augmenter la densité et la variété des données sur l'espace de vie. Il est ainsi possible de mesurer les paramètres physiques ambiants, comme la température, l'humidité, la luminosité. Il est également rendu possible à l'habitant de modifier ces paramètres, par des interactions avec des objets communicants.

Or, les objets communicants sont capables de fournir des indications jusqu'ici pas ou peu exploitées : les modifications de l'ambiance souhaitées par les utilisateurs. Nous proposons dans ce chapitre d'utiliser ces informations dans le but de mesurer le confort des habitants.

« *Mesure tout ce qui est mesurable, et rend mesurable tout ce qui ne l'est pas.* »

Galilée

7.1 Approche adaptative pour le confort de l'habitat intelligent

La recherche de confort est, d'après Duss et Salamolard (Duss *et al.*, 2005), l'objectif principal des acquéreurs de maisons intelligentes. Nous avons vu au chapitre précédent un panorama de la diversité des approches des conforts applicables à l'habitat. Ces approches se distinguent en deux catégories : le confort induit par la structure du bâtiment et le confort ressenti par les habitants. Ce dernier type de confort est particulier par la nature dynamique de sa régulation qui fait intervenir les occupants afin de maintenir un environnement intérieur confortable. Les méthodes actuelles décomposent l'environnement intérieur en quatre domaines principaux : le thermique, le visuel, l'olfactif et l'acoustique. Ces quatre domaines forment alors une ambiance, et, définissent ainsi, dans leur ensemble, le confort d'ambiance, que nous nommons le confort multisensoriel.

La problématique du confort réside en sa mesure. Afin de mesurer le confort, il convient de connaître les éléments qui le constituent. Les approches parcourues à la section 6.3 définissent ainsi des indicateurs pour les principaux domaines. Cependant, ces indicateurs sont complexes à mesurer *in situ.* La figure 7-1, d'après les travaux de Bonhomme (Bonhomme, 2008), illustre ainsi certains de ces indicateurs (à gauche de la figure), comme le métabolisme de la personne, sa vêture ainsi que son activité physique. Cette part de données est difficilement intégrable *ex vitro* (hors conditions expérimentales), et les résultats obtenus ne sont pas toujours satisfaisants. Par exemple, le modèle de Fanger (cf. section 6.3.1.2) prédit une part invariante de 5% de personnes qui seront insatisfaites quant à l'ambiance thermique.

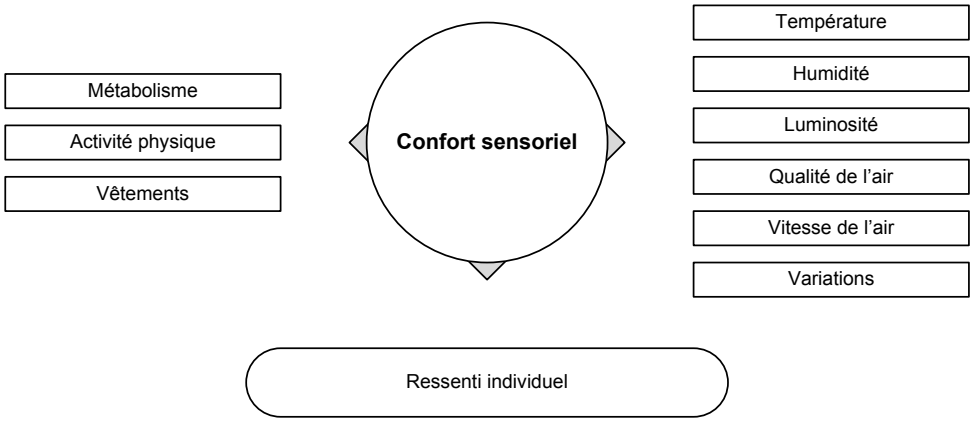


Figure 7-1. Facteurs du confort sensoriel (Bonhomme, 2008)

Afin de pallier les difficultés de mesure des différents critères du confort sensoriel, plusieurs méthodes existent. Nous avons évoqué en section 6.3.1.3 l'approche dite adaptative proposée par Humphreys (Humphreys *et al.*, 1998) qui énonce le principe : « *Si un changement se produit de manière à produire de l'inconfort, les gens réagissent dans un sens qui tend à restaurer leur confort* » [70]. Dans le contexte d'Humphreys, cette définition concerne l'occupant d'un bâtiment et son adaptation thermique. Cette adaptation s'exprime sous plusieurs formes, comme l'adaptation vestimentaire où l'occupant préférera des tenues courtes en été et des tenues longues en hiver. Il réagira également de manière spontanée, changeant son habillement en fonction des sensations qu'il éprouve. Cette méthode permet, à partir d'un échantillon représentatif d'une population, de définir une température du confort en fonction de la température extérieure, pour l'ensemble de la population.

Mozer, auteur de la « maison adaptative » détaillée au paragraphe 2.3.2.3.1, a également proposé une approche adaptative pour le confort appliqué à l'habitat. Selon ses travaux, l'adaptation est le moyen de mesure des préférences des habitants. Il indique ainsi que « *quand les habitants ajustent manuellement des consignes d'ambiance, c'est une indication que leurs besoins n'ont pas été satisfaits* »[71] (Mozer, 1998). Cette adaptation est ainsi, pour l'auteur, un signal servant à l'apprentissage de seuils de confort pour un critère spécifique, en vue d'optimiser le confort.

Ces deux notions de confort adaptatif sont convergentes dans leurs définitions, et divergentes dans leur application. Pour Humphreys, cette adaptation permet de simplifier des grandeurs complexes, impossibles à mesurer ou à prévoir, en vue de produire un indicateur de confort, à partir de données collectées *in vitro*, sur un échantillon représentatif d'une population. Les facteurs complexes à mesurer, tels que le taux d'activité métabolique ou l'habillement, sont ainsi induits au contexte de la mesure et d'application de la méthode. Pour Mozer, l'adaptation est le moyen de mesure de l'inconfort des occupants, *in vivo*, à l'échelle d'un foyer et de manière relative au comportement des membres de ce foyer.

Afin de mesurer le confort dans un habitat intelligent, nous proposons une méthode centrée sur les objets intelligents. Nous avons vu précédemment que le confort est une notion complexe, dans sa mesure et dans les mécanismes physiologiques et psychologiques propres à sa perception. Les objets intelligents, par leurs aptitudes à communiquer et à traiter les données, peuvent alors intervenir de plusieurs manières pour la modélisation du confort d'ambiance :

- Les objets dotés de fonctions de perception de l'environnement peuvent communiquer les grandeurs physiques de leur environnement proche : température ambiante, luminosité, etc.
- Les objets dotés de fonctions de réaction sur l'environnement peuvent communiquer la nature et quantifier les contributions qu'ils fournissent à l'ambiance : contributions thermiques (radiateur), contributions visuelles (lampe), contributions olfactives (ventilation), contributions sonores (appareil bruyant). Ces contributions peuvent être multiples, par exemple, une ventilation contribue de manière thermique, olfactive et acoustique à l'environnement.

[70] « If a change occurs such as to produce discomfort, people react in ways which tend to restore their comfort. »

[71] « When inhabitants manually adjust environmental setpoints, it is an indication that their needs have not been satisfied »

– Certains objets, comme les thermostats, interrupteurs et fenêtres, peuvent indiquer, lorsqu'ils sont manipulés par un habitant, une intention destinée à réduire l'inconfort.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, il existe deux états du confort : un état confortable et un état inconfortable. La transition de l'état confortable à l'état inconfortable dépend des dynamiques de l'ambiance, et se concrétise par des interactions de l'utilisateur sur les objets intelligents de l'habitat. Cette interaction a pour but, d'après le principe adaptatif, de restaurer une situation de confort. La dynamique de l'ambiance est alors modifiée, en conséquence de cette interaction, pour être perçue comme confortable. C'est pourquoi l'analyse de cette interaction peut nous permettre de déduire quel était le facteur d'inconfort.

7.2 Le confort : un jugement d'ambiance

Nous avons vu, au cours du chapitre précédent, que le confort était un jugement subjectif d'une personne envers quelque chose (Sèze, 1994; Delepaut, 2007), et qu'il convient alors de préciser le cadre de jugement. Dans le cadre de l'habitat intelligent, il y a ainsi plusieurs types de conforts. En particulier quatre types, ou domaines de confort qui constituent une notion de confort d'ambiance : le confort thermique, le confort visuel, la qualité de l'air ainsi que le confort acoustique. Mesurer le confort revient, dans ce contexte, pour chaque type de confort à mesurer et confronter les variables physiques de l'environnement avec le jugement d'une personne envers ce même environnement. En ce sens, il convient de modéliser en premier lieu une ambiance, afin de pouvoir ensuite comprendre le jugement de confort qui lui est attribué.

7.2.1 Besoins pour caractériser l'ambiance

L'approche classique d'une modélisation d'ambiance se veut centralisée sur la mesure. Des capteurs spécifiques mesurent des grandeurs physiques qui servent alors de seul repère pour situer une ambiance. Ainsi, l'ambiance est humide ou sèche en fonction de la mesure d'humidité relative, lumineuse ou sombre en fonction de la mesure de l'intensité lumineuse, chaude ou froide en fonction de la température de l'air. Le résultat de cette approche est directement lié à la performance des capteurs, à leur emplacement et à leur densité.

Cependant, les capteurs ne sont pas parfaits et présentent des limitations. Les approches existantes (cf. section 6.3) sur la détermination de critères de confort indiquent qu'une seule grandeur physique n'est pas représentative du confort. Par exemple, le confort visuel dépend de l'intensité lumineuse, de la répartition lumineuse dans l'espace (afin d'éviter l'éblouissement) ainsi que de la qualité de l'éclairage (répartition spectrale). Une simple sonde de luminosité, dans ce cas, ne permet de mesurer que partiellement l'intensité lumineuse. De plus, la lumière étant directive et la sonde fixe, la mesure fournie par ce capteur peut être différente de celle perçue par l'occupant. La mesure est donc « subjective » au capteur, et non à la personne. Or, la densité d'informations dans le bâtiment intelligent est telle que nous pouvons utiliser un plus grand nombre d'indicateurs.

L'objet intelligent, comme nous l'avons présenté en première partie (chapitre 3), est un objet doté de capacités de perception de l'environnement, de réaction, ainsi que de dispositifs de traitement de données et de communication. De manière classique, ces objets évoluent dans un espace de données fini : ils sont conçus pour un domaine d'application et des tâches prédéterminées, prévues par le concepteur. Ainsi, ils exécutent des tâches en fonction de leur application, spécifiée par les modèles que nous avons illustrés en première partie. Par exemple, un capteur de température sera doté d'un moyen de mesure de température. Cette mesure sera traitée et stockée localement par une unité de traitement de donnée, et sera communiquée par le biais d'une interface utilisateur (un écran LCD par exemple) ou par le biais d'un réseau de communication.

L'une des problématiques dans cette approche est qu'un certain nombre de variables, pourtant connues du concepteur de l'objet, ne sont pas ou peu considérées dans son application. Par exemple, une lampe variable communiquera aux autres objets son état, selon les modalités que nous avons développées précédemment en fil rouge (cf. section 4.1.3). Or, des informations complémentaires peuvent être fournies par cet objet, comme sa consommation instantanée (sachant son état), sa luminance ou le dégagement de chaleur qu'elle produit. Ces variables sont en effet connues du fabricant, et parfois fournies en annexes techniques associées à l'objet.

Or, ces informations peuvent être utilisées afin d'étendre l'espace de contribution des objets intelligents de l'habitat. Une lampe par exemple, connaissant ses caractéristiques et ayant une connaissance de certaines variables d'environnement, peut situer son apport lumineux. Elle peut ainsi indiquer, en fonction de son état, et des apports naturels, si elle contribue à l'ambiance lumineuse. Notre approche se base ainsi sur la notion d'objet ambiant pour la définition de l'ambiance. Cette notion intègre le fait qu'un objet participe à l'ambiance, et est capable de se situer vis-à-vis de l'ambiance.

Dans nos travaux, nous proposons qu'un objet intelligent fournisse toutes les informations dont il a connaissance, que ces informations soient statiques ou dynamiques. L'ensemble de ces informations, calibrées en fonction du contexte (localisation), et éventuellement ajustées en fonction d'une sonde, forment alors un repère d'ambiance. Nous avons privilégié une approche décentralisée et distribuée. La contribution majeure de cette approche est d'évaluer un ensemble d'entités plutôt qu'un ensemble par des entités. Une telle approche a déjà été proposée dans des travaux passés, liés à l'architecture (Woloszyn *et al.*, 1998), que nous reprenons et adaptons à notre contexte ci-après.

7.2.2 Le repère d'ambiance

Woloszyn et Siret (Woloszyn *et al.*, 1998) ont proposé, dans un article intitulé « *Du complexe au simplexe* », une notion d'objet ambiant, dans l'objectif de mesurer une ambiance. Dans ce contexte, les auteurs remarquent la difficulté de qualifier et mesurer une ambiance, et proposent de la décomposer. Cette décomposition ne s'effectue pas en termes de grandeurs physiques, mais en termes de contributions des différents objets qui composent cette ambiance. Les objets ambiants, alors des simplexes, participent ainsi par leurs regroupements à la définition complexe de l'ambiance.

Dans ces travaux, les objets ambiants sont disposés sur un repère d'ambiance en trois dimensions, illustrées en figure 7-2 :

- La présence, correspondant à l'intensité de la contribution perçue de l'objet (liminal, subtil, flagrant, intense) ;

- La proximité, correspondant à la présence spatiale de l'objet (point, ligne, tache, enveloppe) ;
- La prégnance, correspondant au comportement temporel de l'objet (inattendu, éventuel, régulier, permanent).

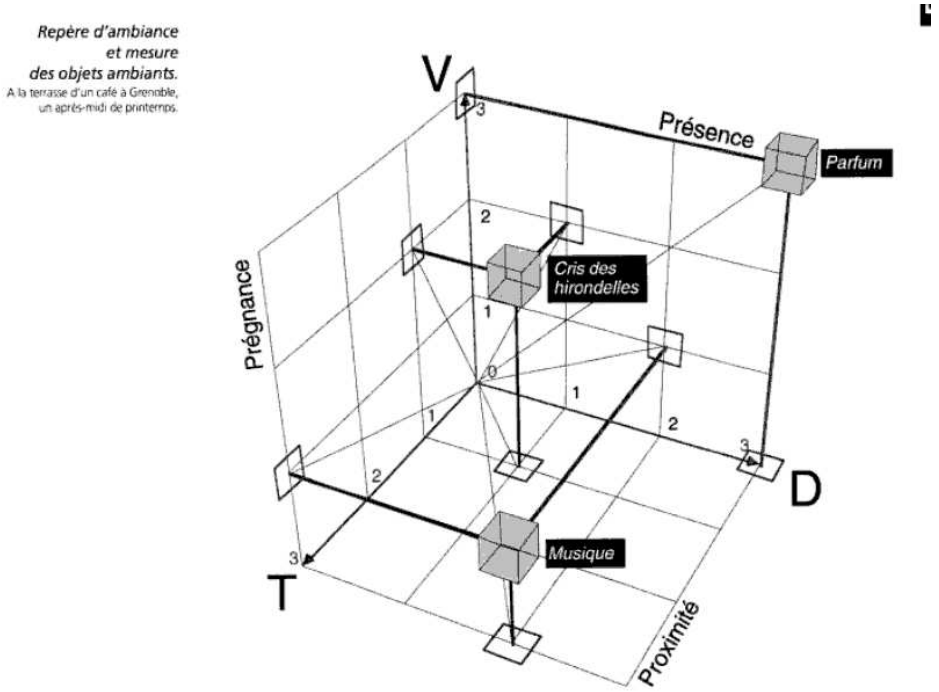


Figure 7-2. Mesure d'une ambiance par contributions des objets, extrait de (Woloszyn *et al.*, 1998).

Chacune de ces dimensions positionne l'objet sur des critères de perception humaine (sensorielle), et non des critères de perception physique (machine). Ce repère d'ambiance induit des notions subjectives, sans toutefois porter de jugement quant à leur agréabilité et au confort. Cette approche est compatible avec notre objectif. Cependant, elle implique qu'une personne qualifie chaque objet, et le positionne. Ainsi, cette caractéristique ne permet pas son utilisation pour une modélisation « *in silicio* », c'est à dire de manière informatisée.

Le modèle de Woloszyn et Siret présente une approche originale par rapport aux approches présentées précédemment : la mesure d'une ambiance par ses constituants. Cette méthode est applicable aux bâtiments : l'environnement intérieur diffère de l'environnement extérieur par le bâti ainsi que par divers objets (lampes, radiateurs, ventilation) dont le rôle est de modifier artificiellement l'ambiance intérieure. Dans l'hypothèse où ces objets sont intelligents, ceux-ci peuvent eux-mêmes se situer dans un repère d'ambiance adapté.

En se basant sur cette transposition du modèle de Woloszyn et Siret dans le bâtiment intelligent, nous proposons un repère d'ambiance propre aux bâtiments, dans le but de qualifier un environnement par des critères représentatifs du confort. Ce repère, spécifique à notre contexte, est composé en quatre sous modèles, chacun correspondant à un domaine sensoriel. Chaque sous repère dispose alors de deux dimensions : la nature de la contribution, spécifique, ainsi que l'intensité de la contribution. Le tableau 7-1 présente chacun de ces domaines, ainsi que l'échelle qui lui est associée.

Domaine	Echelle « nature de la contribution »		
Thermique	Froid	Neutre	Chaud
Visuel	Sombre	Neutre	Lumineux
Olfactif	Pur	Neutre	Vicié
Acoustique	Calme	Neutre	Bruyant

Tableau 7-1. Repère d'ambiance à quatre dimensions proposé pour l'étude

Ce repère peut être peuplé à partir de données issues de sondes spécifiques à chaque domaine : des sondes de température, des sondes de luminosité, des sondes d'humidité, de $C0_2$, voire un nez artificiel. Cependant, il peut également être formulé à partir des objets sources des contributions de chacun des domaines, ce que nous proposons d'étudier ci-après.

7.2.3 Identification de l'ambiance par les objets

Afin de caractériser une ambiance pour qu'elle puisse être confrontée au jugement des occupants, nous proposons le repère d'ambiance décrit en section précédente, permettant d'associer à chaque domaine sensoriel les différentes contributions des objets intelligents. Pour ceci, nous avons associé à chaque objet intelligent un modèle de contribution. Une ambiance résulte de deux types de contributions : les contributions extérieures, fréquemment dénommées apports naturels, et les contributions internes, de nature artificielle. La contribution dépend en premier lieu de l'objet et peut être évaluée en fonction de l'ambiance par une mesure issue des capteurs, servant alors d'étalon à l'intensité de la contribution. Nous présentons ainsi deux modèles génériques de contribution des objets à l'ambiance.

Le premier de ces modèles concerne les apports artificiels des objets à l'ambiance. Ce modèle, décrit en figure 7-3, associe à un objet une ou plusieurs contributions. Par exemple, une lampe contribue visuellement à l'ambiance, et, en moindre mesure, thermiquement (par effet Joule). Ces contributions sont proportionnelles à l'état de l'objet, dans le cas de la lampe, allumée ou éteinte. Il est possible d'évaluer ces contributions en fonction des caractéristiques techniques de la lampe, par exemple, en fonction de son type (LED, fluorescent, incandescent) ou de sa manufacture. Ainsi, l'on est capable de situer l'objet sur l'axe « nature de la contribution » du repère d'ambiance.

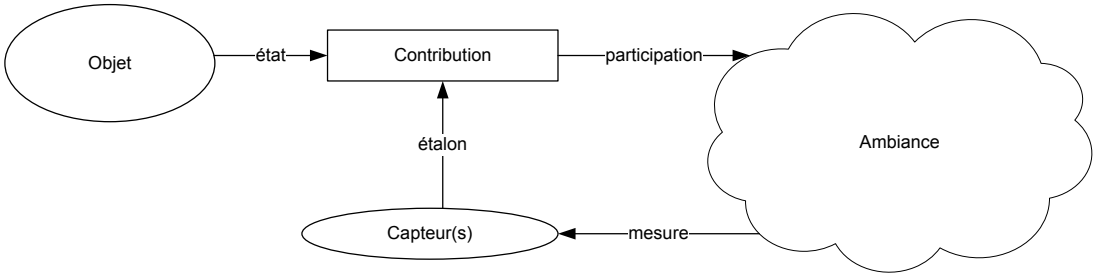


Figure 7-3. Modèle de contribution des apports artificiels d'un objet ambiant

L'intensité de la contribution est cependant dépendante de l'ambiance. Suivant le même exemple, une lampe allumée contribuera peu à l'éclairement d'une zone déjà éclairée de manière naturelle, par la lumière du jour. Ainsi, un ou plusieurs capteurs peuvent, par leur mesure, étalonner le modèle de contribution qui pourra alors placer l'objet sur l'axe « intensité » du repère d'ambiance.

Le second modèle, illustré en figure 7-4, s'applique aux objets dont les contributions sont issues de l'environnement extérieur, comme les fenêtres et les volets. Dans ce cas, l'objet s'apparente à un filtre : filtre de lumière, filtre d'air ou filtre de bruit. Les caractéristiques de la contribution dépendent de l'état de l'objet ainsi que des caractéristiques de l'environnement extérieur. Ces caractéristiques déterminent en particulier la nature de la contribution au sein du repère d'ambiance. Par exemple, une fenêtre peut avoir une contribution thermique, olfactive et acoustique. Pour le cas de la contribution thermique, la nature de l'apport, chaud ou froid, dépend de la différence entre la température intérieure et extérieure. L'intensité de cette contribution dépendra également de l'ampleur de cette différence.

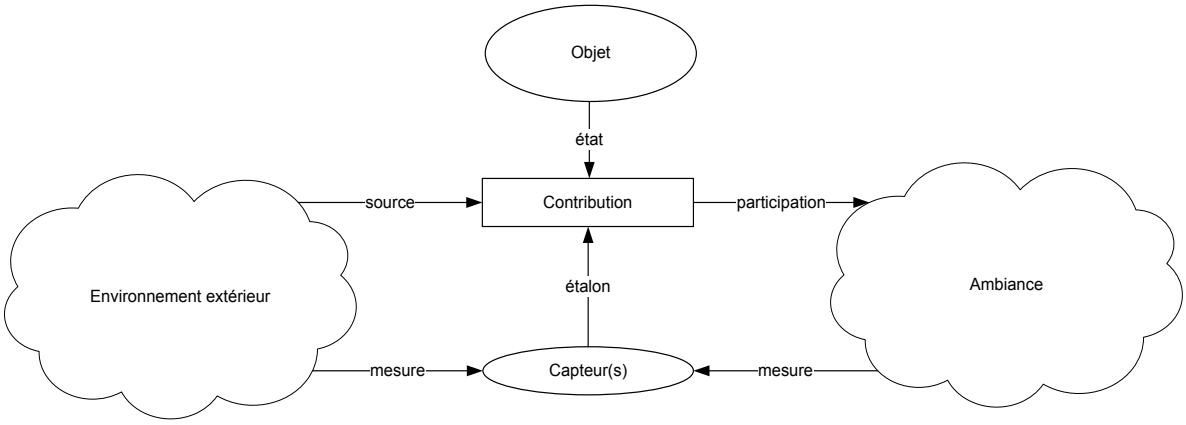


Figure 7-4. Modèle de contribution des apports naturels d'un objet ambiant

Nous avons synthétisé, au sein du tableau 7-2, les différents domaines de contributions qui peuvent être associés à des objets courants de l'habitat, ainsi que les mesures dépendant des modèles de contribution.

Objet	Thermique	Visuel	Olfactif	Acoustique
Lampe	Minime	Fonction de l'état et apport naturels	Nulle	Nulle
Radiateur	Fonction de l'état et de la température intérieure	Nulle	Minime	Nulle
Ventilation	Fonction de la température intérieure et extérieure	Nulle	Fonction de l'état	Fonction de l'état
Fenêtre	Fonction de la température intérieure et extérieure	Nulle	Fonction de l'état	Fonction de l'état
Volets	Fonction du rayonnement solaire	Fonction du rayonnement solaire et de la luminosité interne	Nulle	Minime, Fonction de l'état

Tableau 7-2. Contributions par domaine des objets au repère d'ambiance

7.3 L'évaluation de l'ambiance par l'occupant

Nous avons vu au cours du chapitre 6 que la notion de confort était subjective. En ce sens, les méthodes adaptatives, formulées par Humphreys (Humphreys *et al.*, 1998) et appliquées à l'habitat intelligent par Mozer (Mozer, 1998), permettent une mesure directe du ressenti de l'occupant. Ce ressenti est, dans le cas de Humphreys, collecté directement par questionnaire. Dans le cas de Mozer, il se détermine à partir des ajustements manuels de l'habitant, qui traduisent une forme d'inconfort, à partir duquel on déduit le confort.

Nous étudierons ces deux types d'approches pour permettre l'évaluation du confort d'une ambiance par les habitants.

7.3.1 Mesure par questionnaire

L'ambiance de l'occupant peut s'évaluer directement par un questionnaire. C'est notamment l'approche utilisée lors des diverses expérimentations menées dans l'objectif de définir des critères de confort (Fanger, 1973; Rohles *et al.*, 1989; Bruant, 1998; McCartney *et al.*, 2002). Cette approche permet en effet d'acquérir la perception de l'utilisateur vis-à-vis de critères d'ambiance particuliers, qui est décrite comme une mesure subjective (AFNOR, 2007).

Utilisant cette approche, la formulation des questions ainsi que le type de réponses attendues sont des facteurs importants quant à la pertinence des réponses obtenues. En ce sens, plusieurs méthodologies ont été présentées par le passé, et convergent aujourd'hui vers une approche commune. La norme NF EN 15251 présente ainsi une méthodologie pour l'évaluation d'un domaine de confort par l'occupant, où pour chaque domaine de confort, on associe trois questions :

1- a perception de la sensation : sur une échelle centrée par rapport à un état neutre, avec 7 possibilités de réponses ;
2- La perception de la grandeur physique la plus représentative : acceptable, plutôt acceptable, plutôt inacceptable, inacceptable ;
3- Le souhait de l'occupant : changement positif, changement négatif ou pas de changement

À partir de cette méthodologie, nous avons établi un questionnaire présenté en figure 7-5, étendu aux quatre domaines de confort, auquel a été ajoutée une question afin d'obtenir le jugement de l'occupant vis-à-vis de l'ambiance générale. L'avantage d'un tel questionnaire réside en la précision de mesure du ressenti d'un individu. Cependant, son utilisation est délicate car le nombre de réponses à donner par l'habitant est important, et son intégration naturelle au sein d'un habitat est difficile.

Ambiance générale	Comment percevez-vous l'ambiance générale ?						
	désagréable	Légèrement désagréable	Neutre			Légèrement agréable	agréable
Ambiance thermique	Comment percevez-vous l'ambiance thermique ?						
	Froid	Frais	Légèrement frais	Neutre	Légèrement chaud	Chaud	Très chaud
	Comment percevez-vous la température ?						
	Inacceptable		Plutôt inacceptable	Plutôt acceptable		Acceptable	
	Quelle température pour la pièce souhaitez-vous ?						
	Plus élevée			Pas de changement		Plus basse	
Ambiance visuelle	Comment percevez-vous l'ambiance visuelle ?						
	Très sombre	Sombre	Légèrement sombre	Neutre	Légèrement lumineuse	Lumineuse	Très lumineuse
	Comment percevez-vous la luminosité ?						
	Inacceptable		Plutôt inacceptable	Plutôt acceptable		Acceptable	
	Quelle luminosité pour la pièce souhaitez-vous ?						
	Plus élevée			Pas de changement		Plus basse	
Ambiance olfactive	Comment percevez-vous la qualité de l'air ?						
	Odeur très très forte	Odeur très forte		Odeur forte	Odeur modérée	Odeur faible	Pas d'odeur
	Comment qualifiez-vous la qualité de l'air ?						
	Inacceptable		Plutôt inacceptable	Plutôt acceptable		Acceptable	
	Quelle aération pour la pièce souhaitez-vous ?						
	Plus aérée			Pas de changement		Moins aérée	
Ambiance acoustique	Comment percevez-vous l'ambiance acoustique ?						
	Très calme	calme	Faiblement bruyante	Légèrement bruyante	Bruyante	Très bruyante	Très très bruyante
	Comment percevez-vous le bruit ?						
	Inacceptable			Plutôt inacceptable	Plutôt acceptable	Acceptable	

Figure 7-5. Exemple de questionnaire subjectif multicritères

7.3.2 Inférence d'intention par affordance sur les objets

Les bâtiments étant composés d'interfaces de contrôles permettant à l'utilisateur de modifier son environnement, nous pouvons utiliser les informations de ces interfaces afin d'en déduire ses intentions. Cependant, les événements directement issus des interfaces de contrôle ne sont pas suffisamment explicites pour déduire l'intention de l'utilisateur. Les interfaces sont en effet prévues pour échanger des variables entre processus. Par exemple, dans le dialogue entre un interrupteur et un actionneur de lumière, la variable échangée aura pour valeur « *on* ». L'intention de l'utilisateur est alors différente, probablement « je veux voir le texte écrit sur mon livre ». De cette intention peut être induit que l'environnement dans lequel évolue l'habitant est trop sombre, et donc qu'il y a un inconfort visuel.

En utilisant le principe d'affordance, développé en section 3.2.3.1, il est possible de restituer l'intention de l'utilisateur lors de l'interaction avec un objet par la conception de l'interface de cet objet. Une approche similaire a été décrite (Kawsar *et al.*, 2008), sur la base du « sens commun » : chaque interaction d'un habitat peut être augmentée en fonction du contexte. Une interface utilisateur suggère, par sa forme, des actions possibles pour l'habitant, définissant ainsi l'affordance de cette interface. Par exemple, un thermostat suggèrera ainsi un contrôle thermique de l'environnement intérieur. Certaines interfaces sont génériques, comme les interrupteurs qui peuvent être assignés à l'éclairage ou aux occultations. Dans ce cas, l'affordance est apprise par l'habitant, dans son utilisation répétée.

Afin de mesurer l'inconfort dans un habitat intelligent, nous proposons d'utiliser la méthode adaptative, telle que décrite par Mozer (Mozer, 1998), c'est-à-dire en ne sélectionnant comme adaptation que les ajustements effectués par les habitants. Cette restriction se justifie de par la densité d'interfaces disponibles pour modifier l'environnement, qu'elles soient physiques ou virtuelles, favorisant, par leur nombre et leurs diversités de fonctions, les interactions entre l'habitant et son environnement. L'habitant d'une maison intelligente aura ainsi à sa disposition tous les moyens nécessaires pour ajuster son ambiance. Cette restriction, centrée interaction, permet également de se situer à l'échelle d'un habitat, et non à l'échelle d'une population comme le décrit Humphreys (Humphreys *et al.*, 1998). L'adaptation est ainsi propre à un habitat, en fonction des habitudes et des usages de ses habitants.

Cette approche nécessite de qualifier l'interaction entre l'habitant et les objets intelligents. Pour ceci, nous considérons trois entités : la personne, les objets et l'ambiance. La personne perçoit l'ambiance, et émet un jugement de confort sur cette ambiance. Lorsque ce jugement est négatif, la personne ajuste, par les objets intelligents, la source d'inconfort en fonction de sa croyance. La trace propre à l'interaction permet alors, par sa source, de sélectionner le domaine de confort souhaité, et par son contenu, de quantifier le degré d'inconfort perçu. La figure 7-6 détaille ces trois entités et leurs relations, que nous détaillons ci-après.

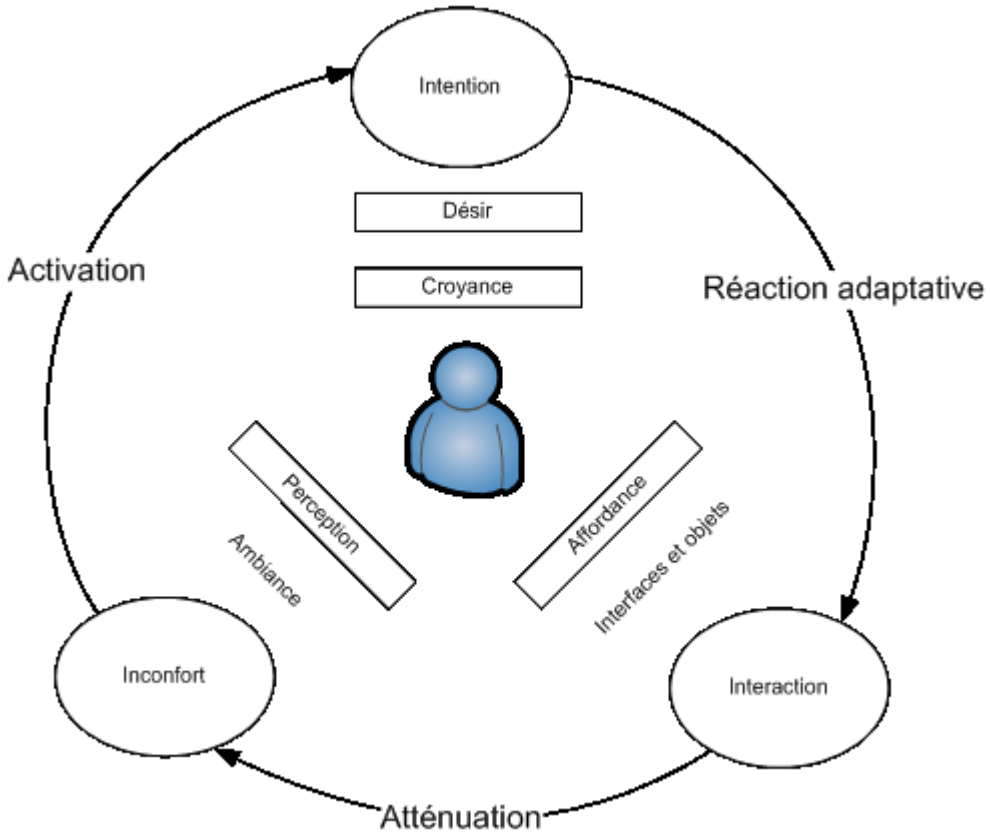


Figure 7-6. Modèle Interaction - Intention - Inconfort

L'inconfort active une intention chez l'habitant : lorsque celui-ci est en situation inconfortable, son intention est de restaurer une situation de confort. Pour ceci, l'habitant suit un raisonnement qui peut être assimilé au modèle « Croyance – Désir – Intention » proposé par Bratman *et al.* (Bratman *et al.*, 1988). Dans notre contexte, utilisant l'approche adaptative, le désir est unique : réduire l'inconfort. Pour ceci, l'habitant sélectionne, en fonction d'opportunités et sur la base de ses connaissances (croyances), le ou les objets qui peuvent lui servir à réguler son environnement. L'intention d'une personne se concrétise par une interaction, comme moyen de réaction propre à l'adaptation. Cette interaction se mesure par un événement lié à l'objet intelligent, objet caractérisé par son affordance.

Cette interaction peut être issue de deux types d'objets : les objets dédiés aux contrôles, comme les interrupteurs et les thermostats, ou les objets fonctionnels, comme les ouvrants (fenêtres, volets, rideaux). Ces derniers ne sont pas des interfaces bénéficiant du principe d'affordance, mais ces objets modifient les paramètres de l'ambiance, et sont manipulés à cette intention. La modification d'ambiance apportée par ces objets est modélisée au sein des modèles de contribution que nous avons décrits précédemment (cf. section 7.2.3). La nature de la contribution de ces objets est contextuelle. Dans le cas de tels objets, le modèle « Croyance – Désir – Intention » s'avère plus complexe, dépendant d'une part de la croyance de l'utilisateur et d'autre part du modèle de contribution.

Nous avons synthétisé au sein du tableau 7-3 différents objets de l'habitat intelligent, associés à des domaines de confort représentatif et les intentions probables pouvant justifier l'interaction avec ces objets. Chaque objet peut ainsi être associé à un modèle d'intention, tel que nous l'avons décrit ci-dessus.

Objets	Domaines du confort	Intentions probables d'interaction
Thermostat	Thermique	Chauffer l'environnement intérieur
Interrupteur (lumière)	Visuel	Eclairer l'environnement intérieur
Interrupteur (volets)	Visuel Thermique	Eclairer l'environnement intérieur (ne pas filtrer la lumière du jour) Réchauffer l'environnement intérieur (provoquer un effet de serre en fonction du soleil)
Interrupteur (ventilation)	Olfactif Thermique Acoustique	Aérer la pièce Refroidir la pièce (en été) Réduire le bruit (en diminuant la vitesse)
Détecteur d'ouvertures fenêtre	Olfactif Thermique Acoustique	Aérer la pièce (à l'ouverture) Refroidir la pièce (en été) Réduire le bruit (à la fermeture)
Détecteur d'ouvertures portes	Olfactif Acoustique	Eviter que les odeurs se propagent Eviter que le bruit se propage

Tableau 7-3. Association de domaines de contribution en fonction des objets manipulés par l'habitant

Le modèle que nous avons présenté au sein de cette section permet d'interpréter les interactions de l'utilisateur dans le but de réduire l'inconfort. Cependant, ces interactions peuvent s'avérer complexes, pouvant justifier l'utilisation de modèles cognitifs, tels que le modèle « Croyance, Désir, Intention ». En fait cette voie paraît peu prometteuse parce que la sensation de confort ne résulte pas d'un calcul cognitif. La rationalité de l'agent ne peut être vraiment invoquée puisque les connaissances de ce dernier sont incomplètes, incertaines et ne procèdent pas autour d'une « intentionnalité ». Il est préférable comme nous le concluons ci-après d'utiliser des modèles stochastiques qui ne font aucune hypothèse sur la rationalité des agents.

7.4 Synthèse et Ouverture : l'optimisation du confort

L'une des difficultés majeures pour l'étude du confort sensoriel au sein des bâtiments intelligents réside en la complexité de mesure de l'inconfort. Le confort est en effet ressenti subjectivement par les habitants, résultant d'un jugement d'ambiance. Nous avons proposé, au cours de ce chapitre, deux applications de l'habitat intelligent dans le but de comprendre le confort global, tous les paramètres d'ambiance étant pris en compte.

Comprendre le confort nécessite en premier lieu de caractériser l'ambiance qui est jugée par l'habitant. Les méthodes traditionnelles, dont nous avons fait un état de l'art au chapitre 6, caractérisent l'ambiance et ses dynamiques de manière analytique, utilisant des grandeurs représentatives telles que la température, la luminosité ou le taux de CO_2. Ces grandeurs physiques, représentatives de l'environnement intérieur, sont ensuite traitées de manière mathématique, mettant en œuvre des modèles complexes de modélisation du bâti ou de la personne. L'approche que nous proposons consiste à situer la mesure de l'ambiance par les objets intelligents, afin de former un repère d'ambiance.

Cerner le confort nécessite également de mesurer l'inconfort des habitants. L'inconfort des habitants résulte de la perception sensorielle de l'ambiance, et se concrétise par une interaction avec l'habitat intelligent en vue de restaurer une situation de confort, comme l'énonce l'approche adaptative de Mozer. Cependant, l'interaction est contextuelle, elle repose sur les connaissances imparfaites de l'habitant et sa perception réactive de l'ambiance. Nous allons ainsi proposer un modèle stochastique permettant de comprendre l'interaction, et d'en déduire la source d'inconfort de l'habitant pour tenter de l'éliminer ou de la réduire, eu égard aux économies d'énergie souhaitées.

Il conviendra alors de préciser dans quel cadre cette optimisation de confort a lieu :

- Pour le confort fonctionnel, l'habitant peut être averti des conséquences d'une interaction. Par exemple, lorsqu'il souhaite ouvrir une fenêtre, le modèle de contribution de la fenêtre peut indiquer à l'utilisateur les effets.
- Pour le confort économique, des coûts peuvent être associés aux modèles de contribution. Ainsi, l'habitant peut être averti du coût d'une action, ou alors, il peut être notifié, en cas d'inconfort, de l'action « la moins chère » à mener.

8 Evaluation expérimentale

Face à la complexité de la mesure du confort sensoriel, les approches à caractère empirique sont fréquemment employées, comme nous l'avons vu dans nos analyses précédentes (chapitre 6). Des expérimentations permettent alors la formulation de liens entre les grandeurs physiques, objectives, et le ressenti de confort ou d'inconfort des occupants qui est, lui, subjectif.

Afin de valider notre méthode visant à modéliser le confort multisensoriel, nous avons effectué plusieurs expérimentations. Ces expérimentations ont plusieurs objectifs. En premier lieu, il s'agit d'étudier la perception subjective des habitants, selon divers critères, afin de cerner leur comportement face au confort d'ambiance. En second lieu, nous nous sommes intéressés à la mesure, au sein d'un habitat intelligent, de l'inconfort des habitants en fonction de leur comportement.

Nous décrivons dans ce chapitre ces deux expérimentations et leurs résultats.

« *L'homme est la mesure de toute chose* »

Protagoras

8.1 Objectifs de l'évaluation

Afin de valider le modèle de perception du confort des habitants, nous avons préparé et conduit une suite d'expérimentations qui se sont déroulées au sein de l'appartement Domus, présenté précédemment (cf. section 5.1). Cet appartement présente l'avantage d'être doté d'un nombre important de capteurs, et plus largement d'objets intelligents. L'ensemble de ces objets intelligents nous permet d'obtenir des informations relatives à l'environnement intérieur, suivant deux plans :

- La mesure objective des grandeurs physiques,
- Les informations relatives à la perception des habitants, par une méthode adaptative (cf. section 6.3.1.3).

Le réalisme de l'appartement nous permet alors de mener des études dans des conditions quasi-réelles ; Domus est un appartement pouvant être habité mais qui n'est pas personnalisé par les sujets.

Ces expérimentations ont pour but de valider, en partie, la méthode adaptative du confort multisensoriel pour l'habitat intelligent, que nous avons proposé au chapitre précédent. Pour définir les protocoles expérimentaux, les spécificités de l'environnement expérimental ont été prises en compte. La plus importante porte sur l'appartement Domus. En effet, celui-ci se veut être un outil de simulation de l'habitat intelligent, avec une orientation centrée sur les usages. Ainsi, cet outil est différent de ceux utilisés classiquement pour les études sur le confort, que l'on dénomme chambres climatiques, et dont la caractéristique principale est de pouvoir piloter finement l'ambiance, en particulier l'ambiance thermique. C'est ce type d'outil qui a été par exemple utilisé afin de conclure l'étude présentée en figure 6-3 où les paramètres thermiques d'une pièce, la température de rayonnement et la température de l'air, étaient modifiés artificiellement afin d'étudier le ressenti des occupants. Les paramètres d'ambiance de Domus varient de manière identique à ceux d'un habitat réel : en fonction des conditions externes, de la composition du bâti ainsi que des apports internes, apports dus aux objets tels que les lumières ou la ventilation.

Pour cette raison, nous avons orienté nos expérimentations sur la perception du confort par les habitants plutôt que sur la caractérisation de l'ambiance et son agréabilité. Les expérimentations que nous avons menées ont été conduites sous deux volets, que nous avons décidé de nommer en fonction de la classification proposée par Jambon (Jambon *et al.*, 2010a) :

- Des expérimentations *in vitro*, où les tâches à réaliser par les sujets sont prescrites et menées dans un contexte artificiel. Ces expérimentations ont pour objectif d'évaluer les évolutions de confort dans des conditions physiques et d'activité des sujets prédéfinies par l'expérimentateur.
- Des expérimentations *in simu*, où les tâches à réaliser par les sujets sont libres et menées dans un contexte simulé. Ces expérimentations ont pour objectif d'évaluer l'approche adaptative du confort multisensoriel, en plaçant les sujets dans des conditions quasi réalistes, ceux-ci ayant une activité libre et l'expérimentateur n'intervenant pas sur l'environnement intérieur.

Ces deux volets d'expérimentations ont nécessité une instrumentation spécifique pour l'acquisition des données subjectives ainsi que pour la collecte des données caractérisant l'ambiance, que nous détaillons ci-après.

8.1.1 Acquisitions des données subjectives

Le confort étant subjectif, nous avons souhaité intégrer aux expérimentations un dispositif permettant de collecter la perception de l'ambiance par l'utilisateur. Ces données servent soit de mesure unique du confort dans le cas de l'expérimentation « *in vitro* », soit de mesure complémentaire dans le cas de l'expérimentation « *in simu* ». La littérature (Rohles *et al.*, 1989; Bruant, 1998) propose plusieurs types d'approches pour collecter ce type de données, sous la forme de questionnaires. Nous avons ainsi présenté un questionnaire en section 7.3.1 qui considère le confort comme étant multisensoriel, et qui est composé d'échelles de jugement et d'échelles de préférences.

Dans le cadre de cette expérimentation, nous avons souhaité limiter ce questionnaire à deux domaines de jugement : l'agréabilité des ambiances et la perception de l'environnement physique. Ces deux domaines de jugement sont détaillés respectivement au tableau 8-1 et au tableau 8-2, établis à partir du questionnaire utilisé par Rohles, Woods et Morey (Rohles *et al.*, 1989; AFNOR, 2007). Ce questionnaire avait en effet l'avantage de ne considérer le confort que par le jugement subjectif des occupants, et de manière globale, ce qui correspond à notre approche.

Cependant, ce questionnaire proposé par Rohles *et al.* apportait à l'utilisateur la contrainte de pondérer les différents domaines de confort : le sujet devait affecter un pourcentage de participation à chaque domaine, la somme devant être égale à 100 %. Or, les approches que nous avons vues en section 6.4.2 émettent des hypothèses différentes quant à l'additivité des conforts. Ainsi, nous avons privilégié une approche où les sujets étaient libres d'annoter les différents domaines de conforts (tableau 8-1) ainsi que les différentes perceptions (tableau 8-2) indépendamment les uns des autres. Pour ceci, chaque domaine est représenté sous la forme d'une échelle, sur laquelle on déplace tactilement un curseur (figure 8-1).

Grandeur	Echelle de perception
Confort général	Très désagréable à très agréable
Confort thermique	
Confort visuel	
Qualité de l'air	
Confort acoustique	

Tableau 8-1. Critères et échelles pour le confort

Grandeur	Echelle de perception
Température	Très froid à très chaud
Humidité	Très humide à très sec
Luminosité	Très sombre à très lumineux
Ventilation	Trop faible à trop fort
Odorat	Très désagréable à très agréable
Volume	Trop faible à trop fort
Son	Très désagréable à très agréable

Tableau 8-2. Légende et échelles pour les perceptions

Ce questionnaire a été implémenté de manière électronique et mobile, afin de faciliter les annotations faites par les utilisateurs. Pour ceci, nous avons utilisé les développements décrits précédemment, utilisant la suite OpenRemote (cf. section 5.3.1.2). L'interface finale est présentée en figure 8-1, comportant respectivement les échelles de jugement sur le confort (tableau 8-1) à gauche, et les échelles de jugement détaillées (tableau 8-2) à droite. Afin de synchroniser les annotations avec l'ensemble des données, nous avons spécifié un modèle d'application conforme au modèle présenté durant la partie 1. Le rôle de cette application est de considérer les annotations faites par les sujets comme une trace provenant d'un objet physique. Ce modèle d'application est illustré en annexes (cf. 9.8).

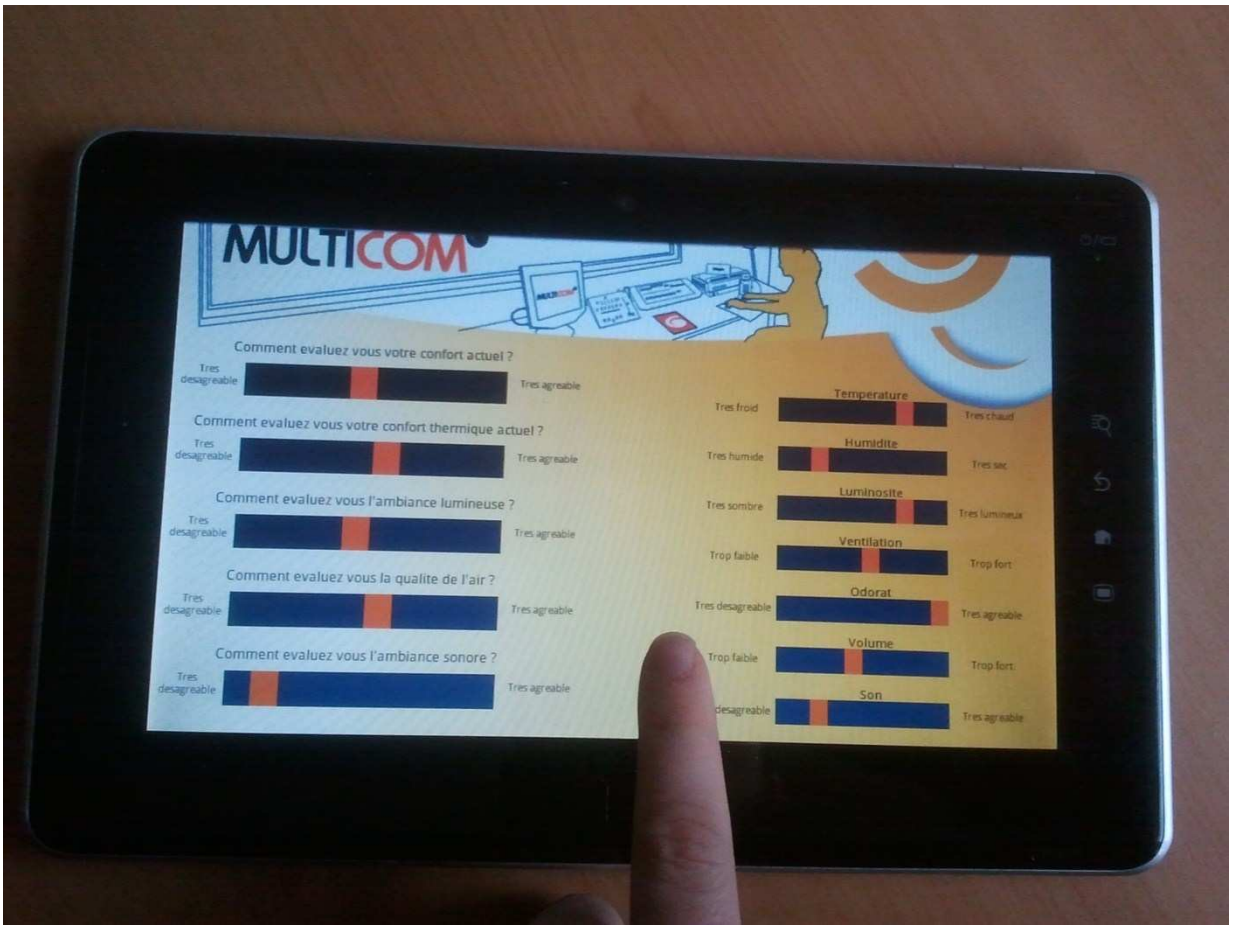


Figure 8-1. Interface mobile de réponse au questionnaire commun aux expérimentations

8.1.2 Acquisition de données physiques

L'acquisition des données physiques permet de caractériser l'ambiance que les participants jugent. Dans le cadre de cette évaluation expérimentale, nous avons utilisé le cadre d'interopérabilité, présenté au chapitre 4. Cette architecture, déployée au sein de l'appartement Domus, permet ainsi de collecter l'ensemble des données issues des capteurs installés, ainsi que l'état des objets. Un système d'horodatage et d'enregistrement de données a également été développé afin d'archiver les traces relatives à chaque expérimentation, pour une utilisation *a posteriori*. La figure 8-4 montre ainsi un exemple de fichier contenant les traces horodatées d'une lampe variée.

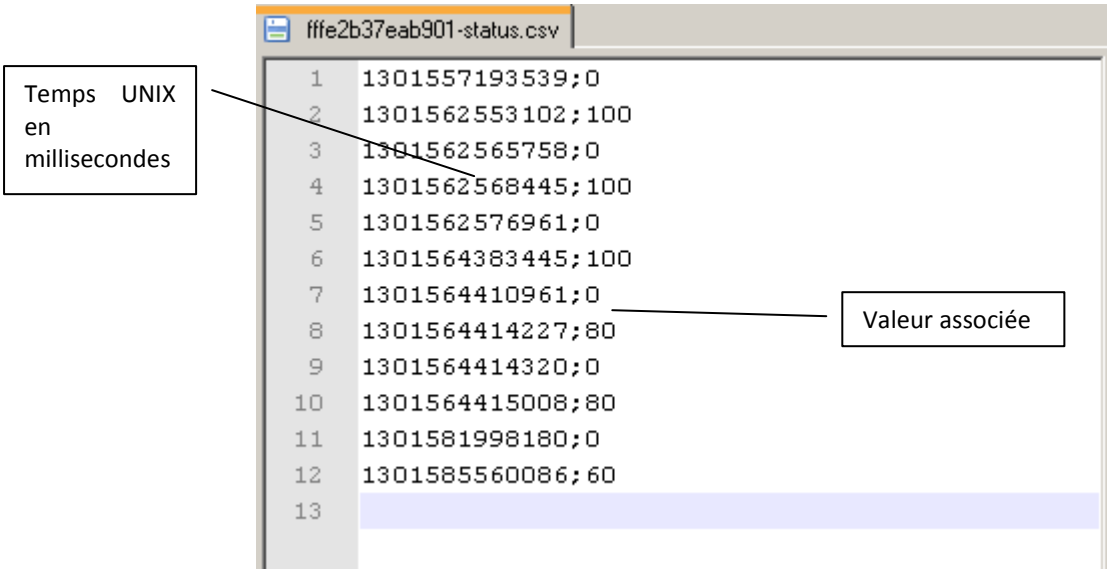


Figure 8-2. Contenu d'un fichier « capteur » (exemple sur une lampe variable)

8.2 Expérimentation « *in vitro* »

La première expérimentation concernant l'analyse de confort consiste à acquérir un corpus de données sur la perception des occupants d'un habitat intelligent. Cette expérimentation repose sur l'hypothèse, que nous avons développée précédemment (cf. section 6.4.2), que le confort est le résultat de la perception multisensorielle de l'environnement, subjectif à la personne. Ainsi, nous avons privilégié, pour cette étude, des conditions permettant d'analyser cette perception de confort dans un contexte prédéfini sur un échantillon représentatif de profils sujets.

8.2.1 Participants

Les participants à cette expérimentation ont été recrutés sur la base du volontariat parmi les contacts de l'équipe de recherche, sans condition d'âge ni de catégorie socioprofessionnelle. En effet, si nous considérons que chaque personne a des critères de confort différents, une analyse en fonction des profils n'est pas notre objectif, celle-ci nécessitant un nombre très élevé de candidats pour s'avérer fiable. 20 candidats, dont les profils sont présentés dans le tableau 8-3, ont participé.

N°	Date	Sexe	Age
1	24/3/11 9:00	M	> 60
2	28/3/11 9:00	F	30-40
3	28/3/11 17:00	M	40-50
4	28/3/11 19:00	M	30-40
5	29/3/11 14:00	M	> 60
6	30/3/11 18:00	F	20-30
7	31/3/11 10:00	F	30-40
8	31/3/11 16:00	F	< 20
9	1/4/11 14:00	F	40-50
10	5/4/11 17:00	F	30-40
11	6/4/11 10:00	F	30-40
12	6/4/11 15:00	F	< 20
13	6/4/11 17:00	M	< 20
14	7/4/11 10:00	M	20-30
15	7/4/11 13:00	M	> 60
16	7/4/11 16:00	F	< 20
17	11/4/11 12:00	F	20-30
18	11/4/11 14:00	F	50-60
19	12/4/11 10:00	M	50-60
20	15/4/11 14:00	F	< 20

Tableau 8-3. Liste et profil des participants à l'expérimentation « *in vitro* »

8.2.2 Déroulement

L'expérimentation se déroulait en trois étapes principales, illustrées en figure 8-3 : la préparation de l'expérimentation, l'expérimentation et la phase de conclusion. Cette première expérimentation s'est déroulée entre les mois de Mars et Mai 2011, bénéficiant ainsi de conditions extérieures tempérées.

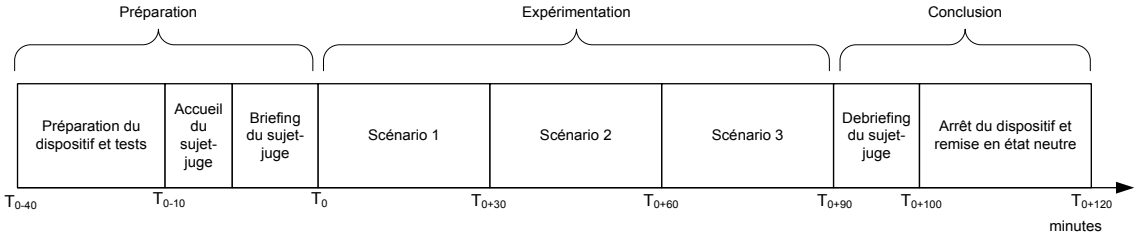


Figure 8-3.Déroulement temporel d'une expérimentation

L'étape de préparation de l'expérience comprend les tâches de mise en fonctionnement de l'outil expérimental, dispositif par dispositif. Ces tâches sont détaillées en annexes, sous la forme de « *check-list* » (cf. 11.1).

La phase de conclusion était constituée d'un entretien individuel avec le sujet, afin de savoir si la séance s'était bien passée. En fonction du déroulement de la séance, l'expérimentateur pouvait demander au sujet des informations complémentaires en vue de justifier un comportement observé.

8.2.3 Consignes aux participants

Afin de simuler différents états de l'habitat pouvant influencer le confort, nous avons défini trois tâches à effectuer par les sujets. Chacune de ces tâches a été définie en fonction des possibilités qu'offrait l'aménagement de l'appartement, ainsi que des activités courantes au sein d'un habitat intelligent. Nous avons identifié ainsi trois types d'activités : une activité studieuse (pour laquelle l'attention du participant est toute tournée vers l'activité), une activité de loisirs (pour laquelle l'attention du participant ne se focalise pas sur son activité) et une activité de tâches ménagères (qui requiert un niveau intermédiaire d'attention).

Le premier scénario de l'expérimentation (S1) est localisé dans le bureau de l'appartement. Les caractéristiques de ce scénario sont de produire une situation de quasi-travail, situation dans laquelle le sujet est en posture assise et concentré sur la tâche qu'il doit effectuer. Le dispositif en place a pour but de préparer l'environnement pour une activité demandant un certain niveau de concentration. Nous avons ainsi demandé au sujet de « jouer » à des jeux cérébraux (types jeux de lettres ou de logique) sur ordinateur.

Le deuxième scénario de l'expérimentation (S2) est situé dans la chambre. L'objectif de ce scénario est de produire une situation de détente. Pour ceci, la tâche qui était demandée au sujet était de visionner la télévision, ayant accès à une vidéothèque de documentaires. Aucune posture particulière n'était imposée, les sujets se plaçaient dans la posture qu'ils jugeaient la plus confortable.

Enfin, le troisième scénario (S3) consistait à produire une situation où le sujet était actif physiquement, mais pour laquelle l'attention nécessaire n'était pas maximale. Pour ceci, et dans le contexte de l'habitat, nous avons proposé au sujet de cuisiner un plat dans la cuisine. Une recette avec les ingrédients et ustensiles nécessaires ont été mis à disposition. Le choix d'une activité culinaire permet notamment de perturber l'environnement olfactif du sujet.

8.2.4 Rôle et interventions de l'expérimentateur

Pendant la phase de préparation (cf. figure 8-3), l'expérimentateur accueille le sujet et lui présente l'appartement et l'objectif de l'expérimentation. Il lui décrit également les différentes tâches à accomplir. Pour les besoins d'analyse des résultats, l'expérimentateur note également certaines données sur le sujet (qui constituent des variables indépendantes de l'expérimentation), notamment le métabolisme de la personne ainsi que son habillement. Ces données sont quantifiées en fonction d'une table de correspondant (présentée dans le tableau 8-4).

Tenue	Clo
T-Shirt, short, caleçon, chaussettes mi mollet et basquets	0,33
Chemise manches courtes, jupe d'été, slip, bas nylons, sandales	0,57
Chemise manches courtes, jupe d'été, slip, bas nylons, sandales avec pull léger col en V	0.78
Robe d'hiver, pull ras du cou en laine, slip, bas, soutien-gorge, souliers	0,93
Chemise manches courtes, pantalon léger, caleçon, chaussettes légères, souliers	0,55
Chemise manches longues, pantalon léger, caleçon, chaussettes légères, souliers	0,61
Chemise manches longues, pantalon léger, caleçon, chaussettes légères, souliers et veston demi-saison	1,01
Chemise flanelle, gilet, pantalon flanelle, caleçon, chaussettes, souliers	0,89
Chemise manches courtes, pull léger et col en V, pantalon léger, caleçon, chaussettes, souliers	0,71
Chemise manches longues, pull léger et col en V, pantalon léger, caleçon, chaussettes, souliers	0,95
Chemise coton manches longues, pantalon normal, caleçon, chaussettes, souliers	0,75

Tableau 8-4. Valeurs de « Clo » selon les tenues, d'après la norme ISO 9920

Durant le cœur de l'expérimentation, l'expérimentateur, localisé dans une pièce annexe de l'appartement, modifie les paramètres d'ambiance dans laquelle le sujet évolue. Ces modifications étaient apportées en fonction des perceptions de l'utilisateur, celles-ci étant transcrites par réponses au questionnaire sur tablette interactive (cf. section 8.1.1). Pour permettre la modification de l'ambiance en temps réel, deux dispositifs de feedback de l'activité réalisée par le sujet étaient à disposition de l'expérimentateur. Le premier, propre à la plateforme expérimentale utilisée, est composé de l'ensemble des caméras et de la régie (cf. section 5.1.3 et figure 5-6). Le second, mis en place pour les besoins de cette expérimentation, est un retour visuel sur le questionnaire complété par le sujet.

Au cours de l'expérimentation, les paramètres d'ambiance qui pouvaient être modifiés étaient :

- L'éclairage ambiant, en commutant ou variant à distance les éclairages directs des différentes zones impliquées dans les scénarios. Pour ceci, l'expérimentateur disposait de l'interface tactile développée en section 5.3.1.1 accessible à distance.
- La température d'éclairage indirect, à l'aide du dispositif présenté en section 5.2.3. Cet éclairage était en effet utilisé en éclairage « blanc », et pouvait être ajusté par l'expérimentateur sur des températures plus chaudes ou plus froides, à l'aide de l'interface spécifique présentée en figure 8-4. Ces températures ont été prédéfinies à l'aide d'une table spécifique utilisant la loi de Planck[72].
- Le rapport entre l'éclairage naturel et l'éclairage artificiel, en ouvrant ou fermant les stores, à partir de la même interface que pour l'éclairage.
- Le bruit d'ambiance, dont le but était de modifier artificiellement l'environnement sonore. Pour ceci, trois bruits de fond présélectionnés ont été utilisés : un bruit de pluie, un bruit de vent et un bruit d'oiseaux. Ce fond sonore pouvait être réglé à partir de l'interface spécifique présentée en figure 8-4.
- La puissance de la ventilation mécanique centralisée. Celle-ci étant surdimensionnée par rapport au volume de l'appartement, une forte puissance permet de simuler des variations d'air importantes.

Pendant l'expérimentation, le sujet devait compléter, toutes les cinq minutes, le questionnaire présenté en figure 8-1. L'expérimentateur avait également pour rôle de le rappeler au sujet. Pour ceci, il disposait de talkie walkies qui lui permettaient d'émettre un signal sonore (de type « bip »). Ce dispositif pouvait également être utilisé pour communiquer avec le sujet, en cas de difficultés observées, ou pour lui demander de changer de scénario (pour passer au suivant).

Enfin, pendant toute cette phase de l'expérimentation, l'expérimentateur observait le déroulement des scénarios en utilisant le dispositif de caméra de la plateforme. Sa dernière tâche était d'annoter tout comportement susceptible de modifier les perceptions du sujet. En effet, celui-ci était libre de modifier lui-même l'ambiance dans l'appartement (aucune consigne ne le lui interdisant ne lui ayant été donnée), il pouvait donc, ouvrir une fenêtre pour supprimer une odeur désagréable à son goût ou, plus simplement, enlever son pull-over s'il a trop chaud. Ces actions ont alors changé l'état de perception, il était donc indispensable de les connaître au moment de l'analyse des résultats.

[72] Obtenus d'après Wikipedia [lien] et une table de correspondance en composantes RGB [lien]

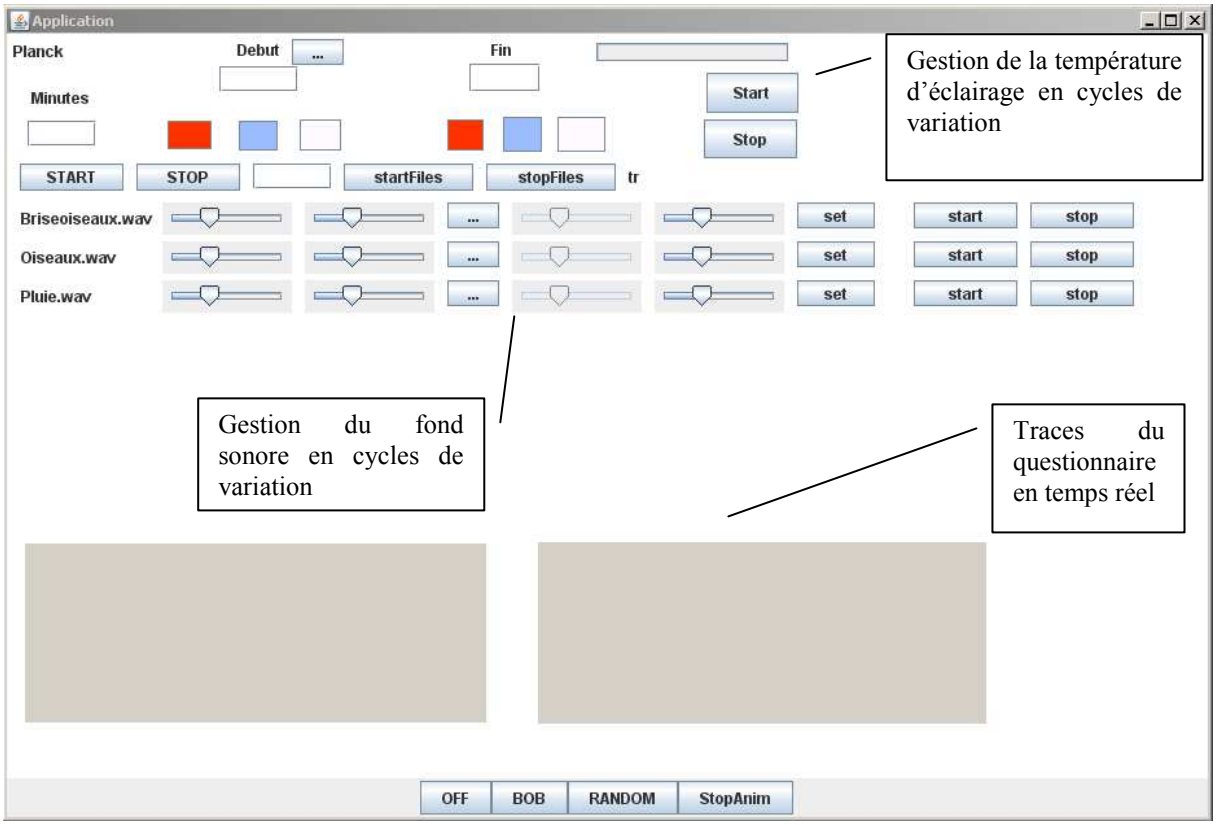


Figure 8-4. Interface de contrôle des modalités visuelles et sonores à disposition de l'expérimentateur

8.2.5 Données recueillies et sélection

8.2.5.1 Retours sur le déroulement de l'expérimentation

Les données récoltées pendant les passations de cette première expérimentation sont issues de 177 sources. Pour chaque sujet, nous avons les données personnelles le concernant (âge, poids, indice de vêture). Ces données ont été obtenues par un questionnaire papier (pour l'âge du participant par exemple) et par l'observation par l'expérimentateur (pour l'indice de vêture par exemple). Pendant le déroulement des scénarios, nous avons recueilli les traces de la communication des objets dans Domus, les réponses au questionnaire (le même questionnaire complété toutes les cinq minutes par le sujet), les traces des variations d'ambiance appliquées par l'expérimentateur et les annotations de comportement prises par l'expérimentateur. Nous rappelons que toutes ces données possèdent un repère temporel (timecode) qui permet de les mettre en relation les unes avec les autres.

Sur l'ensemble des expérimentations, deux passations (pour les sujets n°5 et n°9) ont présenté des difficultés. La première concernait le sujet n°5, qui a refusé d'accomplir le scénario 3 (tâches ménagères). Les scénarios 1 et 2 ont été en revanche respectés. Dans le traitement des données, les données issues de cette passation sont donc prises en compte à l'exception des résultats nécessitant les données du scénario 3. La seconde difficulté concernait le sujet n°9, pour lequel l'expérimentateur a éprouvé des difficultés à faire comprendre et respecter l'ensemble des consignes. Cette passation a été abandonnée dès la fin du premier scénario. Tout comme pour la passation du sujet n°5, les données acquises lors de la passation du sujet n°9 n'ont pas été complètement exclues du corpus de données, mais peuvent l'être en fonction des analyses à effectuer. Enfin, les conditions extérieures sur l'ensemble des expériences se sont avérées stables, aucun effet saisonnier inhabituel n'ayant eu lieu.

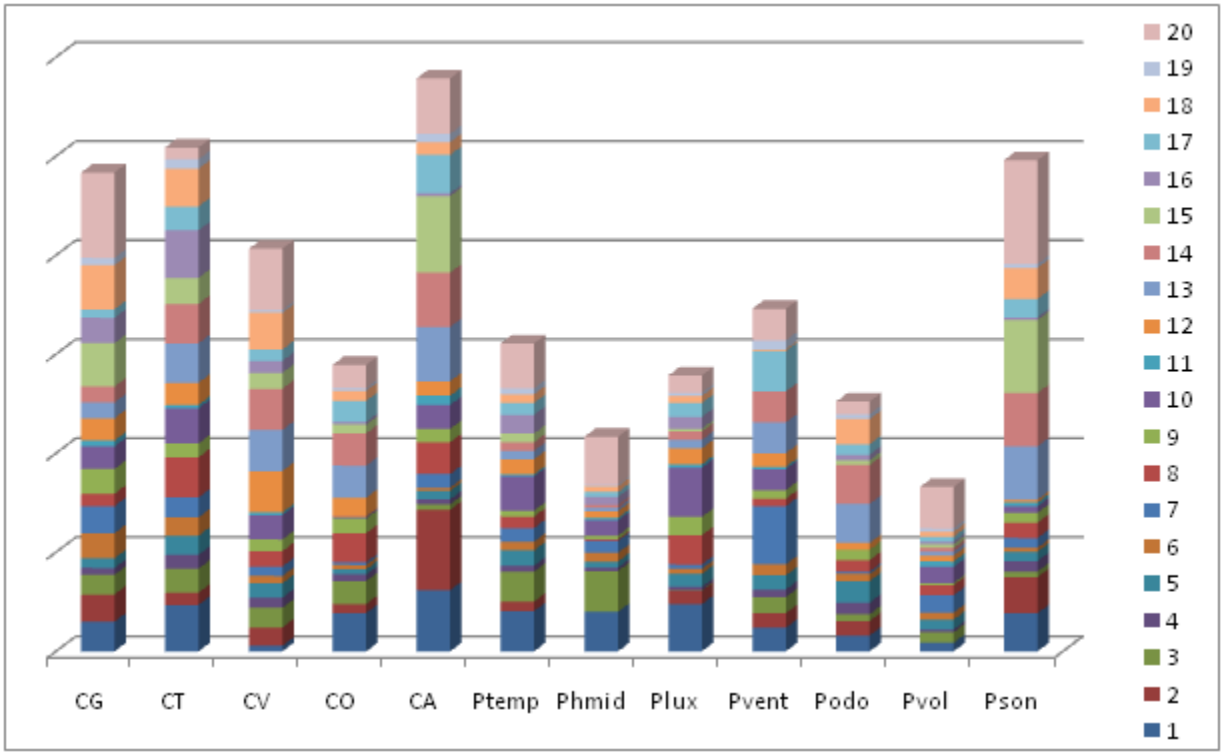
Le tableau 11-1 en annexes présente une synthèse des données récoltées ainsi que des conditions expérimentales pendant cette expérimentation.

8.2.5.2 Pertinence du questionnaire et cohérence des résultats

Avant tout traitement, nous avons voulu vérifier la cohérence des données que nous avons récoltées.

8.2.5.2.1 Premières observations sur l'utilisation des critères du questionnaire

Cette expérimentation ayant pour but l'analyse des ressentis des sujets, les données issues du questionnaire seront les données principales pour les analyses à venir. Ainsi, nous avons souhaité vérifier en quelles proportions le questionnaire fourni à l'utilisateur a été manipulé. La figure 8-5 représente, pour chaque candidat, la variance cumulée de chacune des douze échelles du questionnaire.



CG	Confort global	Ptemp	Perception de la température
CT	Confort thermique	Phmid	Perception de l'humidité
CV	Confort visuel	Plux	Perception de la luminosité
CO	Qualité de l'air	Pvent	Perception de la ventilation
CA	Confort acoustique	Podo	Perception de l'odeur
		Pvol	Perception du volume
		Pson	Perception du bruit

Figure 8-5. Variances des données entrées par les sujets lors de l'expérimentation « *in vitro* »

L'analyse des variances, ainsi que l'analyse du nombre d'annotations, nous indiquent que toutes les échelles du questionnaire ont été utilisées par les sujets, mais cependant, dans des proportions différentes. Les plus fortes variances concernent le domaine acoustique, avec d'une part la variance la plus élevée pour l'échelle « Confort Acoustique », et la troisième variance la plus élevée pour l'agréabilité du fond sonore (« Perception du bruit »). Les variances faibles concernent le domaine olfactif, que ce soit l'échelle de confort ou l'échelle d'odorat, et l'humidité qui caractérise secondairement la qualité de l'air.

Ces résultats sont en adéquation avec nos attentes. L'odorat est un domaine sur lequel les variations d'ambiance appliquées par l'expérimentateur ne s'appliquaient pas. La variation olfactive de l'ambiance étant, de ce fait, minime, l'observation d'une faible variance au sein des jugements des sujets semble corréler la pertinence des données attendues pour cette mesure. A l'inverse, le fond sonore fut l'une des deux contributions, avec l'éclairage, de l'expérimentateur à l'ambiance. La forte variance de l'ambiance sonore est correctement restituée par les sujets qui ont modifié les valeurs de ce critère. Cette première analyse nous permet, en partie, de valider les données obtenues. Cependant, elle peut être accompagnée d'une analyse de fiabilité qui vérifiera ces premières observations.

8.2.5.2.2 Analyse de fiabilité des données recueillies

Les sources pouvant mener à une invalidité des données récoltées lors d'une expérimentation sont multiples. Comme nous l'avons dit précédemment, les données principales pour cette étude sont les valeurs appliquées aux échelles du questionnaire par les participants. L'une des raisons pouvant amener à une invalidité de l'étude est donc une mauvaise construction du questionnaire. Celui-ci a été construit à partir de connaissances expertes ainsi que de la littérature, en particulier en se basant sur les travaux de Rohles *et al*. (Rohles *et al.*, 1989). Cependant, ces travaux ont été soumis à réserve quant à la pertinence des questions posées, ainsi qu'au nombre de questions qui pouvaient induire en erreur le sujet. De plus, même si le sujet avait eu une explication sur l'utilisation du questionnaire et la signification des différents indices, pour cette expérimentation, une autre source importante d'erreur dans les données est un mauvais usage du questionnaire rempli par les sujets. Pour évaluer ce risque sur nos données, nous avons souhaité mener une étude de cohérence sur les données issues des échelles du questionnaire.

Afin d'effectuer cette analyse, nous avons appliqué les méthodologies d'élaboration de questionnaires (Baccino *et al.*, 2004), notamment l'alpha de Cronbach (Carter *et al.*, 1998; Nunnally, 1959). L'alpha de Cronbach est un indice de fiabilité calculé à partir d'une corrélation entre les mesures et les variances des questions. Il estime la proportion de dispersion entre le véritable résultat par rapport à la dispersion totale observée. Pour considérer un questionnaire comme fiable, l'indice mesuré ne doit pas être inférieur à 0,7 (Baccino *et al.*, 2004).

	Summary for scale: Mean=72,2800 Std.Dv.=10,192				
	Cronbach alpha: ,719160 Standardized alpha: ,716				
	Average inter-item corr.: ,183991				
variable	Mean if deleted	Var. if deleted	StDv. if deleted	Itm-Totl Correl.	Alpha if deleted
CG	65,5090	83,1008	9,1159	0,44784	0,68638
Ctherm	65,9527	83,4123	9,1330	0,44514	0,68687
Cvisu	65,4218	87,7057	9,3651	0,37487	0,69792
Cair	65,9272	86,9917	9,3269	0,45910	0,68723
Cson	66,2472	80,3679	8,9648	0,50098	0,67700
Ptemp	66,3309	89,9087	9,4820	0,34380	0,70225
Phmid	66,3418	94,5013	9,7211	0,25395	0,71280
Plum	66,6945	95,5503	9,7749	0,20621	0,71818
Pvent	67,0654	105,9957	10,2954	-0,15425	0,76613
Podo	66,1381	87,3773	9,3475	0,51658	0,68249
Pvol	66,7890	95,0392	9,7488	0,30636	0,70796
Pnoise	66,6618	80,3547	8,9640	0,57274	0,66669

Tableau 8-5 Détails du calcul de l'alpha de Cronbach sur les données issues du questionnaire.

L'alpha de Cronbach obtenu sur nos données s'est avéré satisfaisant, étant supérieur à 0,7 (tableau 8-5). Nous avons recalculé cet indice en éliminant tour à tour les résultats issus de chacun des sujets pour identifier si les données d'un sujet particulier devaient être supprimées. Cette étude, nous a montré que les réponses du sujet n° 9 sont celles qui dégradent le plus cet indice de fiabilité, l'indice avoisinant alors 0,76 lors de l'exclusion des données de ce participant. Cette observation numérique confirme alors le retour de l'expérimentateur sur cette expérimentation.

8.2.6 Résultats et analyses

Les données issues de cette série d'expérimentations peuvent servir à plusieurs analyses. Cependant, dans notre contexte, nous nous sommes intéressés à la perception de confort par les sujets, avec l'hypothèse de la multisensorialité et de la subjectivité du confort. Ainsi, nous avons effectué cinq analyses détaillées ci-après. En premier lieu, nous nous sommes intéressés à la comparaison entre un indice de confort analytique et le confort perçu lors des expérimentations. Ensuite, nous avons cherché trois types de corrélations : la corrélation entre les différents conforts, afin de définir un indice de confort global, la corrélation entre les perceptions et le confort global et la corrélation entre les grandeurs physiques perçues par les utilisateurs et leur participation au confort. Enfin, nous nous sommes intéressés à l'influence de l'activité sur la sensibilité de perception des sujets.

8.2.6.1 Perception subjective comparée aux modèles objectifs

Une des premières analyses qui a été faite à la suite des expérimentations a été de comparer les méthodes traditionnelles d'évaluation du confort avec la perception de l'utilisateur. L'une des fortes hypothèses que nous avons est de considérer le confort comme subjectif aux personnes. Le dispositif expérimental nous a permis d'obtenir les données relatives à l'environnement intérieur ainsi que le ressenti utilisateur vis-à-vis de la perception de cet environnement. Nous avons ainsi souhaité comparer l'indice PMV, issu du modèle de Fanger développé précédemment en section 6.3.1.2 avec le ressenti de confort thermique des sujets.

Le résultat attendu de cette comparaison est d'observer une corrélation inconstante entre les deux données. En effet, l'un des rôles de l'expérimentateur était de bruiter l'ambiance, en incluant une forte variabilité des différents stimuli sensoriels, en particulier sur la température d'éclairage et le fond sonore (cf. section 8.2.4). Ainsi, nous avons calculé l'indice PMV, en fonction des paramètres d'activité et d'habillement des sujets, ainsi qu'en fonction des variables caractéristiques de l'environnement, que nous avons corrélés avec l'annotation du sujet. Le résultat de cette corrélation est reporté au tableau 8-6.

Candidat	Indice de corrélation entre PMV et le confort thermique
1	0,59309222
2	0,33592119
3	0,13889183
4	0,88897713
5	-0,14523918
6	0,0860624
7	0
8	0,83061718
9	0,61862264
10	0,34412382
11	-0,73448929
12	0,3516621
13	0,30449622
14	0,15930014
15	-0,14361359
16	0,01550755
17	-0,53791555
18	0
19	0,18969888
20	0,61251595

Tableau 8-6. Indices de corrélation entre le PMV et l'annotation issue du sujet

La variance des résultats montre que le lien entre le PMV et la perception thermique ne peut être clairement établi dans notre contexte, confirmant alors l'observation faite lors de travaux précédents (Talotte *et al.*, 2006). Certains indices de corrélation, comme pour le sujet n°11 et n°17, sont contraires au résultat théorique. Ce résultat était attendu : l'ambiance thermique ne pouvait être contrôlée au sein de l'appartement Domus. Le temps relativement court des expérimentations permettait ainsi de garder des facteurs physiques de l'ambiance constants : température intérieure, humidité relative, etc. Ainsi, seules les variables d'habillement et d'activité physique étaient sources de variations dans le résultat. Or, le rôle de l'expérimentateur était de bruiter l'ambiance, particulièrement sur le fond sonore et les températures d'éclairage, variables non prises en compte dans le modèle de Fanger.

8.2.6.2 Corrélation entre le confort global et les conforts spécifiques

L'une des fortes hypothèses concernant le confort multisensoriel est de considérer que le confort global est déductible de « sous-conforts », ou conforts mono-sensoriels (Rohles *et al.*, 1989; Bruant, 1998; Delepaut, 2007). Les travaux de Rohles *et al.* (Rohles *et al.*, 1989), pour définir un indice de confort global pour l'environnement intérieur, montrent, par leurs approches et leurs limitations (Bruant, 1998; Haldi *et al.*, 2010a) l'importance de la manière d'intégrer ces conforts mono-sensoriels. L'approche de Rohles *et al.*, détaillée en section 6.4.2 est de faire une pondération linéaire selon la formulation en (11), où les coefficients a, b, c et d ont été déterminés sur la base d'expérimentations en conditions réelles.

$$Confort_{global} = aConfort_{thermique} + bConfort_{visuel} + cConfort_{olfactif} + dConfort_{acoustique} \quad (11)$$

Nous avons évoqué l'intelligence artificielle en présentation de l'intelligence ambiante (section 2.2.2.3), notamment son ambition de reproduire le comportement humain au sein d'une machine. Ce domaine de recherche s'appuie ainsi sur les travaux effectués en sciences cognitives, en particulier sur les modèles de perception de l'homme. La figure 8-6 illustre ainsi une problématique liée à la compréhension des phénomènes de perceptions : « *comment est perçu par l'homme le phénomène physique Ψ à partir des sensations S1 et S2 caractéristiques du phénomène* ? ».

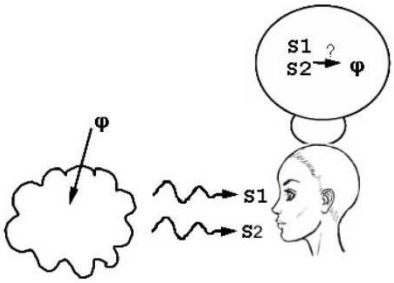


Figure 8-6. Perception humaine et intégration des sensations (S1 et S2) en vue de percevoir un phénomène Ψ (Diard, 2009)

L'une des hypothèses récurrente émise dans ce cadre est que l'homme intègre les perceptions de manière probabiliste (Stein *et al.*, 2008; Ma *et al.*, 2008; Angelaki *et al.*, 2009; Hospedales *et al.*, 2009). La figure 8-7, extraite des travaux de Ernst et Banks (Ernst *et al.*, 2002), illustre ainsi un exemple de cette intégration entre des modalités haptiques et visuelles. Dans cet exemple, chaque modalité est associée à une loi de distribution normale. Ces deux densités de probabilité, alors combinées, produisent une troisième loi normale, dont le maximum correspond au résultat perçu par le sujet à partir des deux modalités.

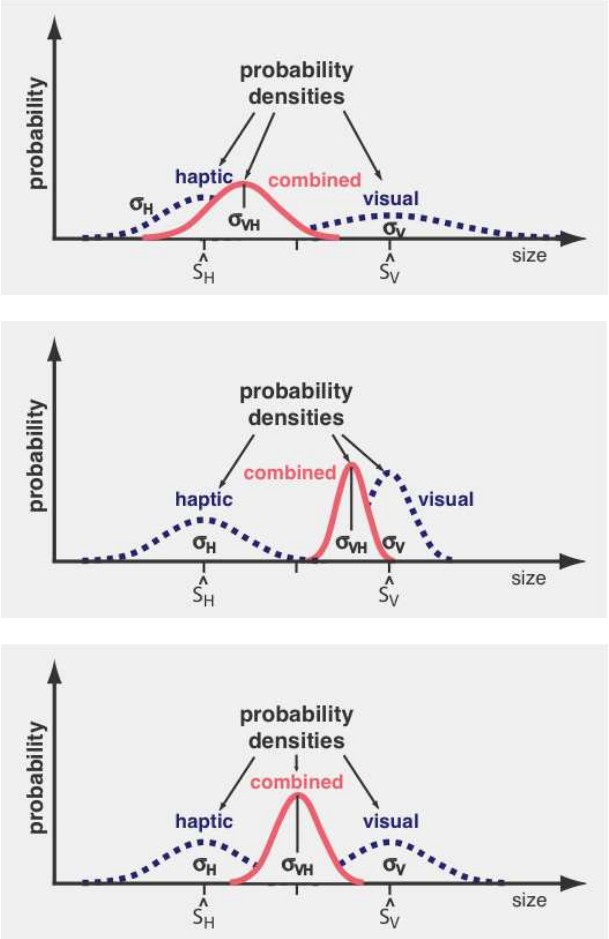


Figure 8-7. Illustration d'intégration de sensations visuelles et haptiques (Ernst *et al.*, 2002)

Nous avons ainsi souhaité vérifier cette hypothèse en l'appliquant aux annotations résultant de nos expérimentations. Pour ceci, nous avons privilégié une approche Bayésienne, d'après le modèle proposé par Colas, Diard et Bessière (Colas *et al.*, 2010). Les auteurs proposent, dans ces travaux de synthèse, de lier une sensation S avec un phénomène ϕ en fonction de (12).

$$P(\phi\ S) = P(\phi)P(S|\phi) \tag{12}$$

Dans le cas multisensoriel, les auteurs proposent alors le modèle illustré en (13), dit naïf, car ce modèle implique de faire une hypothèse d'indépendance entre les différentes sensations S_i.

$$P(\phi\ S_1 \dots S_N) = P(\phi)\prod_{i=1}^{N} P(S_i|\phi) \tag{13}$$

Nous pouvons appliquer ce modèle aux données issues de nos expérimentations. Une représentation graphique du réseau Bayésien est illustrée en figure 8-8, où C est le confort global, S le confort acoustique, T le confort thermique, V le confort Visuel et A la qualité de l'air. Dans notre hypothèse, ces quatre domaines de confort contribuent, seuls et de manière indépendante, au confort global. Ainsi, nous n'intégrons pas, dans ce modèle, les liens possibles entre les différents conforts.

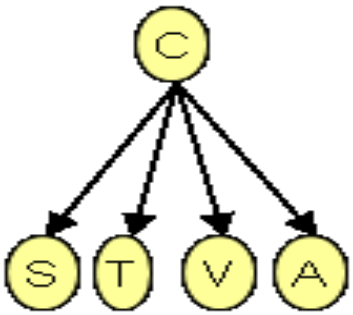


Figure 8-8. Réseau Bayésien utilisé pour l'analyse des conforts

Le corpus de données acquis pendant l'expérimentation a servi de corpus d'apprentissage de ce modèle, permettant ainsi d'initialiser les distributions relatives à chaque nœud du réseau. La figure 8-9 montre ainsi une inférence sur le réseau, du type « *quel est le confort global sachant que le confort acoustique est moyennement désagréable, que le confort thermique est légèrement agréable, que le confort visuel est moyennement agréable, et que le confort olfactif est neutre* ». Le résultat de l'inférence, pour le confort global, est « *très légèrement agréable* ».

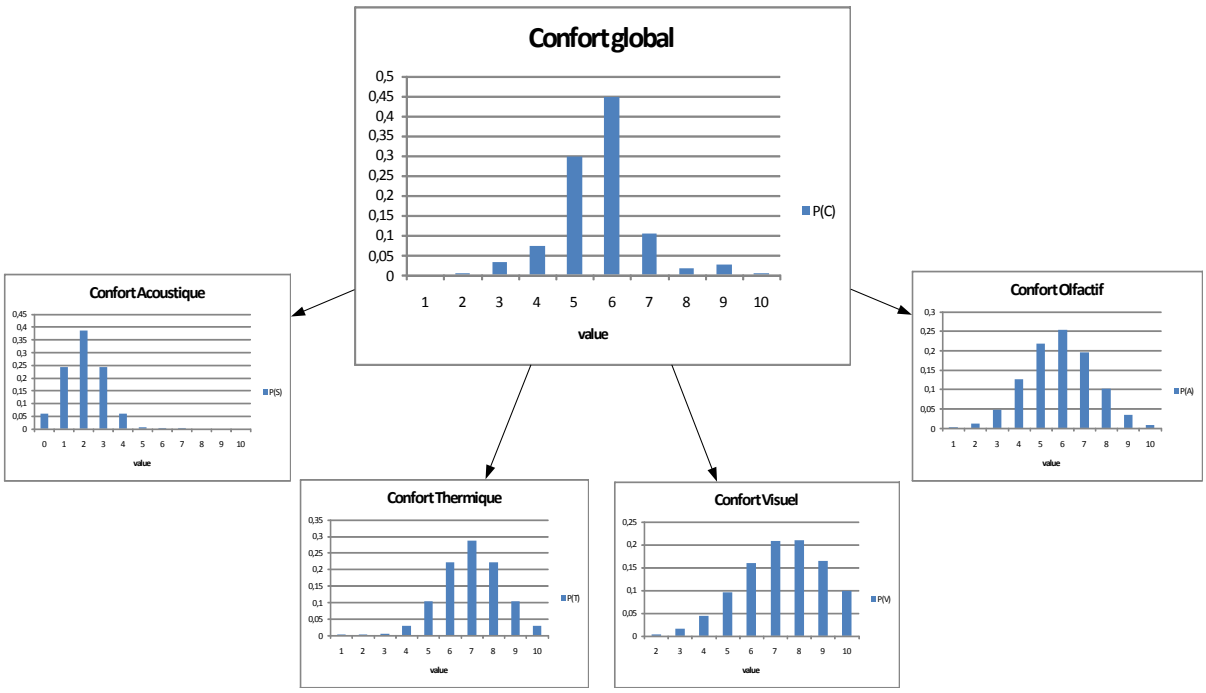


Figure 8-9. Distributions du modèle Bayésien

Cependant, notre hypothèse dans le cadre de cette analyse est que le confort est subjectif. Ainsi, nous avons souhaité connaitre la validité ainsi que la performance du modèle selon le corpus d'apprentissage. Le résultat que nous cherchons est de montrer que les personnes ont des sensibilités différentes sur chacun des conforts mono-sensoriels. Le résultat de l'inférence sur le modèle est donc, *a priori*, plus proche de la réalité si les observations ayant servi à l'apprentissage ne sont issues que du sujet dont nous voulons déterminer la perception de confort.

Pour ceci, nous avons utilisé la méthode de validation croisée « *leave one out* », qui consiste à apprendre un modèle à partir d'un corpus de données auquel on exclut les données servant à l'inférence, afin que celles-ci n'aient pas été apprises durant l'apprentissage. Nous avons ainsi considéré les trois types d'apprentissage suivants :

- Un apprentissage sur l'ensemble du corpus, indépendamment su sujet, en excluant l'annotation de l'inférence (ci-après N-1).
- Un apprentissage sur l'ensemble du corpus, en excluant les annotations du sujet (ci-après N-S).
- Un apprentissage uniquement sur les annotations du sujet (ci-après S-1).

La performance du modèle, à partir de chacun de ces apprentissages, était alors définie en fonction de la distance entre l'annotation du sujet et le résultat inféré, soit la différence absolue entre le résultat et l'annotation. Le résultat de cette analyse de performance est illustré en figure 8-10.

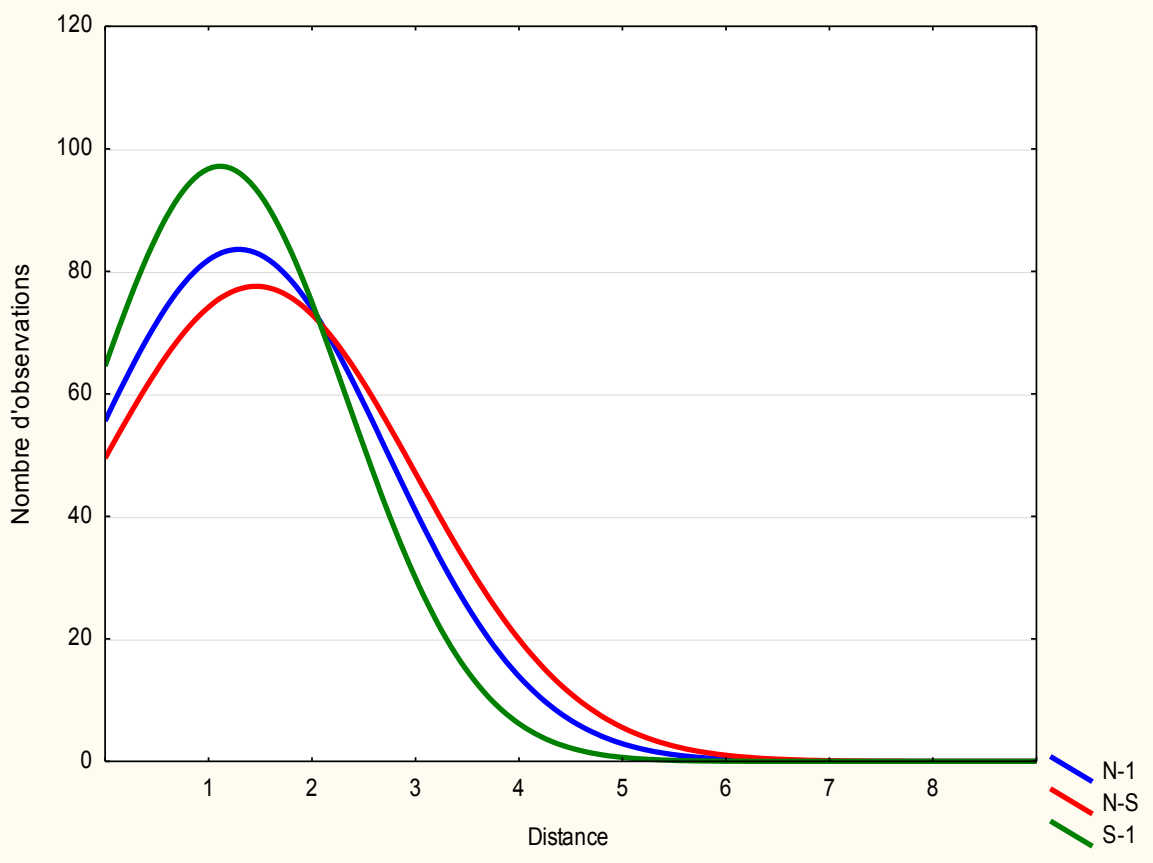


Figure 8-10. Représentation des distances et de leurs fréquences

Le résultat issu de cette analyse nous indique que le distance entre le confort prédit par le modèle et le confort indiqué par l'utilisateur est plus faible lorsque l'apprentissage a été effectué uniquement sur l'ensemble des annotations fournies par le sujet (S-1). A l'inverse, la distance moyenne est plus élevée lorsque l'apprentissage ne s'effectue que sur les données issues des autres sujets (N-S). Les indicateurs de confiance du modèle, présentés au tableau 8-7, renforcent ce résultat : la probabilité moyenne associée au résultat de l'inférence est élevée pour l'apprentissage par sujet, et présente également une distance moyenne plus faible que pour les deux autres méthodes d'apprentissage. L'apprentissage où les observations liées au sujet ont été exclues présente en revanche des chiffres moins confiants.

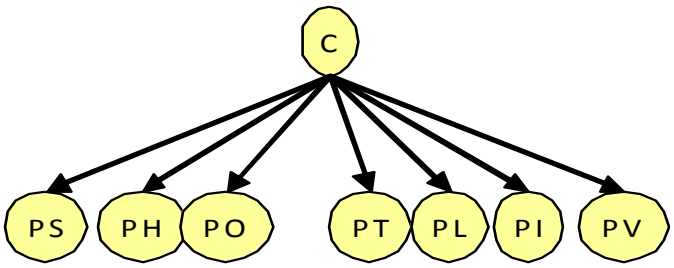
Apprentissage	Probabilité moyenne	Distance Moyenne
N-1	0,400317135	1,385705328
N-S	0,416424353	1,511138918
S-1	0,773998436	1,149015127

Tableau 8-7. Synthèse des indices de confiance pour la corrélation entre le confort global et les conforts spécifiques

Ce résultat conforte l'approche subjective du confort, bien que, dans le cas de l'évaluation « S-1 », le corpus d'apprentissage soit relativement faible en nombre d'observations.

8.2.6.3 Corrélation entre le confort global et les perceptions

Nous avons souhaité savoir s'il était possible de restituer le ressenti de confort global d'un sujet à partir des jugements de perceptions. Pour cela, nous avons réalisé le même type d'analyse que celle présentée pour l'étude de la corrélation entre le confort global et les conforts spécifiques (cf. section 8.2.6.2) en utilisant les données obtenues dans la seconde partie du questionnaire rempli par les sujets. Les questions de la seconde partie du questionnaire annoté durant l'expérimentation sont les questions sur les jugements des participants (le tableau 8-2 synthétise l'ensemble des jugements). En résumé, nous avons conservé l'approche probabiliste décrite précédemment, en substituant les conforts spécifiques par les perceptions. Le modèle obtenu est illustré en figure 8-11.



C	Confort	PT	Perception de la température
PS	Perception du bruit	PL	Perception de la luminosité
PH	Perception de l'humidité	PI	Perception du volume
PO	Perception de l'odeur	PV	Perception de la ventilation

Figure 8-11. Réseau Bayésien utilisé pour l'analyse des perceptions et du confort

Comme pour l'analyse précédente, nous avons effectué une vérification du modèle selon trois types d'apprentissage et une validation croisée. Les résultats de cette validation sont illustrés en figure 8-12 et les indices de confiance dans le tableau 8-8.

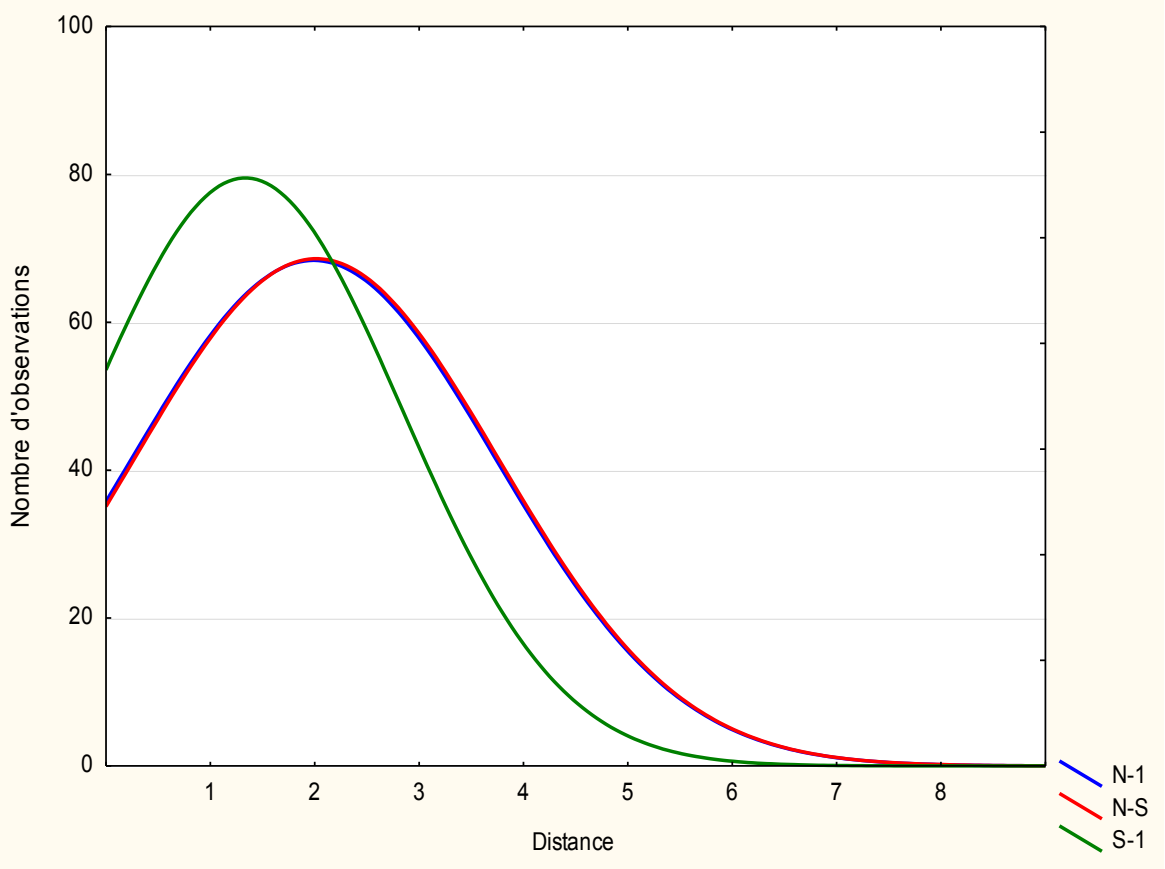


Figure 8-12. Représentation des distances et de leurs fréquences pour le modèle entre le confort global et les perceptions

Comme pour l'analyse précédente, l'approche subjective, caractérisée par l'apprentissage sur un sujet, s'avère la plus performante, ayant la distance moyenne la plus faible et une meilleure confiance en résultat.

Apprentissage	Moyenne des probabilités	Moyenne des distances
N-1	0,416374939	1,979865772
N-S	0,415899664	2,006711409
S-1	0,550818879	1,32885906

Tableau 8-8. Synthèse des indices de confiance pour la corrélation entre le confort global et les perceptions

Les résultats de cette analyse permettent de confirmer l'analyse précédente concernant la subjectivité du confort. De plus, ce modèle Bayésien permet d'intégrer des variables sémantiquement proches des perceptions, comme les grandeurs physiques issues des capteurs. Ces résultats nous ont ainsi conduits à proposer le repère d'ambiance présenté en section 7.2.

8.2.6.4 Corrélation entre les conforts spécifiques et les perceptions

L'une des particularités du questionnaire que nous avons utilisé lors de cette expérimentation est de ne pas associer explicitement les perceptions avec les domaines de confort, contrairement au questionnaire proposé par Rohles *et al*. (Rohles *et al.*, 1989). Cette particularité est volontaire : dans l'hypothèse du confort multisensoriel, les perceptions peuvent participer à un ou plusieurs types de confort. Nous avons en effet présenté, par exemple, les liens entre l'odorat perçu et la température ressentie, ainsi que les liens entre la luminosité et le confort thermique (cf. section 6.4.1).

Nous avons souhaité étudier les liens entre les conforts et les perceptions issues des annotations. Pour ceci, nous avons effectué une analyse de corrélation sur chacune des données, pour l'ensemble des sujets. Les résultats de cette analyse (présentés sous forme de coefficients de Pearson (Howell *et al.*, 2008)) sont présentés au sein du tableau 8-9.

	Température	Humidité	Luminosité	Ventilation	Odorat	Volume	Bruit
Confort	0,084	0,15	0,10	-0,13	0,21	-0,06	0,29
Confort thermique	-0,15	-0,14	0,08	0,04	0,35	0,03	0,27
Confort visuel	0,23	0,40	0,31	-0,25	0,33	0,19	0,27
Qualité de l'air	-0,15	-0,02	0,22	-0,11	0,57	0,09	0,30
Confort acoustique	0,07	-0,04	0,07	-0,23	0,45	0	0,75

Tableau 8-9. Coefficients de Pearson entre les domaines de confort et les perceptions des sujets

Le résultat de cette analyse est mitigé. Certains liens correspondent aux résultats attendus, par exemple, le lien entre la luminosité et le confort visuel, le lien entre l'odorat et la qualité de l'air et le lien entre le confort acoustique et le bruit. Nous constatons également que la ventilation a un effet néfaste sur le confort acoustique, ce qui est en adéquation avec les retours des sujets acquis lors de l'entretien post-expérimental.

Cependant, d'autres résultats sont inattendus. Le confort thermique semble indépendant de la température, température qui a un effet significatif sur le confort visuel, tout comme l'humidité.

Dans le cadre de cette analyse, nous ne pouvons conclure quant au lien entre le jugement des sujets sur les grandeurs physiques et le jugement de ces mêmes sujets sur le ressenti de confort. Les outils statistiques à notre disposition s'avèrent difficiles à mettre en œuvre dans ce contexte, marqués par un nombre important de données que nous considérons comme dépendantes.

8.2.6.5 Influence de l'activité

L'activité du sujet est une variable connue comme influençant le confort. Dans le modèle de Fanger (cf. section 6.3.1.2), elle est caractérisée physiquement et est représentée par un coefficient dans la formule mathématique de détermination de l'indice PMV (5). Dans cette expérimentation, nous avons déterminé trois différentes tâches qui ont chacune leurs caractéristiques et qui constituent chacune un scénario. Les deux premières plaçaient le sujet dans des conditions d'activité physique quasiment nulle, tandis que la dernière tâche (pour l'exécution de la recette de cuisine) nécessitait que le sujet soit physiquement actif. Seule la réalisation de ce dernier scénario permettait une activité qui influait sur le confort thermique du sujet par une production métabolique de chaleur.

L'hypothèse que nous souhaitons vérifier concernant l'influence de l'activité sur le confort est que l'exigence des occupants est plus élevée dans des conditions d'activités physiques et mentales faibles (et inversement plus faible lorsque les tâches du sujet requièrent une concentration mentale ou physique importante). Dans le cas de faible activité, on s'attend à ce que le sujet soit plus attentif à son environnement, contrairement au cas d'activité physique et mentale où l'on s'attend à ce que le sujet soit concentré sur la tâche qu'il effectue. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons analysé les variances des annotations fournies par les sujets, variances présentées au tableau 8-10.

Sujet	Variance S1	Variance S2	Variance S3
1	5,35482695	3,06947805	2,95184107
2	1,65784766	2,96784767	1,74302069
3	3,09582324	3,44608477	7,03784092
4	2,1495742	4,31820818	1,04350101
5	1,28004819	0,93973743	N/A
6	1,52016957	2,68797849	4,44919902
7	2,66412924	3,30635582	3,33545787
8	0,87109468	1,18843908	1,05501651
9	3,1657675	N/A	N/A
10	3,0321804	3,06111649	3,41094587
11	2,731652	8,03533225	5,39093726
12	0,92460234	0,73049742	0,89119264
13	1,31793778	1,08902816	1,52409651
14	2,19460171	2,37312799	1,16180024
15	2,31552951	2,19931486	2,1064279
16	2,44129538	2,50149379	2,05788447
17	1,27546904	1,02507651	1,7546216
18	3,94407687	5,49233997	2,27447497
19	0,84395174	0,6746386	0,33553307
20	5,50179602	3,97823265	4,33811343
Moyenne	2,4141187	2,79391201	2,60343917

Tableau 8-10. Variances des annotations par sujet et par scénario

Les résultats indiquent que la variance moyenne est légèrement plus élevée lors du second scénario, qui présentait une activité physique nulle et nécessitait une faible concentration. Ce qui signifie que lors de la réalisation du scénario, les sujets semblent avoir été plus sensibles aux variations d'ambiance (ou du moins les avoir plus ressenties) que lorsqu'ils ont réalisé les autres scénarios. Cependant, cette observation est plus marquée pour certains sujets (2, 4, 11, 18) que pour d'autres. De plus, il est à noter que les conditions expérimentales ont pu perturber les résultats de cette analyse, en particulier le stress lié à l'annotation. Certains candidats ont en effet indiqué, lors de l'entretien post-expérimental, qu'ils s'étaient concentrés sur leur activité et que, pour cette raison, ils n'ont pas attribué à leur tâche d'annotation toute l'attention. Pour le scénario S1, certains sujets immergés dans le jeu, ne voulaient pas « perdre leur partie » en annotant l'ambiance et pour le scénario S3, certains sujets ont eu une réaction similaire, et ont privilégié l'exécution de la recette plutôt que le déroulement de l'expérimentation.

8.2.7 Conclusion sur l'expérimentation

Les analyses conduites à partir des données obtenues dans cette expérimentation nous permettent de confirmer plusieurs hypothèses. En premier lieu, notre approche multisensorielle du confort se vérifie par l'écart entre les méthodes analytiques du confort et le ressenti du sujet dans le cadre d'une ambiance bruitée. Ces méthodes analytiques utilisent des variables d'ordre physique, telles que la température ambiante et radiante, l'isolement thermique vestimentaire et la production de chaleur des personnes. Si ces variables participent au confort thermique, d'autres facteurs interviennent également pour le ressenti des occupants, dans des proportions pouvant perturber les résultats analytiques.

Cette hypothèse du confort multisensoriel se vérifie également par le modèle que nous avons décrit en section 8.2.6.2. Dans ce modèle, le confort multisensoriel est prédit à partir des conforts spécifiques, avec des écarts de prédiction acceptables, rapportés à l'échelle du questionnaire utilisé. En effet, nous avons choisi une échelle précise par rapport aux travaux similaires (cf. section 7.3.1). Une distance de 1 correspond donc a une marge d'erreur de 10%.

Cette analyse nous a également permis d'observer des différences de sensibilité. Ces différences de sensibilité ont été observées soit en fonction des sujets, comme le montrent les résultats de l'apprentissage du modèle probabiliste, soit en fonction de l'activité, comme le montre l'analyse dédiée.

Cependant, cette conclusion ne porte que sur les conditions spécifiques de notre expérimentation. Le nombre de sujets, bien que varié, est restreint en comparaison de l'étude de Rohles *et al.* (Rohles *et al.*, 1989), qui portait sur 200 sujets. Egalement, les sujets n'étaient pas familiers avec l'environnement, et pouvaient avoir été déstabilisés quant au protocole expérimental. Nous aurions souhaité appliquer d'autres méthodes d'analyse, comme par exemple des analyses sensorielles utilisant des outils dédiés. Cependant, le traitement et en particulier le formatage des données est très couteux en temps et en ressources. De plus, la plupart des outils statistiques ne prennent pas en compte les séries temporelles, telles que celles-que nous avons obtenues.

8.3 Expérimentation « *in simu* »

La seconde expérimentation réalisée sur l'analyse de confort visait à constituer un corpus de données sur des durées plus longues. Les participants visés étaient des personnes familières avec l'environnement expérimental, pour des raisons pratiques d'une part, et pour des facteurs expérimentaux d'autre part. En effet, lors des passations de la première expérimentation, nous avons identifié parmi les facteurs d'inconfort l'aspect psychologique de la non-familiarité avec les lieux. Ainsi, le choix de personnes familières avec l'appartement Domus permettait de simuler plus justement la relation entre l'habitant et l'habitat. Nous souhaitions également mener les séances sur une durée plus longue, faisant intervenir plusieurs activités, et ce de manière non-guidée et non-supervisée.

L'attente de ces travaux était en particulier de valider le modèle adaptatif pour la perception du confort. Ainsi, le protocole a été conçu de manière à favoriser les interactions entre les sujets et les différents objets de l'environnement. Les participants étant des sujets familiers avec l'environnement expérimental, ils étaient également familiers avec la technologie qui le compose et n'avaient aucune réticence à l'utiliser (y compris pour changer des paramètres préenregistrés).

8.3.1 Participants

Les participants à cette expérimentation ont été recrutés parmi les personnes ayant une expérience passée avec l'appartement Domus, afin de faciliter l'utilisation du système intelligent mis en place dans l'appartement. Cette condition était nécessaire de par les objectifs de l'évaluation, et de par l'environnement administratif de l'outil expérimental. Quatre candidats, dont le profil est détaillé en tableau 8-11, se sont ainsi portés volontaires.

N	Date	Sexe	Age
1	18-19/03/2011	M	> 60
2	26-30/03/2011	M	30-40
3	09-10/06/2011	F	20-30
4	22-23/06/2011	F	20-30

Tableau 8-11. Liste et profil des participants à l'expérimentation « *in simu* »

8.3.2 Déroulement et consignes

Il a été demandé à ces candidats d'habiter l'appartement sur une période couvrant au minimum le coucher, la nuit et le lever (soit une présence de 20 heures à 07 heures). Aucune tâche n'était imposée aux sujets, ceux-ci étaient libres de toute activité. Durant leur durée d'occupation des lieux, hors activité de sommeil, il leur était demandé de remplir périodiquement (toutes les 10 minutes) le questionnaire présenté précédemment en figure 8-1.

8.3.3 Données récoltées et sélection

8.3.3.1 Retours sur le déroulement des passations

Lors des expérimentations, un problème majeur est survenu. Le bâtiment d'accueil de la plateforme Domus est instrumenté d'un système d'alarme à intrusion, qui est actif la nuit. Ainsi, afin de pouvoir mener cette étude, nous avons installé un système dérogatif. Cependant, celui-ci s'est avéré inopérant. Pour cette raison, l'expérimentation n°4 a due être interrompue de manière imprévue, l'alarme s'étant déclenchée inopinément durant la phase de sommeil du sujet. Les résultats antérieurs à cette interruption sont néanmoins valides, et n'ont pas été exclus du corpus expérimental.

8.3.3.2 Synthèse des données récoltées

L'objectif de cette expérimentation étant l'étude des interactions entre les sujets et l'environnement, les données principales sont celles liées à la manipulation des différents objets intelligents. La figure 8-13 représente, sur l'ensemble des quatre expérimentations, le nombre de manipulations de chaque objet.

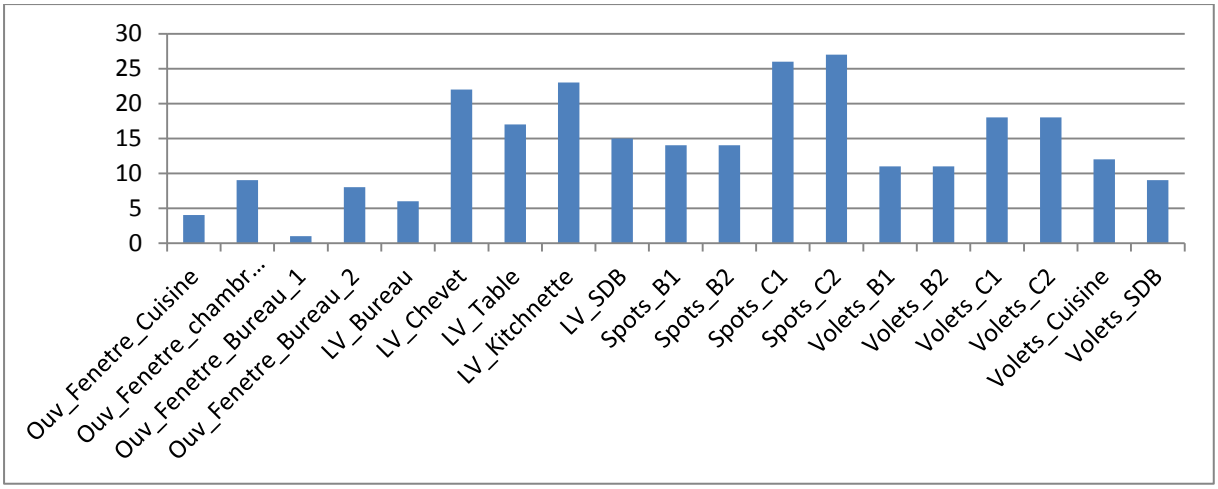


Figure 8-13. Graphique du nombre de manipulations des objets de l'environnement faites par les sujets durant l'expérimentation « *in simu* »

La quantité de données relatives aux interactions est insuffisante pour mener une analyse dont les résultats seraient pertinents (le nombre de participants étant inférieur au nombre minimum de participants requis pour une évaluation (Howell *et al.*, 2008)). De plus, une analyse approfondie du corpus nous indique qu'une partie des interactions reportées en figure 8-13 sont dues aux transitions relatives à la phase de sommeil des sujets, comme le lever et le coucher, ainsi qu'à l'arrivée et au départ du sujet au sein de l'appartement. La quantité de données restante, c'est-à-dire sans ces données, est alors suffisante pour une analyse quantitative.

8.3.4 Perspectives d'analyse

Le corpus de données obtenu suite à cette expérimentation n'était pas suffisamment dense pour pouvoir conduire une analyse sur les interactions, dans le cadre du confort adaptatif tel que nous l'avons présenté en section 7.3.2. Une telle étude nécessite de collecter un nombre d'interactions entre le sujet et l'environnement relativement important afin de pouvoir vérifier notre modèle. Cependant, mener une expérimentation avec un degré de réalisme important, voire sur le terrain, s'avère complexe, comme l'indiquent certaines communications (Kellar et al. 2005). En effet, une longue durée d'habitation nécessite :

- Une disponibilité sur au moins plusieurs jours consécutifs des sujets ;
- Une confiance des sujets quant à la technologie déployée, afin de favoriser les interactions ;
- Une stabilité de l'outil expérimental au cours du temps : mêmes capteurs, même système durant les différentes expérimentations ;
- Une fiabilité de l'outil expérimental suffisant sur la durée de l'expérience, afin d'éviter une angoisse et des interventions répétées de l'expérimentateur.

Egalement, il peut être possible de provoquer des interactions en modifiant artificiellement et de manière transparente certains facteurs d'ambiance. Par exemple, il pourrait être possible de modifier l'ambiance olfactive en générant plusieurs types d'odeurs pour provoquer la mise en route de la ventilation par les habitants. L'appartement Domus n'était pas équipé de manière à intégrer de telles modifications artificielles, celles-ci nécessitant une structure très spécifique dans la philosophie des chambres climatiques.

8.4 Résultats de l'évaluation

L'évaluation que nous avons décrite au sein de ce chapitre a été menée en deux volets distincts. En premier lieu, nous avons mené une expérimentation dans un cadre contrôlé par un expérimentateur, auprès de vingt sujets. Cette configuration nous a permis de valider deux approches que nous avons utilisées au cours de nos travaux : une approche multisensorielle du confort et une approche subjective. En second lieu, nous avons souhaité mener une expérimentation dans une configuration plus libre, avec des sujets endossant alors le rôle d'habitant. Cette expérimentation avait pour but d'analyser les interactions entre les sujets et l'environnement, afin de déduire les facteurs d'ambiance alors inconfortables. Cependant, les données acquises au cours de cette phase d'évaluation ont été insuffisantes pour mener l'étude.

Nous pouvons malgré tout conclure qu'un modèle bayésien du confort est certainement plus pertinent que tout autre modèle car il est le seul à pouvoir prendre en compte les aspects multisensoriels et subjectifs du confort.

Ces expérimentations sont nécessaires pour la validation de nos travaux, mais également pour les études menées sur le confort. Ainsi, nous avons souhaité rendre disponible le corpus de données, comportant les données subjectives ainsi que l'ensemble des traces, à la communauté scientifique(Gallissot *et al.*, 2011)

Il a été envisagé de mener l'expérimentation *in vivo,* chez des habitants particuliers volontaires. Nous avons pour ceci identifié deux habitats, l'un principal, l'autre secondaire, tous deux équipés de système domotique. Ces habitats ont été instrumentés avec le dispositif de collecte de traces décrit dans la première partie de ce document, permettant de collecter les données issues des différents objets communicants déployés dans chacun des habitats. Malgré la collecte, pendant une année de ces données, il n'a pas été possible d'effectuer une analyse probante. En effet, la densité des capteurs présents était trop faible pour collecter suffisamment de données à partir du protocole expérimental utilisé. En effet, l'utilisation du même questionnaire que celui utilisé dans les deux expérimentations présentées dans cette section aurait été trop intrusif pour les habitants de ces deux sites. Enfin, la mise en service de l'instrumentation de ces deux sites a été anticipée par rapport à nos travaux. Certaines données, en particulier celles relatives à l'interaction, ne disposaient pas de moyen de collecte au moment de leur installation, bien qu'elles soient mesurables.

Discussion

Au cours de cette partie, nous avons cherché à comprendre le confort dans le contexte de l'habitat intelligent, que nous avons étudié auparavant. Le confort est une notion complexe à modéliser, car subjective à la personne et labile en fonction du contexte. L'une des approches coutumières pour définir le confort est ainsi de considérer l'absence d'inconfort.

Les définitions de confort pour l'habitat traditionnel peuvent se synthétiser en deux catégories :

- Les méthodes visant à déterminer si un habitat est confortable ou inconfortable ;
- Les méthodes visant à déterminer si un environnement intérieur est confortable ou inconfortable.

Ces méthodes répondent à des besoins différents. Dans le premier cas, ces besoins sont liés au développement durable, où l'habitat est alors « confortable » s'il est écologique, économique et/ou intègre des dimensions sociales. Dans le second cas, les besoins sont d'ordre physiologique, et un habitat est ainsi « confortable » dès lors que la température est acceptable, que l'éclairage est de bonne qualité, et qu'il n'y a pas, ou peu, de pollution de l'air ou de pollution acoustique.

Considérant l'habitat intelligent, les méthodes centrées sur le bâti sont identiques à l'habitat traditionnel, les critères utilisés ne s'appliquant qu'à des critères architecturaux. Nous nous sommes ainsi intéressés au confort d'ambiance, concernant le jugement d'un habitant envers l'environnement intérieur.

L'une des caractéristiques de l'habitat intelligent est sa composition d'objets intelligents, objets qui peuvent percevoir l'environnement, raisonner et réagir sur l'environnement. Ainsi, en utilisant ces aptitudes, il est alors possible de décomposer l'ambiance par ses constituants. Nous avons proposé en ce sens un repère d'ambiance qui permet de modéliser les propriétés d'une ambiance, par ces objets intelligents. Notre approche est également de considérer que chaque manipulation d'objet est activée par un inconfort. Nous avons ainsi également présenté un modèle dont le but est de resituer, à partir d'une interaction, la source d'inconfort.

Les expérimentations que nous avons menées au sein de l'appartement Domus nous ont permis de valider notre approche subjective du confort, et de vérifier la perception multisensorielle d'une ambiance par les habitants. Cependant, le contexte d'expérimentation n'était pas adapté pour mener des études plus approfondies quant à la pertinence de nos modèles proposés. Les études similaires se basent en effet sur des expérimentations durant plusieurs années (Nicol *et al.*, 2010; Haldi *et al.*, 2010b).

Sous son angle subjectif, le confort est un domaine de recherche qui a encore de longs jours devant lui. Nous avons considéré le confort comme étant multisensoriel. Les travaux appliqués au bâtiment intelligent restent malgré tout mitigés sur ce point : certaines études l'affirment ou le soupçonnent (Bruant, 1998; Candas *et al.*, 2005), et d'autres études l'infirment (Fanger *et al.*, 1977; Haldi *et al.*, 2010b). Hors contexte du confort, la perception multisensorielle telle que nous l'avons présentée est de plus en plus acquise. Suite à notre évaluation expérimentale, l'hypothèse d'un confort d'ambiance comme étant global nous est crédible.

Conclusion et perspectives

« *C'est une bien pauvre science que celle qui ne peut s'exprimer par la mesure* »

Kelvin

Synthèse

Au cours de ce manuscrit, nous nous sommes intéressés à la notion de confort multisensoriel au sein des habitats intelligents. Pour ceci, nous avons dû en premier lieu définir le concept d'habitat intelligent. Nous avons ainsi vu que ce concept résultait de deux évolutions auparavant distinctes : l'évolution naturelle de l'habitat, qui s'illustre au fil des siècles par des problématiques sociétales, ainsi que le progrès technique, très marqué au cours du XXème siècle avec la démocratisation de l'électricité, de l'électronique et l'apparition de l'informatique. La domotique était précurseur de l'habitat intelligent, en appliquant aux bâtis des automatismes interconnectés permettant alors d'automatiser le quotidien des habitants.

Aujourd'hui, l'informatique et l'habitat partagent une problématique : l'interopérabilité. Sous ce terme d'interopérabilité se cachent des problématiques de représentation de connaissance, de savoir-faire et de collaboration. Ainsi, cette problématique s'illustre non seulement dans la diversité des technologies, mais également dans la diversité des rôles et des usages appliqués à l'habitat. En ce sens, considérer l'interopérabilité technique nécessite de considérer l'interopérabilité organisationnelle.

Nous avons ainsi proposé une méthode permettant de rendre interopérables les différents objets intelligents composant l'habitat. Cette méthode est centrée sur l'application de l'objet, telle que vue par des personnes expertes et telle que vue par des utilisateurs. Nous nous sommes appuyés sur le critère d'interchangeabilité afin de situer le niveau d'interopération requis. Ainsi, deux objets interopérables ne sont pas que deux objets qui échangent des données, mais également deux objets qui peuvent comprendre et utiliser ces données.

Ayant défini l'habitat intelligent, de nouvelles perspectives s'offrent alors pour améliorer la qualité de vie des habitants. La littérature considère depuis plusieurs dizaines d'années (Brun *et al.*, 1988; Sarrat, 1989; Cancellieri, 1992; Haddon, 1996) trois axes de développement pour l'habitat du futur : le confort, la santé et l'énergie, positionnant ainsi l'habitat dans l'axe du développement durable. Nous nous sommes ainsi intéressés au confort, afin de répondre à la question « Comment l'intelligence de l'habitat peut-elle améliorer le confort et le bien-être des habitants » ?

Nous avons vu que le confort était une notion complexe à modéliser. Cette notion, appliquée à l'habitat, dépend de facteurs physiologiques pour le confort d'ambiance, mais également de facteurs psychologiques voire sociétaux pour le confort du bâti, voire le confort de demeure. Nous nous sommes intéressés au confort d'ambiance en particulier, en considérant quatre axes : le confort thermique, le confort visuel, le confort olfactif ainsi que le confort acoustique. La modélisation du confort d'ambiance peut alors se faire indépendamment de chacun de ces axes, ou alors de manière globale, multisensorielle, tel que nous le proposons.

Nous avons ainsi proposé, en adéquation avec les possibilités offertes par l'habitat intelligent, deux modèles : l'un permettant de caractériser une ambiance, l'autre permettant de déduire, à partir des interactions des habitants, le confort de l'ambiance. Ces deux modèles sont centrés sur les objets intelligents, soit dans ses capacités de perception et de réaction sur l'environnement intérieur, soit par son usage.

L'ensemble de ces travaux s'est appuyé sur l'appartement intelligent Domus, qui a servi de lieu d'intégration pour la première partie, et de lieu d'expérimentation pour la seconde.

Considérant le confort appliqué à l'habitat, il est intéressant de constater que celui qui était auparavant considéré comme un biais des équations mathématiques, l'habitant, devient aujourd'hui le centre des recherches. Les travaux récents sur le confort se focalisent ainsi sur la personne, en particulier sur son comportement, donnant lieu au confort adaptatif. Cette nouvelle approche du confort disqualifie peu à peu l'application des lois thermodynamiques au profit des modèles cognitifs, étudiant alors perception et action. En effet, face aux dimensions physiologiques et psychologiques du confort, l'homme reste, et restera, le meilleur « capteur ».

Perspectives

Les travaux que nous avons développés au sein de ce manuscrit nous conduisent à plusieurs perspectives, respectivement concernant le passage à l'échelle ainsi que dans les ouvertures vers d'autres disciplines.

L'un des résultats principaux de cette thèse est d'orienter la modélisation du confort vers des modèles stochastiques (Bayésiens en particulier). Les évaluations que nous avons détaillées au sein du chapitre 8 nous ont confortés dans le choix de cette approche. Ces évaluations demandent à être complétées. Comme nous l'avons mis en évidence tout au long de ce manuscrit, le caractère particulier de l'habitat rend essentiel de mener des expérimentations *in vivo.* Ces expérimentations doivent être menées chez des particuliers, et sur une durée d'au moins un an, afin de collecter un jeu de données adaptées à chaque saison. Ce type d'expérimentations pose de nouveaux verrous, particulièrement sur le caractère éthique de la collecte de données pouvant contenir des informations à caractère privé. Il n'existe en effet pas encore de cadre réglementaire concernant les conditions de mises en place de telles expérimentations.

Plusieurs initiatives sont en cours à l'issue de ces travaux afin d'exploiter les résultats. Ainsi, le modèle d'interopérabilité décrit au sein de la partie 1 a été transféré dans le monde industriel, pour une commercialisation à court terme par la société SIRLAN Technologies, ayant fournie la technologie de base à l'implémentation du modèle. Le modèle de gestion d'ambiance et de confort est également à l'étude. L'un des axes envisagés est de réduire la multi dimensionnalité du réseau bayésien et d'y inclure un discriminant énergétique afin de proposer aux habitants un confort identique à coût moindre.

Enfin, deux axes d'évolution de nos travaux exploitent l'aspect pluridisciplinaire de notre étude qui ouvre des perspectives dans les domaines de l'architecture et du commercial.

En ce qui concerne le domaine de l'architecture, avons exposé au sein de la section 7.2.3, les objets intelligents, et l'ambiance intelligente de manière générale, qui apportent de nouvelles solutions qui peuvent être appliquées dans le domaine de la modélisation d'ambiance, telle qu'elle est considérée par les architectes. Notre proposition est basée sur des travaux issus de ce domaine, travaux proposés pour une étude pédagogique des ambiances.

Le critère d'interchangeabilité comme moyen de considérer l'interopérabilité a un impact commercial, en particulier dans les stratégies de prospection de marchés. Ce critère impose que l'objet soit normalisé, et limite ainsi les disparités d'un constructeur à l'autre. Ainsi, sur le plan commercial, les constructeurs offrants des objets normalisés n'ont que très peu de marges de différenciations vis-à-vis de leurs constructeurs, et sont tentés d'adopter des systèmes propriétaires. Cependant, nous avons démontré au cours de la partie 1 qu'un niveau strict d'interopérabilité permettait le développement de services de haut niveau, ne pouvant être intégrés au sein d'un objet. Une des problématiques est donc l'équilibre de la valeur ajoutée, entre celle contenue dans un objet (valeur ajoutée du constructeur), et celle rendue possible par l'ouverture de l'objet (valeur ajoutée des fournisseurs de services).

Bibliographie

ADEME. (2007). *Bâtiment et Démarche HQE* (p. 20). ISBN:978-2-86817-850-2

AFNOR. (2007). *NF EN 15251 : Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique*. Paris, France. Note : Association française de normalisation

AFNOR. (2010). *NFC 15-100 Réglementation des installations électriques en basse tension en France*. Paris, France. Note : Association française de normalisation

Adams, N., Gold, R., Schilit, B. N., Tso, M. M., & Want, R. (1993). « An infrared network for mobile computers ». *Mobile & Location-Independent Computing Symposium on Mobile & Location-Independent Computing Symposium* (p. 5). Berkeley, CA, USA: USENIX Association.

Aleksy, M., Schader, M., & Tapper, C. (1999). « Interoperability and interchangeability of middleware components in a three-tier CORBA-environment-state of the art ». *Enterprise Distributed Object Computing Conference, 1999. EDOC '99. Proceedings. Third International* (pp. 204-213). doi:10.1109/EDOC.1999.792064

Allaire, S. (2006). « Les affordances socio numériques d'un environnement d'apprentissage hybride en soutien à des stagiaires ». Thèse Université Laval.

Amphoux, P. (1989). « Vers une théorie des trois conforts ». *Innovation et confort dans l'habitat, les techniques en question*. Paris, France.

Amphoux, P. (2002). « L'innovation à l'usage, vers une théorie des trois conforts. ». Note : Support de cours DEA Ambiances Architecturales et Urbaines

Angelaki, D. E., Gu, Y., & DeAngelis, G. C. (2009). « Multisensory integration: psychophysics, neurophysiology, and computation. ». *Current Opinion in Neurobiology*, *19*(4), 452-458. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conb.2009.06.008

Ango-Obiang, M.-F. (2007). « Le travail collaboratif dans le cadre d'un projet architectural ». *The Computing Research Repository*, *706*.

Ascher, F., Cohen, J.-L., & Hauvuy, J.-C. (1987). « Luxe, habitat, confort : les références hôtelières ». Note : Rapport, LTMUPD-IFU Paris 8 ARDU, PUCA

Baccino, T., Bellino, C., & Colombi, T. (2004). *Mesure de l'utilisabilité des interfaces*. Hermes Science Publications. ISBN:2746210266

Baïna, S. (2006). « Interopérabilité dirigée par les modèles : Une Approche Orientée Produit pour l'interopérabilité des systèmes d'entreprise. ». Thèse Université Henri Poincaré, Nancy I.

Beigl, M., & Gellersen, H. (2003). « Smart-Its: An Embedded Platform for Smart Objects ». *In Proc. Smart Objects Conference (SOC 2003* (pp. 15-17). doi:10.1.1.14.8410

Beigl, M., Gellersen, H.-W., & Schmidt, A. (2001). « Mediacups: experience with design and use of computer-augmented everyday artefacts ». *Computer Networks*, *35*(4), 401-409. doi:10.1016/S1389-1286(00)00180-8

Bellia, L., Bisegna, F., & Spada, G. (2011). « Lighting in indoor environments: Visual and non-visual effects of light sources with different spectral power distributions ». *Building and Environment*, *46*(10), 1984-1992. doi:10.1016/j.buildenv.2011.04.007

Bievre, T., Elithis, D. G., Fontgalland, J. D. E., Réalisations, A. R. T., Et, S., Du, T., & Entreprise, I. D. (2009). « Bâtiments intelligents : comment allier confort des occupants et réduction des charges ? ». *Architecture*.

Bjelica, M. Z., Papp, I., Teslic, N., & Coulon, J.-M. (2010). « Set-top box-based home controller ». *IEEE 14th International Symposium on Consumer Electronic (ISCE)* (pp. 1-6). doi:10.1109/ISCE.2010.5523704

Bodart, M. (2002). « Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, selon des critères physiques, économiques et écologiques, pour un meilleur confort visuel et thermique ». Thèse Université catholique de Louvain.

Bonhomme, S. (2008). « Méthodologie et outils pour la conception d'un habitat intelligent ». Thèse Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT.

Bonino, D., Castellina, E., & Corno, F. (2008). « DOG: An Ontology-Powered OSGi Domotic Gateway ». *20th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI'08)* (Vol. 1, pp. 157-160). Dayton, OH, USA. doi:10.1109/ICTAI.2008.115

Bonino, D., & Corno, F. (2011). « What would you ask to your home if it were intelligent? Exploring user expectations about next-generation homes ». *J. Ambient Intell. Smart Environ.*, *3*(2), 111-126. Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands: IOS Press.

Boray, P. F., Gifford, R., & Rosenblood, L. (1989). « Effects of warm white, cool white and full-spectrum fluorescent lighting on simple cognitive performance, mood and ratings of others ». *Journal of Environmental Psychology*, *9*(4), 297-307. doi:10.1016/S0272-4944(89)80011-8

Borovoy, R., McDonald, M., Martin, F., & Resnick, M. (1996). « Things that blink: Computationally augmented name tags ». *IBM Systems Journal*, *35*(3.4), 488-495. doi:10.1147/sj.353.0488

Bottaro, A., Bourcier, J., Escoffier, C., Donsez, D., & Lalanda, P. (2007). « A Multi-Protocol Service-Oriented Platform for Home Control Applications ». *Proc. of 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC) 2007, Las Vegas,11-13 Janvier 2007.* doi:10.1109/CCNC.2007.239

Boulet, S. (2009). « Caractérisation du confort hygrothermique et acoustique dans les constructions à base de bois ». Thèse Université de Savoie.

Branly, É. (1905). *Appareil de Télémécanique sans fil de ligne*. Paris, France: Académie des sciences.

Bratman, M. E., Israel, D. J., & Pollack, M. E. (1988). « Plans and resource-bounded practical reasoning ». *Computational Intelligence*, *4*(3), 349-355. Blackwell Publishing Ltd. doi:10.1111/j.1467-8640.1988.tb00284.x

Brdiczka, O., Langet, M., Maisonnasse, J., & Crowley, J. L. (2009). « Detecting Human Behavior Models From Multimodal Observation in a Smart Home ». *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, *6*(4), 588-597. doi:10.1109/TASE.2008.2004965

Bruant, M. (1998). « Développement et paramétrage de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance ». Thèse INSA Lyon.

Brun, A. (2011). « Amélioration du confort d'été dans des bâtiments à ossature par ventilation de l'enveloppe et stockage thermique ». Thèse Université de Grenoble.

Brun, P., & Décamps, E. A. (1988). *La domotique* (p. 125). Paris: Presses universitaires de France. ISBN:9782130419846

Budd, G. M. (2008). « Wet-bulb globe temperature (WBGT)—its history and its limitations ». *Journal of Science and Medicine in Sport*, *11*(1), 20-32. doi:10.1016/j.jsams.2007.07.003 Note : Heat Stress in Sport

Bérisé, C. (1995). *Gëorgia Knap, l'inventeur troyen* (p. 183). Editions de la Maison du boulanger. ISBN:9782950789549

CERTU. (2002). *Mémento technique du bâtiment*, 19.

Caelen, J. (1999). « La plate-forme MultiCom : un laboratoire d'usage et d'utilisabilité ». *Interfaces Homme Machine* (pp. 69-75). Cépaduès Ed.

Caelen, J., Jambon, F., & Vidal, A. (2005). « Conception participative : des "Moments" à leur instrumentation ». *Revue d'Interaction Homme-Machine (RIHM)*, *6*(2), 1-29.

Caelen, J., & Milien, E. (2002). *The SIRLAN project*.

Cain, W. S., Leaderer, B. P., Isseroff, R., Berglund, L. G., Huey, R. J., Lipsitt, E. D., & Perlman, D. (1983). « Ventilation requirements in buildings—I. Control of occupancy odor and tobacco smoke odor ». *Atmospheric Environment (1967)*, *17*(6), 1183-1197. doi:10.1016/0004-6981(83)90341-4

Cancellieri, A. (1992). *L'habitat du futur: défis et prospective pour le prochain quart de siècle* (p. 484). Paris, France: Documentation française. ISBN:2-11-002868-8

Candas, V., & Dufour, A. (2005). « Thermal Comfort: Multisensory Interactions? ». *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, *24*(1), 33-36.

Carter, S. M., & West, M. A. (1998). « Reflexivity, effectiveness, and mental health in BBC-TV production teams ». *Small group research*, *29*(5), 583-601. Sage.

Castellani, A. P., Bui, N., Casari, P., Rossi, M., Shelby, Z., & Zorzi, M. (2010). « Architecture and Protocols for the Internet of Things: A Case Study ». *PerCom 2010 Workshops: Proceedings of the 8th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, Mannheim, Germany* (pp. 678-683). doi:10.1109/PERCOMW.2010.5470520 ISBN:978-1-4244-6605-4

Castéran, B., & Ricroch, L. (2008, July). « Les logements en 2006 : le confort s'améliore, mais pas pour tous ». *INSEE Première*.

Cea Ramirez, A. (2006). « Contribution à la Modélisation et à la Gestion des Interactions Produit-Processus dans la Chaîne Logistique par l'Approche Produits Communicants ». Thèse Université Henri Poincaré - Nancy I.

Centnerovà, L. H., & Boerstra, A. (2010). « Comfort is more than just thermal comfort ». *Adapting to Change: New Thinking on Comfort* (p. Electronic support). London, UK: NCEUB (Network for Comfort and Energy Use in Buildings).

Chan, M., Estève, D., Escriba, C., & Campo, E. (2008). « A review of smart homes—Present state and future challenges ». *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, *91*(1), 55-81. doi:10.1016/j.cmpb.2008.02.001

Chaudron, B. (2005). « Nos bâtiments changent de couleur ». *LUX*, *223*, 40-42.

Chelkoff, G. (2002). « Problématique du Confort et de l'Inconfort dans l'espace construit ». Note : Support de cours DEA Ambiances Architecturales et Urbaines

Chen, D., & Doumeingts, G. (2003). « European initiatives to develop interoperability of enterprise applications—basic concepts, framework and roadmap ». *Annual Reviews in Control*, *27*(2), 153-162. doi:10.1016/j.arcontrol.2003.09.001

Chen, G., & Szymanski, B. K. (2001). « Component-oriented simulation architecture: Toward interoperability and interchangeability ». *Simulation Conference, 2001. Proceedings of the Winter* (Vol. 1, pp. 495 -501 vol.1). doi:10.1109/WSC.2001.977329

Chettaoui, H. (2008). « Interopérabilité entre modèles hétérogènes en conception coopérative par des approches d'Ingénierie Dirigée par les Modèles ». Thèse Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG.

Clanché, F., Kabadi, M. G., & Hamelin, F. (2011). « Plate-forme pour l'optimisation énergétique des habitats intelligents ». *Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, CETSIS'2011* (p. CDROM). Trois-Rivières, Canada.

Clausen, G., Carrick, L., Fanger, P. O., Kim, S. W., Poulsen, T., & Rindel, J. H. (1993). « A Comparative Study Of Discomfort Caused By Indoor Air Pollution, Thermal Load And Noisec ». *Indoor Air*, *3*(4), 255-262. Munksgaard International Publishers. doi:10.1111/j.1600-0668.1993.00006.x

Colas, F., Diard, J., & Bessière, P. (2010). « Common Bayesian Models for Common Cognitive Issues ». *Acta Biotheoretica*, *58*(2), 191-216. Springer Netherlands. doi:10.1007/s10441-010-9101-1

Cook, D. J., Youngblood, M., Heierman E.O., I. I. I., Gopalratnam, K., Rao, S., Litvin, A., & Khawaja, F. (2003). « MavHome: an agent-based smart home ». *Pervasive Computing and Communications, 2003. (PerCom 2003). Proceedings of the First IEEE International Conference on* (pp. 521-524). doi:10.1109/PERCOM.2003.1192783

Le Corbusier. (1924). *Vers une architecture*. G. Crès et Cie.

Coutaz, J. (1987). « PAC, an Implementation Model for the User Interface ». *IFIP TC13 Human-Computer Interaction (INTERACT'87)* (pp. 431-436). Stuttgart.

Coutaz, J., & Crowley, J. (2008). « Plan "Intelligence Ambiante" : Défis et Opportunités ». Note : 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.

Coutaz, J., Crowley, J. L., Dobson, S., & Garlan, D. (2005). « Context is key ». *Communication of the ACM (CACM)*, *48*(3), 49-53. New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/1047671.1047703

Darby, S. (2006). *The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption: A REview for DEFRA of the Liternature on Metering, Billing and Direct Displays* (Environmental Change Institute, University of Oxford). *A Review for DEFRA of the Literature on Metering Billing and direct Displays*, *22nd*(April), pp33-35. Environmental Change Institute, University of Oxford.

Day, J., Matta, I., & Mattar, K. (2008). « Networking is IPC: a guiding principle to a better internet ». *Proceedings of the 2008 ACM CoNEXT Conference* (p. 67:1--67:6). New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/1544012.1544079 ISBN:978-1-60558-210-8

Delepaut, G. (2007). « Contribution de la linguistique cognitive à l'identification du confort : analyse des discours des passagers sur le confort en train ». Thèse Université de la Sorbonne nouvelle - Paris III.

Depaulis, F. (2002). « Vers un environnement générique d'aide au développement d'applications interactives de simulations de métamorphoses ». Thèse Université de Poitiers.

Deval, J.-C. (1984). « Le confort thermique en climat tempéré ». *Revue de Physique Appliquée*, *19*(7), 513-531. doi:10.1051/rphysap:01984001907051300

Dey, A. K. (2001). « Understanding and Using Context ». (A. K. Dey, G. Kortüm, D. R. Morse, & A. Schmidt, Eds.)*Personal and Ubiquitous Computing*, *5*(1), 4-7. Springer-Verlag. doi:10.1007/s007790170019

Diard, J. (2009). « Comparaison et sélection Bayésienne de modèles ». Grenoble, France. Note : Support de cours Congition Bayésienne

Djongyang, N., Tchinda, R., & Njomo, D. (2010). « Thermal comfort: A review paper ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(9), 2626-2640. doi:10.1016/j.rser.2010.07.040

Donsez, D. (2007). « La plate-forme dynamique de services OSGi ». In ICAR (Ed.), *Intergiciel et Construction d'Applications Réparties* (pp. 207-223). ICAR.

Duss, R., & Salamolard, L. (2005). « La Domotique : La Maison du Futur ». *Anthropologie culturelle et sociale : Recherche*, *La société*.

ECA. (1992). « Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings ». *Environement and Quality of Life*, *11*. Note : European Collaborative Action

Edwards, W. K., & Grinter, R. E. (2001). « At Home with Ubiquitous Computing: Seven Challenges ». *Proceedings of the 3rd international conference on Ubiquitous Computing* (pp. 256-272). London, UK, UK: Springer-Verlag. ISBN:3-540-42614-0

Eggen, B., Hollemans, G., & van de Sluis, R. (2003). « Exploring and enhancing the home experience ». *Cognition, Technology & Work*, *5*(1), 44-54. Springer London. doi:10.1007/s10111-002-0114-7

Ekambi-Schmidt, J. (1972). *La perception de l'habitat* (p. 186). Editions Universitaires.

El Baamrani, P. (2009). « Éclairage et santé - Performance et confort visuels ». *Brèves de l'AFE*, 1-2.

Emmerich, S. J., & Persily, A. K. (2003). *State-of-the-art review of CO2 demand controlled ventilation technology and application*. Diane Pub Co. ISBN:9780756728366

Engrand, L. (2003). « Le confort ou la démocratisation du bien-être en question ». *Habitat, confort et énergie: actes de la 13ème Journée du Cuepe, Colloque du cycle de formation du Cuepe*. Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (Cuepe).

Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). « Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion ». *Nature*, *415*(6870), 429-433. doi:10.1038/415429a

Fang, L., Clausen, G., & Fanger, P. O. (1998). « Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality ». *Indoor Air*, *8*(2), 80-90. Munksgaard International Publishers. doi:10.1111/j.1600-0668.1998.t01-2-00003.x

Fanger, P. O. (1967). « Calculation of thermal comfort: introduction of a basic comfort equation ». *ASHRAE transactions*, *73*(2).

Fanger, P. O. (1973). « Assessment of thermal comfort practice ». *Occupational and Environmental Medicine*, *30*(August 2009), 313-324. doi:10.1136/oem.30.4.313

Fanger, P. O. (1988). « Introduction of the olf and the decipol units to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors ». *Energy and Buildings*, *12*(1), 1-6. doi:10.1016/0378-7788(88)90051-5

Fanger, P. O., Breum, N. O., & Jerking, E. (1977). « Can Colour and Noise Influence Man's Thermal Comfort? ». *Ergonomics*, *20*(1), 11-18. doi:10.1080/00140137708931596

Farhangi, H. (2010). « The path of the smart grid ». *Power and Energy Magazine, IEEE*, *8*(1), 18-28. doi:10.1109/MPE.2009.934876

Fontoynont, M. (1999). « Confort visuel ». Note : Support de cours DEA Ambiances Architecturales et Urbaines

GOSPI. (2007). « Interopérabilité : définitions, concepts et approches ». Lyon, France. Note : Draft

Gallissot, M., Arfib, D., & Valls, V. (2010). « TangiLight: a tangible interface for complex dynamic lighting control ». *Proceedings of KNX 2010 Scientific Conference*. Pampelona, Spain: KNX Association.

Gallissot, M., Caelen, J., Bonnefond, N., Meillon, B., & Pons, S. (2011). *Using the Multicom Domus Dataset* (LIG), (RR-LIG-020), 20. Grenoble, France: LIG. ISBN:2105-0422

Gaver, W. W. (1991). « Technology affordances ». *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Reaching through technology* (pp. 79-84). New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/108844.108856 ISBN:0-89791-383-3

Gibson, J. J. (1979). *The Ecological Approach To Visual Perception* (p. 332). Houghton Mifflin. ISBN:9780395270493

Gifford, R. (1988). « Light, decor, arousal, comfort, and communication ». *Journal of Environmental Psychology*, *8*, 177-189.

Giroux, S., & Pigot, H. (2005). *From smart homes to smart care: ICOST 2005, 3rd International Conference on Smart Homes and Health Telematics*. IOS Press. ISBN:9781586035310

Givoni, B., & Izard, J. L. (1978). *L'homme, l'architecture et le climat*. Éditions du Moniteur. ISBN:9782862820149

Goldberg, A. (1984). *SMALLTALK-80: the interactive programming environment*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. ISBN:0-201-11372-4

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. (Addison-Wesley, Ed.) (p. 432). Boston, MA, USA: Addison-Wesley. ISBN:0201157675

Haddon, L. (1996). « Home Automation: Research Issues ». In M. Silverstone, R. and Hartmann (Ed.), *The Smart Home: Research Perspectives*. Note : EMTEL working paper

Haldi, F., & Robinson, D. (2010a). « On the unification of thermal perception and adaptive actions ». *Building and Environment*, *45*(11), 2440-2457. doi:10.1016/j.buildenv.2010.05.010

Haldi, F., & Robinson, D. (2010b). « Towards a Unified Model of Occupants' Behaviour and Comfort for Building Energy Simulation ». Thèse EPFL, Lausanne. doi:10.5075/epfl-thesis-4587

Harper, R. (2003). *Inside the smart home*. Springer. ISBN:9781852336882

Helal, S., Mann, W., El-Zabadani, H., King, J., Kaddoura, Y., & Jansen, E. (2005). « The Gator Tech Smart House: a programmable pervasive space ». *Computer*, *38*(3), 50-60. doi:10.1109/MC.2005.107

Hertzberg, H. T. E. (1958). *Seat comfort*, 297-300. Dayton, OH.

Von Hippel, E. (2005). *Democratizing innovation*. *Journal of Product Innovation Management* (Vol. 23, p. 204). MIT Press. doi:10.1111/j.1540-5885.2006.00192_2.x ISBN:0262002744

Holmquist, L. E., Gellersen, H. W., Kortuem, G., Antifakos, S., Michahelles, F., Schiele, B., Beigl, M., *et al.* (2004). « Building intelligent environments with Smart-Its ». *Computer Graphics and Applications, IEEE*, *24*(1), 56-64. doi:10.1109/MCG.2004.1255810

Van Hoof, J. (2008). « Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? ». *Indoor Air*, *18*(3), 182-201.

Hospedales, T., & Vijayakumar, S. (2009). « Multisensory oddity detection as bayesian inference. ». *PloS one*, *4*(1), e4205. doi:10.1371/journal.pone.0004205

Howell, D. C., Yzerbyt, V., Rogier, M., & Bestgen, Y. (2008). *Méthodes statistiques en sciences humaines*. De Boeck. ISBN:9782804156855

Humphreys, M. A., & Nicol, J. F. (1998). « Understanding the adaptive approach to thermal comfort ». *ASHRAE transactions Symposia*, *104*(1b), 991-1004. ASHRAE.

IEEE. (1991). « IEEE Standard Computer Dictionary. A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries ». *IEEE Std 610*, 1. doi:10.1109/IEEESTD.1991.106963

Intille, S. S. (2002). « Designing a home of the future ». *Pervasive Computing, IEEE*, *1*(2), 76-82. doi:10.1109/MPRV.2002.1012340

Intille, S. S., Larson, K., Beaudin, J. S., Nawyn, J., Tapia, E. M., & Kaushik, P. (2005). « A living laboratory for the design and evaluation of ubiquitous computing technologies ». *CHI '05 extended abstracts on Human factors in computing systems* (pp. 1941-1944). New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/1056808.1057062 ISBN:1-59593-002-7

Intille, S., Larson, K., Tapia, E., Beaudin, J., Kaushik, P., Nawyn, J., & Rockinson, R. (2006). « Using a Live-In Laboratory for Ubiquitous Computing Research ». In K. Fishkin, B. Schiele, P. Nixon, & A. Quigley (Eds.), *Pervasive Computing* (Vol. 3968, pp. 349-365). Springer Berlin / Heidelberg. doi:10.1007/11748625_22 ISBN:978-3-540-33894-9

Ishii, H., & Ullmer, B. (1997). « Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms ». *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 234-241). New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/258549.258715 ISBN:0-89791-802-9

Jambon, F., Mandran, N., Meillon, B., & Perrot, C. (2010a). « Evaluation des systèmes mobiles et ubiquitaires : proposition de méthodologie et retours d'expérience ». *Journal d'Interaction Personne Système (JIPS)*, *1*(1), 1-34.

Jambon, F., Meillon, B., Perrot, C., & Caelen, J. (2010b). « Plateforme d'utilisabilité/usage MultiCom : objectifs, réalisation, usages et retours d'expérience ». *Conférence francophone sur l'Ergonomie et l'Informatique Avancée (Ergo'IA 2010)* (pp. 109-116). Biarritz, France.

Jaynes, E. T., & Bretthorst, G. L. (2003). *Probability theory: the logic of science*. Cambridge University Press. ISBN:9780521592710

Jeuland, F. X. (2005). *La maison communicante* (p. 306). Eyrolles. ISBN:9782212114294

KNX Association. (2000a). « Chapter 7 - Application Descriptions ». *The KNX Standard v1.1*.

KNX Association. (2000b). « Chapter 7 - System Clock ». *The KNX Standard v1.1*.

KNX Association. (2002). « Supplement 12 : Channel Codes Lighting – Shutter ». *The KNX Standard v1.1* (Vol. Supplement).

KNX Association. (2003). « The KNX Standard 1.1 ».

KNX Association. (2010). « Chapter 3 - Datapoint Types ». *The KNX Standard v2.0*.

Kastner, W., & Tumfart, W. (2002). « Remote control of EIB systems based on virtual shared group objects ». *Proc. 4th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS '02)* (pp. 63-70). Vfisterés, Sweden. doi:10.1109/WFCS.2002.1159701

Kawsar, F., Al Masum Shaikh, M., Nakajima, T., & Ahmed, S. I. (2008). « Applying commonsense to augment user interaction in an intelligent environment ». *Intelligent Environments, 2008 IET 4th International Conference on* (pp. 1-6).

Kidd, C., Orr, R., Abowd, G., Atkeson, C., Essa, I., MacIntyre, B., Mynatt, E., *et al.* (1999). « The Aware Home: A Living Laboratory for Ubiquitous Computing Research ». In N. Streitz, J. Siegel, V. Hartkopf, & S. Konomi (Eds.), *Cooperative Buildings. Integrating Information, Organizations, and Architecture* (Vol. 1670, pp. 191-198). Springer Berlin / Heidelberg. doi:10.1007/10705432_17 ISBN:978-3-540-66596-0

Kientz, J. A., Patel, S. N., Jones, B., Price, E., Mynatt, E. D., & Abowd, G. D. (2008). « The Georgia Tech aware home ». *CHI '08 extended abstracts on Human factors in computing systems* (pp. 3675-3680). New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/1358628.1358911 ISBN:978-1-60558-012-8

Kintzig, C. (2002). *Objets communicants* (p. 398). Hermès science publications. ISBN:9782746204751

Krakowia, S. (2007). « Introduction à l'intergiciel ». In ICAR (Ed.), *Intergiciel et Construction d'Applications Réparties* (pp. 1-20). ICAR.

Krakowia, S., Coupaye, T., Quéma, V., Seinturier, L., Stefani, J.-B., Dumas, M., Fauvet, M.-C., *et al.* (2007). *Intergiciel et Construction d'Applications Réparties*. (ICAR, Ed.)*Intergiciel et Construction d'Applications R{é}parties* (p. 397). ICAR.

Kubicki, S., Lepreux, S., & Kolski, C. (2011). « RFID-driven situation awareness on TangiSense, a table interacting with tangible objects ». *Personal and Ubiquitous Computing*, 1-16. Springer London. doi:10.1007/s00779-011-0442-9

Ladouceur, P. (2008). « Lumière et santé au travail : Expériences et observations du Médecin du travail ». *Journées Nationales de la Lumière* (pp. 1-2).

Leaman, A., & Bordass, B. (1999). « Productivity in buildings: the "killer" variables ». *Building Research & Information*, *27*(1), 4-19. doi:10.1080/096132199369615

Lebeltel, O. (1999). « Programmation Bayésienne des Robots ». Thèse Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG.

Lebeltel, O., Bessière, P., Diard, J., & Mazer, E. (2004). « Bayesian Robots Programming ». *Autonomous Robots*, *16*(1), 49-79.

Lefebvre, H. (1997). « La domotique : le rôle des réseaux dans un processus d'innovation interactive ». Thèse Université des Sciences économiques de Grenoble.

Levin, H. (2003). « Designing for people: What do building occupants really want? ». *Healthy Buildings*. Singapore.

Ma, W. J., & Pouget, A. (2008). « Linking neurons to behavior in multisensory perception: A computational review ». *Brain Research*, *1242*(0), 4-12. doi:10.1016/j.brainres.2008.04.082 Note : Multisensory Integration

Magnien, M. (1980). « Du rêve à la rigueur: la maison électrique de Georgia Knapp (1913) ». *Machines au foyer*, (3), 191-197.

Mandallena, C. (2006). « Elaboration et application d'une méthode d'évaluation et d'amélioration de la qualité environnementale de bâtiments tertiaires en exploitation ». Thèse Université Bordeaux 1 - Ecole doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur.

Martin-Houssart, G., & Rizk, C. (2002). « Mesurer la qualité de vie dans les grandes agglomérations ». *INSEE Première*, *868*.

Massoud Amin, S., & Wollenberg, B. F. (2005). « Toward a smart grid: power delivery for the 21st century ». *Power and Energy Magazine, IEEE*, *3*(5), 34-41. doi:10.1109/MPAE.2005.1507024

Matinal, C. (2000). « Le Projet SIRLAN IST 12295 : Impact industriel des nouvelles technologies de l'information ». *REE. Revue de l'électricité et de l'électronique*, (11), 73-78. Société de l'Electricité, de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication (SEE).

McCartney, K. J., & Nicol, J. F. (2002). « Developing an adaptive control algorithm for Europe ». *Energy and Buildings*, *34*(6), 623-635. doi:10.1016/S0378-7788(02)00013-0 Note : Special Issue on Thermal Comfort Standards

Meliones, A., Kameas, A., Economou, D., & Goumopoulos, C. (2008). « Using the Connected Home Platform to Support User Tasks as Orchestrations of Smart Object Services ». *In Proceedings of the 10th ACM International Conference on Ubiquitous Computing (UBICOMP 2008), Design and Integration Principles for Smart Objects (DIPSO 2008)*.

Meyer, G. (2004). *Smart home hacks* (p. 376). O'Reilly. ISBN:9780596007225

Milion, N., Dard, P., Jandon, M., Leberre, O., & Deliot-Lefèvre, P. (2005). *Maison intelligente : que fait-elle pour nous ?*

Millier, P. (1999). *Marketing the unknown: developing market strategies for technical innovations*. J. Wiley. ISBN:9780471986218

Miori, V., Tarrini, L., Manca, M., & Tolomei, G. (2006). « An open standard solution for domotic interoperability ». *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, *52*(1), 97-103. doi:10.1109/TCE.2006.1605032

Morel, N., & Gnansounou, E. (2008). « Energétique du bâtiment ». Thèse Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Moser, G. (2009). *Psychologie environnementale: Les relations homme-environnement*. De Boeck Université. ISBN:9782804117535

Moujalled, B. (2007). « Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés ». Thèse Institut des Sciences Appliquées de Lyon.

Mozer, M. C. (1998). « The Neural Network House: An Environment hat Adapts to its Inhabitants ». In M. Coen (Ed.), *Proc AAAI Spring Symp Intelligent Environments* (pp. 110-114). AAAI Press.

Mozer, M. C. (1999). « An Intelligent Environment Must Be Adaptive ». *Intelligent Systems and their Applications, IEEE*, *14*(2), 11-13. doi:10.1109/MIS.1999.757623

Mozer, M. C. (2005). « Lessons from an Adaptive Home ». *Smart Environments*, 271-294. John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/047168659X.ch12

Nain, G. (2011). « EnTiMid : Un modèle de composants pour intégrer des objets communicants dans des applications à base de services ». Thèse Université Rennes 1.

Nain, G., Barais, O., Fleurquin, R., & Jézéquel, J.-M. (2009). « EntiMid: un middleware aux services de la maison ». *3ème Conférence Francophone sur les Architectures Logicielles (CAL'O9)*. Nancy, France.

Nakazawa, J., Tokuda, H., Edwards, W. K., & Ramachandran, U. (2006). « A Bridging Framework for Universal Interoperability in Pervasive Systems ». *Distributed Computing Systems, International Conference on*, *0*, 3. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society. doi:10.1109/ICDCS.2006.5

Nicol, F., & Humphreys, M. (1995). *Standards for thermal comfort: indoor air temperature standards for the 21st century*. Chapman & Hall. ISBN:9780419204206

Nicol, F., & Humphreys, M. (2010). « Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251 ». *Building and Environment*, *45*(1), 11-17. doi:10.1016/j.buildenv.2008.12.013 Note : International Symposium on the Interaction between Human and Building Environment Special Issue Section

Norman, D. A. (1993). *Things that make us smart: defending human attributes in the age of the machine*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. ISBN:0-201-62695-0

Norman, D. A. (1999). « Affordance, conventions, and design ». *interactions*, *6*(3), 38-43. New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/301153.301168

Nourizadeh, S., Song, Y.-Q., Thomesse, J.-P., & Sepulchre, X. (2009). « Un système de télémédecine pour les seniors ». *1er congrès de la Société Française des Technologies pour l'Autonomie et de Gérontechnologie - SFTAG09*. Troyes, France.

Nunnally, J. C. (1959). *Introduction to psychological measurement*. McGraw-Hill.

OMS. (2007). *La réglementation Habitat & Santé en Europe*.

Paviot, T. (2010). « Méthodologie de résolution des problèmes d'interopérabilité dans le domaine du Product Lifecycle Management ». Thèse Ecole Centrale Paris.

Pellegrino, P., Bonino, D., & Corno, F. (2006). « Domotic house gateway ». *Proceedings of the 2006 ACM symposium on Applied computing* (pp. 1915-1920). New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/1141277.1141730 ISBN:1-59593-108-2

RF. (2000). « Arrêté du 29 Novembre 2000 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments ». *Journal Officiel de la République Française*, *277*.

RF. (2005). *Réglementation Thermique*. Note : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

RF. (2012). *Réglementation Thermique*. Note : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

Reignier, P. (2010). « Intelligence Ambiante Pro-Active : de la Spécification à l'Implémentation ». Thèse Université Joseph-Fourier - Grenoble I.

Renaudin, O. (2010). « Domotique : la maison intelligente est-elle un pur fantasme ? ». *Maison Magazine*.

Repiquet, J., & Jeuland, F. X. (2007). *Architectures à vivre: maison A, studio B* (p. 141). Eyrolles. ISBN:9782212121988

Rieunier, S. (2009). *Le marketing sensoriel du point de vente: créer et gérer l'ambiance des lieux commerciaux* (3ème éditi., p. 294). Dunod. ISBN:9782100499113

Robert-Houdin, J. E. (1867). *Le Prieuré: organisations mystérieuses pour le confort et l'agrément d'une demeure* (p. 32). Michel Lévy frères.

Rohles, F. H. J., Woods, J. E. J., & Morey, P. R. (1989). « Indoor environment acceptability: the development of a rating scale ». *ASHRAE transactions*, *95*, 23-27. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.

Roulet, C. A. (2010). *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. Presses polytechniques et universitaires romandes. ISBN:978-2-88074-793-0

Russell, S. J., & Norvig, P. (2010). *Artificial intelligence: a modern approach*. Prentice Hall. ISBN:9780136042594

Sabbah, C. (2010). « Dans ma maison branchée ». *Ambiances chez soi: L'air, le son, la lumière* (pp. 60-63). Editions Autrement.

Saizmaa, T., & Kim, H.-C. (2008). « Smart Home Design: Home or House? ». *Proceedings of the 2008 Third International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology - Volume 01* (pp. 143-148). Washington, DC, USA: IEEE Computer Society. doi:10.1109/ICCIT.2008.286 ISBN:978-0-7695-3407-7

Sakamura, K. (1990). « The TRON Intelligent House ». *IEEE Micro*, *10*, 6-7. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society. doi:10.1109/MM.1990.10017

Sanselme, B. (2008). « Principes d'ergonomie visuelle applicables à l'éclairage des lieux de travail ». *Journées Nationales de la Lumière* (pp. 1-12).

Sarrat, P. (1989). « Le projet Français habitat intelligent / domotique ». *HANDITEC* (pp. 1-9).

Schilit, B., Adams, N., & Want, R. (1994). « Context-Aware Computing Applications ». *Proceedings of the 1994 First Workshop on Mobile Computing Systems and Applications* (pp. 85-90). Washington, DC, USA: IEEE Computer Society. doi:10.1109/WMCSA.1994.16 ISBN:978-0-7695-3451-0

Segarra, M. T., Thépaut, A., Keryell, R., Plazaola, A., Pecatte, B., & Poichet, J. (2003). « Ametsa: a generic home control system based on UPnP ». *ICOST 2003 : 1st International Conference On Smart homes and health Telematics, September 24-26, Paris, France*.

Shelby, Z., & Bormann, C. (2011). *6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet*. John Wiley & Sons. ISBN:9781119965343

Slater, K. (1986). « Discussion paper the assessment of comfort ». *Journal of the Textile Institute*, *77*(3), 157-171. doi:10.1080/00405008608658406

Stein, B. E., & Stanford, T. R. (2008). « Multisensory integration: current issues from the perspective of the single neuron ». *Nat Rev Neurosci*, *9*(4), 255-266. Nature Publishing Group. doi:10.1038/nrn2331

Sèze, C. (1994). *Confort moderne: une nouvelle culture du bien-être*. Éditions Autrement. ISBN:9782862604473

Talotte, C., Paradot, N., Da Costa, P., & Mzali, M. (2006). « Improvement of Climatic Comfort in Stations: Development of Numerical Simulations and Perception Analysis ». *Congrès mondial de la recherche ferroviaire (WCRR)*. Montreal, Canada.

Tapia, E., Intille, S., Lopez, L., & Larson, K. (2006). « The Design of a Portable Kit of Wireless Sensors for Naturalistic Data Collection ». In K. Fishkin, B. Schiele, P. Nixon, & A. Quigley (Eds.), *Pervasive Computing* (Vol. 3968, pp. 117-134). Springer Berlin / Heidelberg. doi:10.1007/11748625_8 ISBN:978-3-540-33894-9

Thomesse, J.-P., Bellot, D., Boyer, A., Campo, E., Chan, M., Charpillet, F., Fayn, J., *et al.* (2001). « Integrated Information Technologies For Patients Remote Follow-Up And Homecare ». *HealthCom 2001* (p. 12). L'Aquila/Italy.

Trifa, V. (2011). « Building blocks for a participatory Web of things ». Thèse ETH Zürich. doi:10.3929/ethz-a-006716400

USITT. (1990). *DMX512*. Note : The DMX Standard, Engineering Commission - United States Institute for Theatre Technology

Vacher, M., Istrate, D., Portet, F., Joubert, T., Chevalier, T., Smidtas, S., Meillon, B., *et al.* (2011). « The SWEET-HOME Project: Audio Technology in Smart Homes to improve Well-being and Reliance ». *33th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'11)*. Boston, USA.

Vernadat, F. (1996). *Enterprise modeling and integration: principles and applications* (p. 513). Chapman & Hall. ISBN:9780412605505

Wacks, K. (2002). « Home systems standards: achievements and challenges ». *Communications Magazine, IEEE*, *40*(4), 152-159. doi:10.1109/35.995865

Waldner, J. B. (2007). *Nano-informatique et intelligence ambiante: inventer l'ordinateur du XXIe siècle* (p. 302). Hermès Science. ISBN:9782746215160

Webb, R. A. (2006). « Considerations for lighting in the built environment: Non-visual effects of light ». *Energy and Buildings*, *38*(7), 721-727. doi:10.1016/j.enbuild.2006.03.004 Note : Special Issue on Daylighting Buildings

Wegner, P. (1996). « Interoperability ». *ACM Comput. Surv.*, *28*(1), 285-287. New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/234313.234424

Weiser, M. (1991). « The Computer for the 21st Century ». *Scientific American*, *265*(3), 66-75. Note : Classic statement of the ubiquitous-computing vision.

Wienold, J., & Christoffersen, J. (2006). « Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras ». *Energy and Buildings*, *38*(7), 743-757. doi:10.1016/j.enbuild.2006.03.017 Note : Special Issue on Daylighting Buildings

Woloszyn, P., & Siret, D. (1998). « Du complexe au simplexe, Le modèle des objets ambiants ». *Ambiances architecturales et urbaines* (pp. 49-61). Editions Parenthèses. ISBN:9782863648421

Woods, J. E. J. (1979). « Ventilation, health & energy consumption: a status report ». *ASHRAE Journal*, 23-27.

Yaglou, C., & Minard, D. (1956). *Prevention of Heat Casualties at Marine Corps Training Centers*.

Zimmermann, H. (1980). « OSI Reference Model--The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection ». *Communications, IEEE Transactions on*, *28*(4), 425-432. doi:10.1109/TCOM.1980.1094702

Annexes

9 Modèles d'objets

Nous présentons dans ce chapitre les modèles d'objets les plus courants que nous avons utilisés dans le cadre de nos travaux, dont la structure a été présentée au chapitre 4 et l'application illustrée au chapitre 5. Nous avons séparés ces modèles d'application en fonction de leurs domaines. Pour chacune de ces applications, nous présentons brièvement le modèle « objet à objet » (au format KNX, présenté en section 4.3.2), ainsi que les ressources faisant partie de la communication « Objet à Service ».

9.1 Éclairage

Nous avons distingués quatre types d'applications pouvant être associées au domaine de l'éclairage : les applications de commutations, de variation, de mesure de la luminosité ambiante ainsi qu'une application de contrôles des couleurs d'éclairage.

9.1.1 Simple

Resource name	**status**				
Resource type	Integer	**min**	0	**max**	1
			"off"		"on"
Resource name	**switch**				
Resource type	Integer	**min**	0	**max**	1
			"off"		"on"

Tableau 8-1. Détail des ressources pour l'application

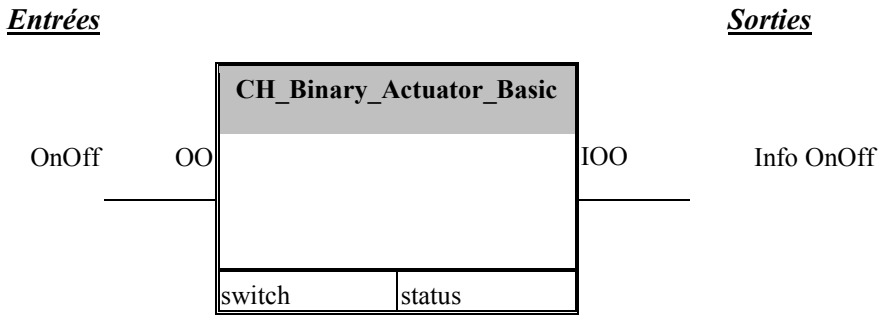


Figure 8-1. Application pour un produit de puissance

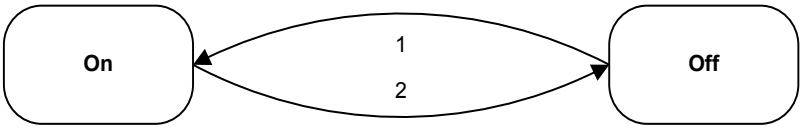


Figure 8-2. Diagramme de transition pour un produit de puissance

9.1.2 Varié

Resource name	status				
Resource type	Integer	min	0	max	100
			“off”		“on”
Resource name	switch				
Resource type	Integer	min	0	max	101
			“off”		“switch on to last known dimming value”

Tableau 8-2. Ressources pour l'application d'éclairage varié

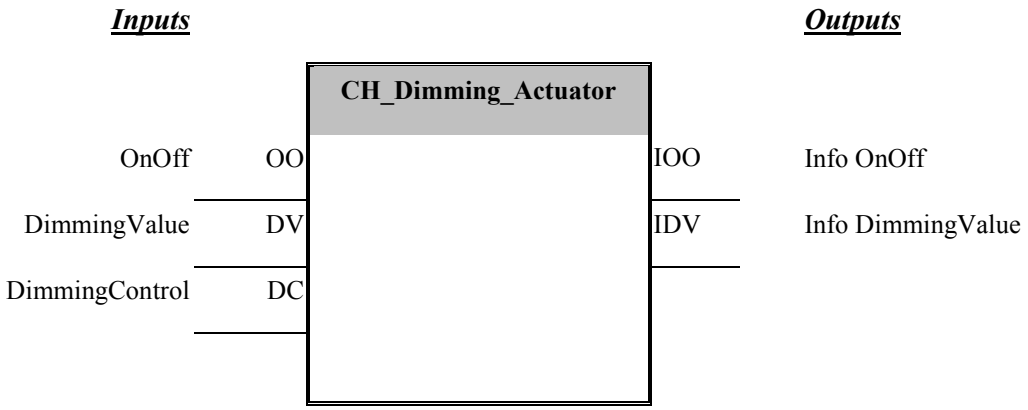


Figure 8-3. Application pour une lampe variée

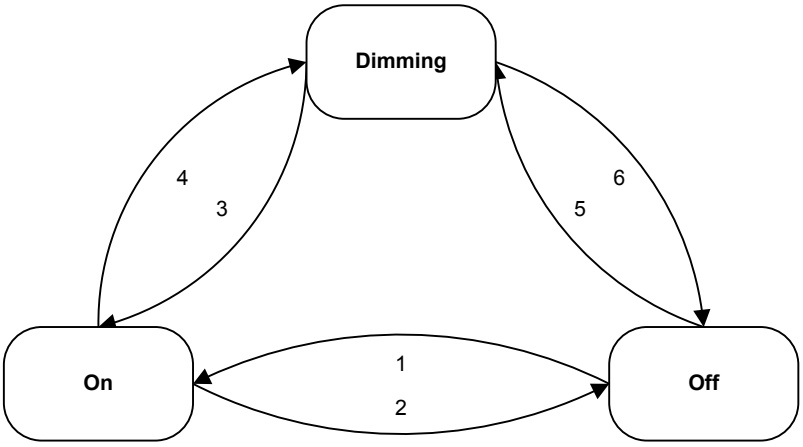


Figure 8-4. Diagramme de transition à états pour une lampe variée

9.1.3 Sonde luminosité

Resource name	value				
Resource type	Integer	min	0	max	32767

Tableau 8-3. Ressources pour l'application associée à une sonde de luminosité

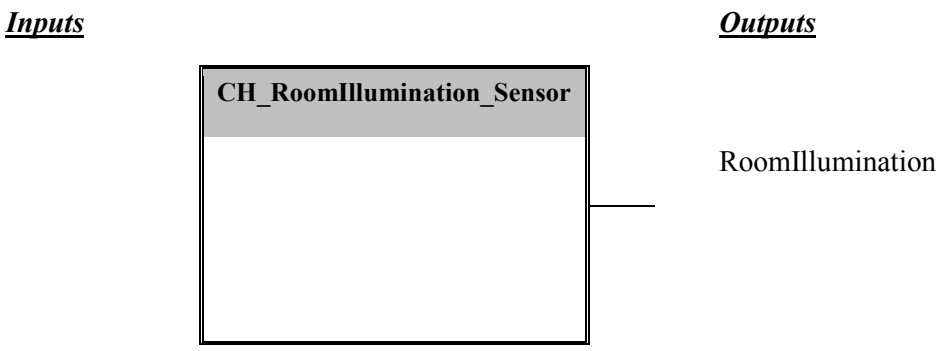


Figure 8-5. Application pour une sonde de luminosité

9.1.4 Eclairage dynamique

Resource name	**value**				
Resource type	Integer	min	0	max	1
			“off”		“on”
Resource name	**valueR**	(level of red in the current color)			
Resource type	Integer	min	0	max	255
Resource name	**valueG**	(level of green in the current color)			
Resource type	Integer	min	0	max	255
Resource name	**valueB**	(level of blue in the current color)			
Resource type	Integer	min	0	max	255

Tableau 8-4. Ressources pour l’éclairage dynamique

9.2 Ouvrants

9.2.1 Volets roulants et rideaux

Resource name	**status**				
Resource type	Integer		-1		1
			“down”		“up”

Tableau 8-5. Ressources pour l’application associée à un ouvrant simple

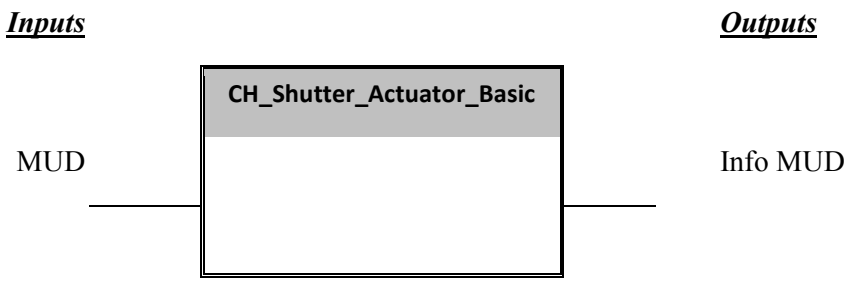


Figure 8-6. Modèle d'application pour un ouvrant simple

9.2.2 Stores vénitiens

Resource name	status					
Resource type	Integer		-1	1	-2	2
			"down"	"up"	"lamellas closed"	"lamellas opened"

Tableau 8-6. Ressources pour un ouvrant complexe

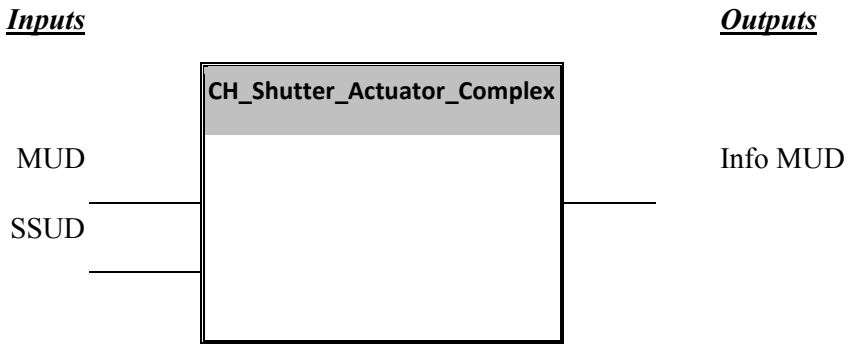


Figure 8-7. Modèle d'application pour un ouvrant complexe

9.3 Chauffage, Ventilation et climatisation

9.3.1 Ventilation

Le modèle d'application est identique à celui décrit en 1.1.1.

Resource name	status				
Resource type	Integer	min	0	max	1
			"low speed"		"high speed"

Tableau 8-7. Ressources pour l'application associée à une ventilation

9.3.2 Température

Resource name	temperature				
Resource type	Float	min	-273	max	670760

Tableau 8-8. Ressources pour une sonde de température

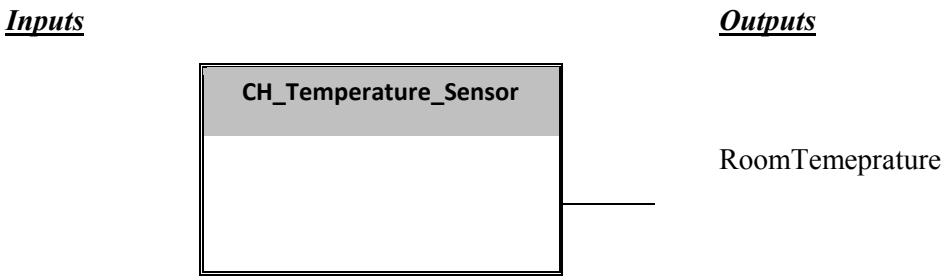


Figure 8-8. Modèle d'application pour une sonde de température

9.3.3 Humidité relative

Resource name	value	(percentage of relative humidity)			
Resource type	Integer	min	0	max	100

Tableau 8-9. Ressources pour l'application associée à une sonde d'humidité

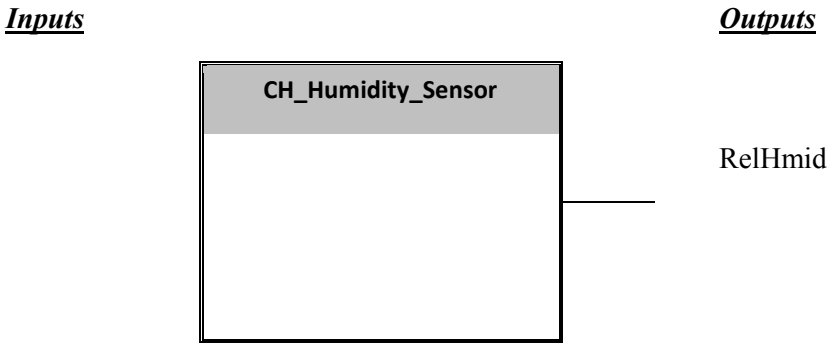


Figure 8-9. Modèle d'application pour une sonde d'humidité relative

9.3.4 Concentration en CO_2

Resource name	value				
Resource type	Integer	min	0	max	4294967295

Tableau 8-10. Ressources pour l'application associée à une sonde de CO_2

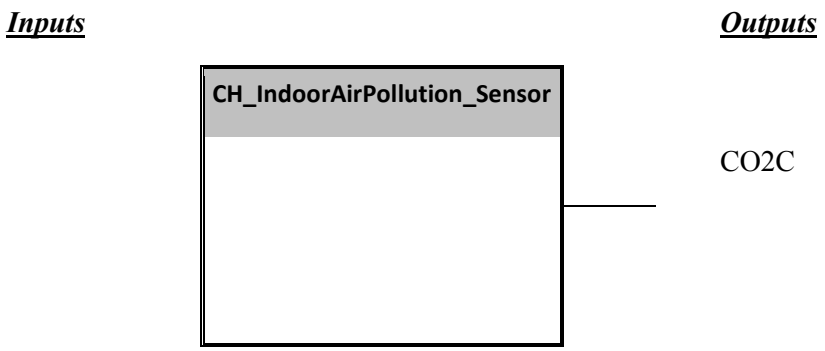


Figure 8-10. Modèle d'application pour une sonde de CO_2.

9.4 Mesures

Resource name	value				
Resource type	Double	min	0	max	4294967295

Tableau 8-11. Ressources pour l'application de collecte de valeurs numériques

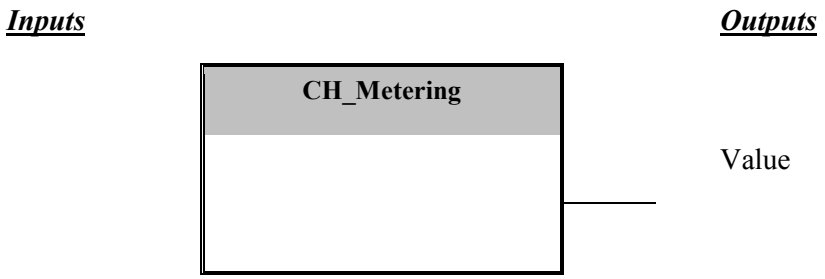


Figure 8-11. Modèle d'application pour des valeurs numériques

9.5 Détection d'ouverture

Resource name	status				
Resource type	Integer	min	0	max	1
			"Closed"		"Open"

Tableau 8-12. Ressources pour l'application associée à une sonde d'ouverture

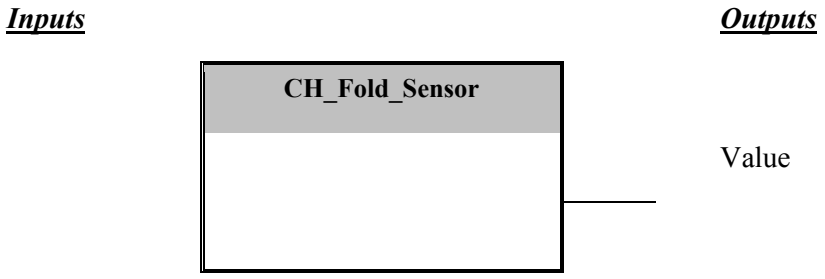


Figure 8-12. Modèle d'application pour la détection d'ouverture

9.6 Détection de Présence

Resource name	status	

Resource type	Integer	min	0	max	1
			“Unoccupied”		“Occupied”

Tableau 8-13. Ressources pour l'application associée à un détecteur de présence

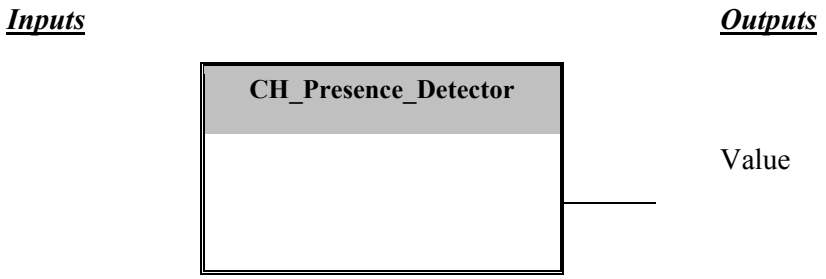


Figure 8-13. Modèle d’application pour la détection de présence

9.7 Chaîne de caractères

Resource name	value	
Resource type	String	
Resource direction	In and Out	

Tableau 8-14. Ressources pour l'application de collecte et d’envois de chaînes de caractères

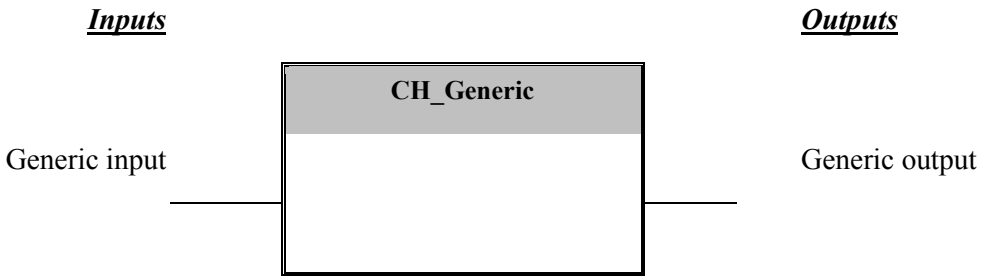


Figure 8-14. Modèle d’application pour la transmission de chaînes de caractères

9.8 Annotation

Resource name	value	
Resource type	String	
Resource direction	In and Out	Input value is echoed to the output

Tableau 8-15. Ressources pour l'application d’annotation

10 Equipement de la plate-forme Domus

10.1 Eclairage conventionnel

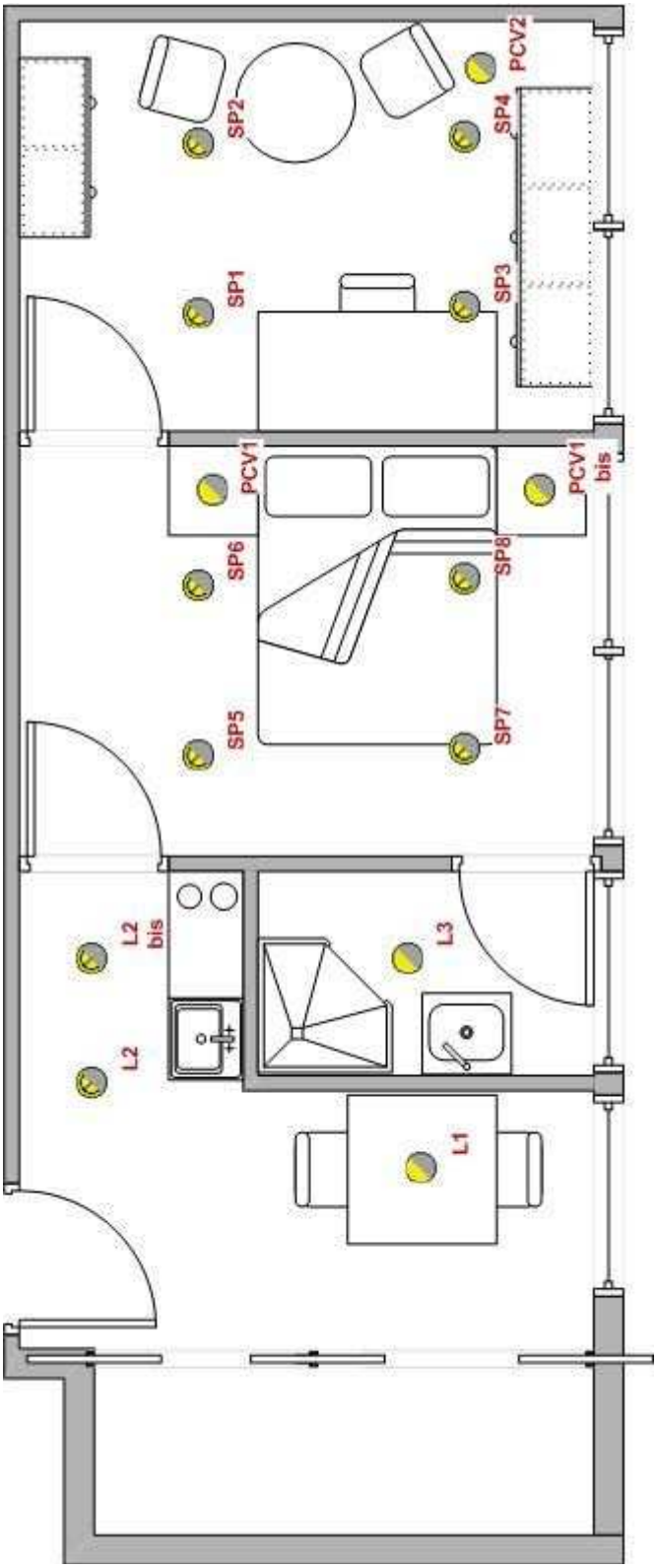


Figure 10-1. Schéma d'implantation des divers points d'éclairage conventionnel

Nom	Type	Puissance	Identifiant unique
L1	Plafonnier (9.1.2)	100 W	FFFE2B37EAB9
L2 – L2 bis	Spot (9.1.2)	2* 50 W	FFFECBB299A8
L3	Appliques (9.1.2)	25 W	FFFEB88797BC
SP5 – SP6	Spots (9.1.2)	2 * 50 W	FFFEA4ACFDCC
SP7 – SP8	Spots (9.1.2)	2 * 50 W	FFFEF9EF7D48
PCV1 – PCV1 bis	Lampes de chevet (9.1.2)	2 * 100 W	FFFEB6A85DBB
SP1 – SP2	Spots (9.1.2)	2 * 50 W	FFFEDC6CAA6A
SP3 – SP4	Spots (9.1.2)	2 * 50 W	FFFE8CC9BAD0
PCV2	Lampe de table (9.1.2)	100 W	FFFEFB6453C9

Tableau 10-1. Liste des objets d'éclairage conventionnel associés à leurs identifiants et modèles d'application

10.2 Prises

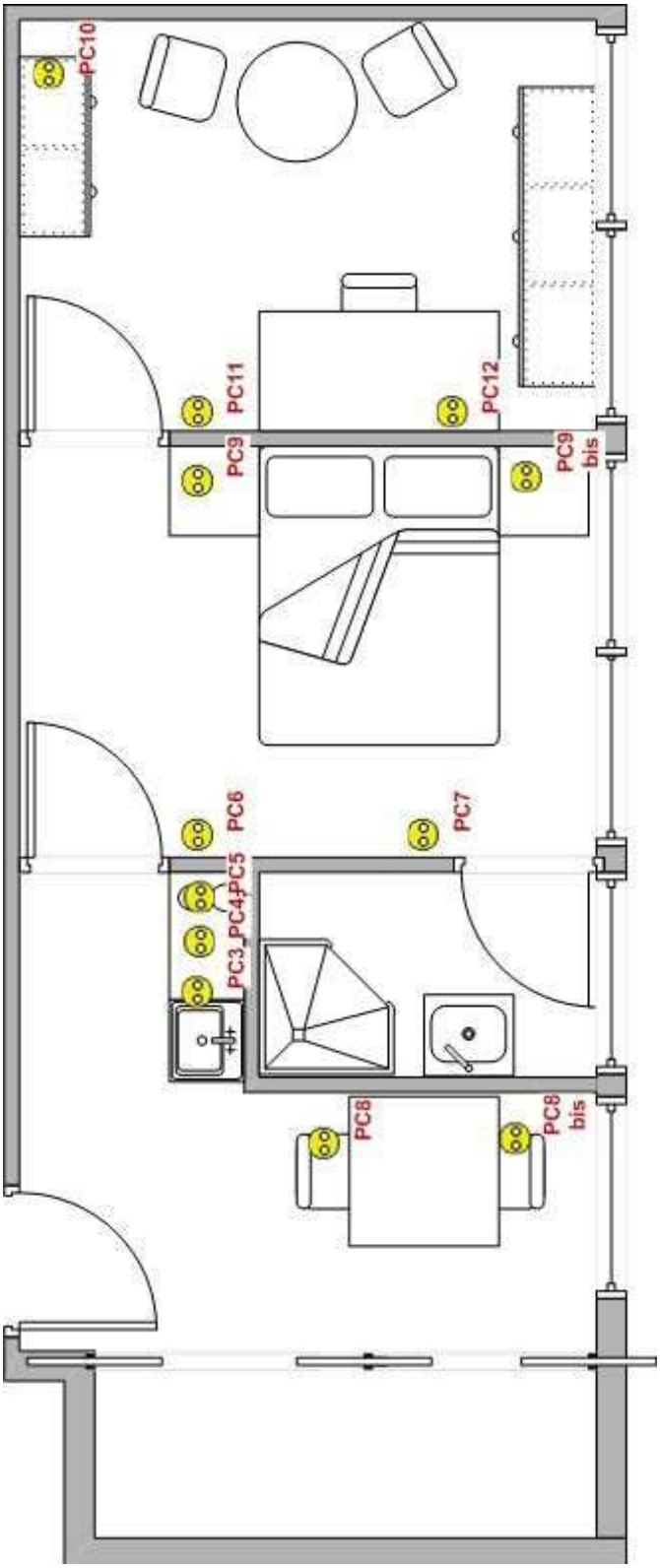


Figure 10-2. Schéma d'implantation des prises commandées

Nom	Type	(Eventuellement) raccordée à	Identifiant unique
PC3	Prise commandée (1.1.1)		FFFE67DAA0C3
PC4	Prise commandée (1.1.1)		FFFEAA3DE849
PC5	Prise commandée (1.1.1)		FFFE8EA1E6DD
PC6	Prise commandée (1.1.1)	Convecteur	FFFED3E7ECEB
PC7	Prise commandée (1.1.1)		FFFEDA97BB69
PC8 – PC8 bis	Prise commandée (1.1.1)	Cafetière et grille-pain	FFFEB853BA76
PC9	Prise commandée (1.1.1)		FFFEAB498E8A
PC10	Prise commandée (1.1.1)	Lampe de bureau	FFFEAA6A458E
PC11	Prise commandée (1.1.1)	Lampe de bureau	FFFEBB9B539B
PC12	Prise commandée (1.1.1)	Lampe de bureau	FFFE98D7DAA8

Tableau 10-2. Liste des objets de puissance associés à leurs identifiants et modèles d'application

10.3 Ouvrants

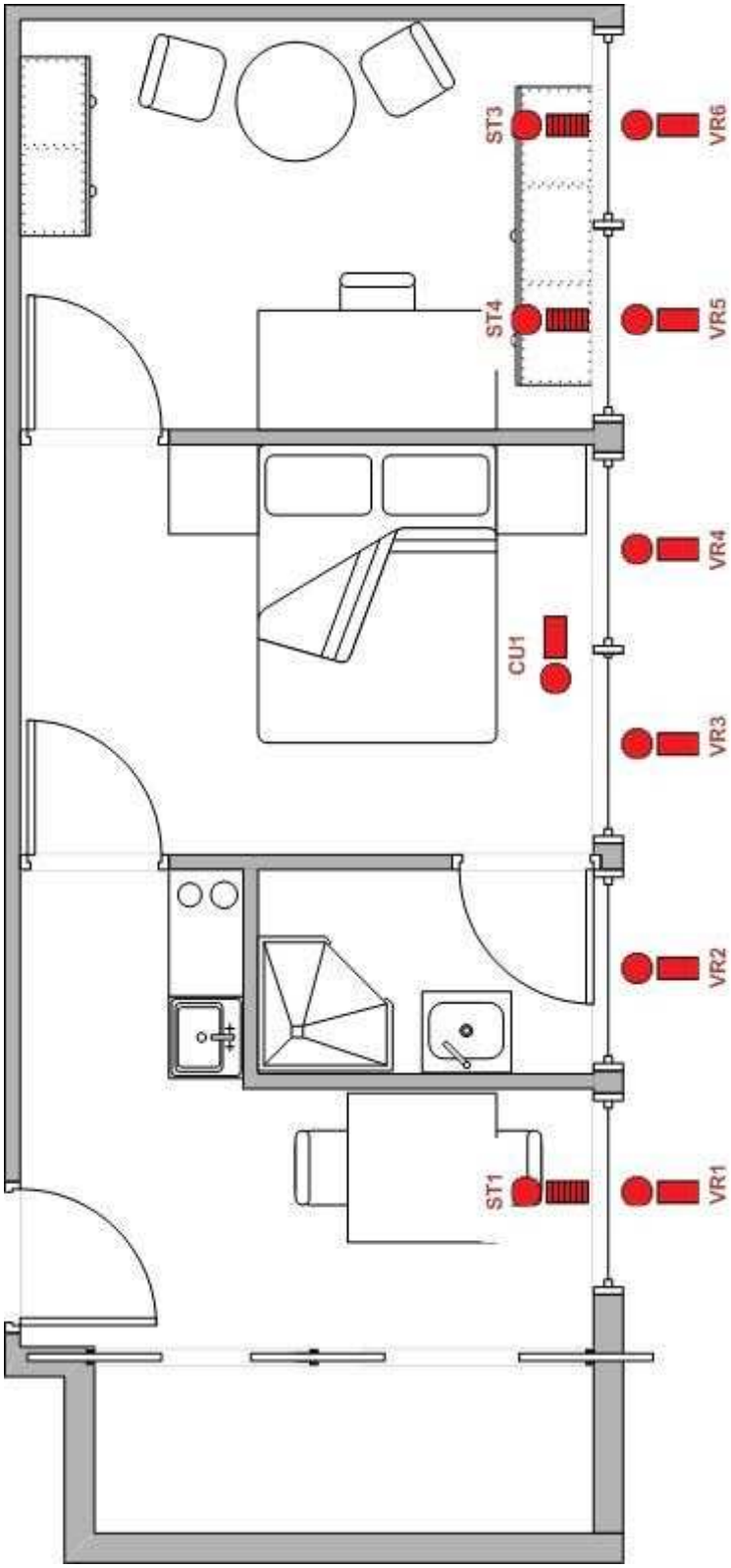


Figure 10-3. Schéma d'implantation des ouvrants

Nom	Type	Identifiant unique
VR1	Volet roulant (9.2.1)	FFFE63C3A7B2
VR2	Volet roulant (9.2.1)	FFFE61DC66BA
VR3	Volet roulant (9.2.1)	FFFEC7396CB7
VR4	Volet roulant (9.2.1)	FFFEC659B23D
VR5	Volet roulant (9.2.1)	FFFEABB51ACA
VR6	Volet roulant (9.2.1)	FFFED50B88C7
ST1	Stores à lamelles (9.2.2)	FFFEA8BCF469
ST2	Stores à lamelles (9.2.2)	FFFEAEDCCB67
ST3	Stores à lamelles (9.2.2)	FFFE8BB9CA7C
CU1	Rideaux (9.2.1)	FFFE3B6E8D53

Tableau 10-3. Liste des objets ouvrants associés à leurs identifiants et modèles d'application

10.4 Détecteurs d'ouverture

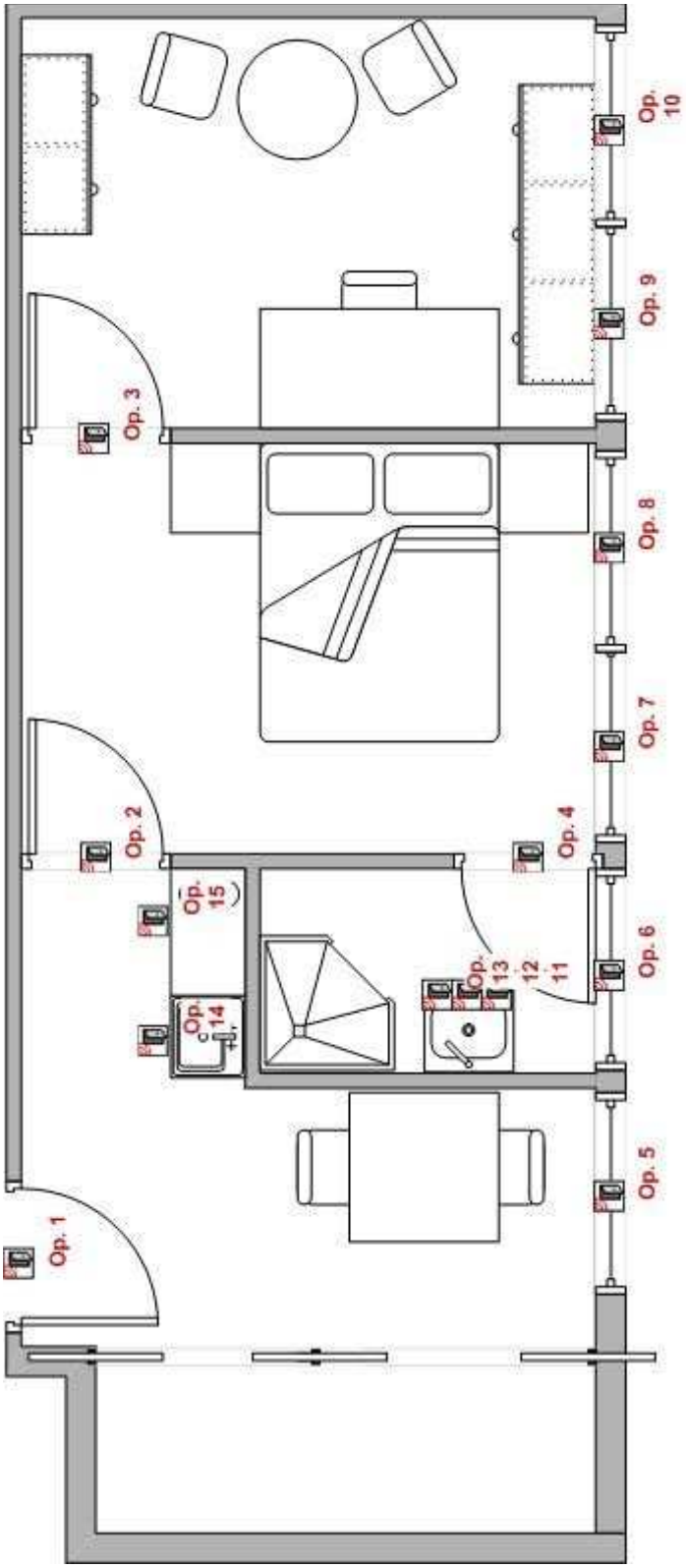


Figure 10-4. Schéma d'implantation des détecteurs d'ouverture

Nom	Type	Détecte	Identifiant unique
Op. 1	Détecteur d'ouverture (9.5)	Porte d'entrée	FFFE793BF9A3
Op. 2	Détecteur d'ouverture (9.5)	Porte Cuisine / Chambre	FFFE8D5B3199
Op. 3	Détecteur d'ouverture (9.5)	Porte Chambre / Bureau	FFFECAAA7D8F
Op. 4	Détecteur d'ouverture (9.5)	Porte Chambre / Salle de bain	FFFE79B6B39C
Op. 5	Détecteur d'ouverture (9.5)	Fenêtre de la cuisine	FFFE1EC74CB8
Op. 6	Détecteur d'ouverture (9.5)	Fenêtre de la salle de bain	FFFE9C5EBCD8
Op. 7	Détecteur d'ouverture (9.5)	Fenêtre 1 de la chambre	FFFECABA26B6
Op. 8	Détecteur d'ouverture (9.5)	Fenêtre 2 de la chambre	FFFEB595A7B1
Op. 9	Détecteur d'ouverture (9.5)	Fenêtre 1 du bureau	FFFE8658CAAA
Op. 10	Détecteur d'ouverture (9.5)	Fenêtre 2 du bureau	FFFE7AAB3AA5
Op. 11	Détecteur d'ouverture (9.5)	Porte gauche du placard de la salle de bains	FFFE17BAB4BA
Op. 12	Détecteur d'ouverture (9.5)	Porte au milieu du placard de la salle de bains	FFFEAA5ACE9D
Op. 13	Détecteur d'ouverture (9.5)	Porte droite du placard de la salle de bains	FFFEB8A8DA6A
Op. 14	Détecteur d'ouverture (9.5)	Porte du placard de la cuisine (sous l'évier)	FFFE9B5B62C8
Op. 15	Détecteur d'ouverture (9.5)	Porte du frigidaire	FFFE919B82B3

Tableau 10-4. Liste des détecteurs d'ouverture associés à leurs identifiants et modèles d'application

10.5 Eclairage dynamique

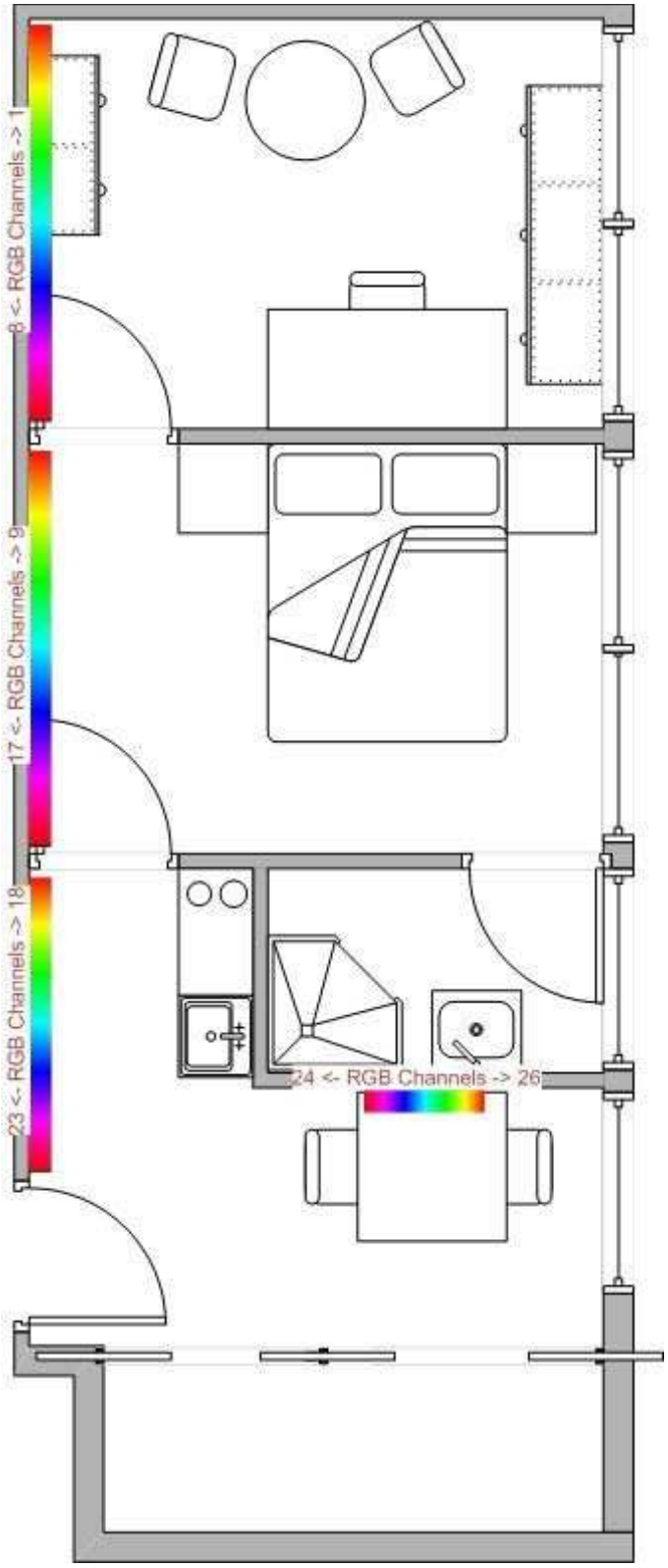


Figure 10-5. Schéma d'implantation de l'éclairage dynamique

Nom	Type	Emplacement	Identifiant unique
RGB 1	RGB Channel (9.1.4)	Bureau	FFFE9BCA9F35
RGB 2	RGB Channel (9.1.4)	Bureau	FFFEC74B3569
RGB 3	RGB Channel (9.1.4)	Bureau	FFFEACD9A33A
RGB 4	RGB Channel (9.1.4)	Bureau	FFFE89BC9AC6
RGB 5	RGB Channel (9.1.4)	Bureau	FFFEAB7B7789
RGB 6	RGB Channel (9.1.4)	Bureau	FFFE6B19CAC9
RGB 7	RGB Channel (9.1.4)	Bureau	FFFEAEBA8E63
RGB 8	RGB Channel (9.1.4)	Bureau	FFFE3A67D3AE
RGB 9	RGB Channel (9.1.4)	Chambre	FFFE99ADB766
RGB 10	RGB Channel (9.1.4)	Chambre	FFFE1BDBACA9
RGB 11	RGB Channel (9.1.4)	Chambre	FFFE99B7AAA5
RGB 12	RGB Channel (9.1.4)	Chambre	FFFE3E9AA48C
RGB 13	RGB Channel (9.1.4)	Chambre	FFFE71ABCAA8
RGB 14	RGB Channel (9.1.4)	Chambre	FFFEB6A3F733
RGB 15	RGB Channel (9.1.4)	Chambre	FFFE81A935AE
RGB 16	RGB Channel (9.1.4)	Chambre	FFFE36AAEB3B
RGB 17	RGB Channel (9.1.4)	Chambre	FFFE8ABBAF66
RGB 18	RGB Channel (9.1.4)	Cuisine (mur)	FFFE4A5973B6
RGB 19	RGB Channel (9.1.4)	Cuisine (mur)	FFFE630D5969
RGB 20	RGB Channel (9.1.4)	Cuisine (mur)	FFFECA72567D
RGB 21	RGB Channel (9.1.4)	Cuisine (mur)	FFFE88CD5944
RGB 22	RGB Channel (9.1.4)	Cuisine (mur)	FFFEBB5D967F
RGB 23	RGB Channel (9.1.4)	Cuisine (mur)	FFFEEED7339C
RGB 24	RGB Channel (9.1.4)	Cuisine (table)	FFFEADCAC66B
RGB 25	RGB Channel (9.1.4)	Cuisine (table)	FFFEDA4B7B9D
RGB 26	RGB Channel (9.1.4)	Cuisine (table)	FFFEACDCBABA

Tableau 10-5. Liste des objets d'éclairage dynamique associés à leurs identifiants et modèles d'application

10.6 Multimédia

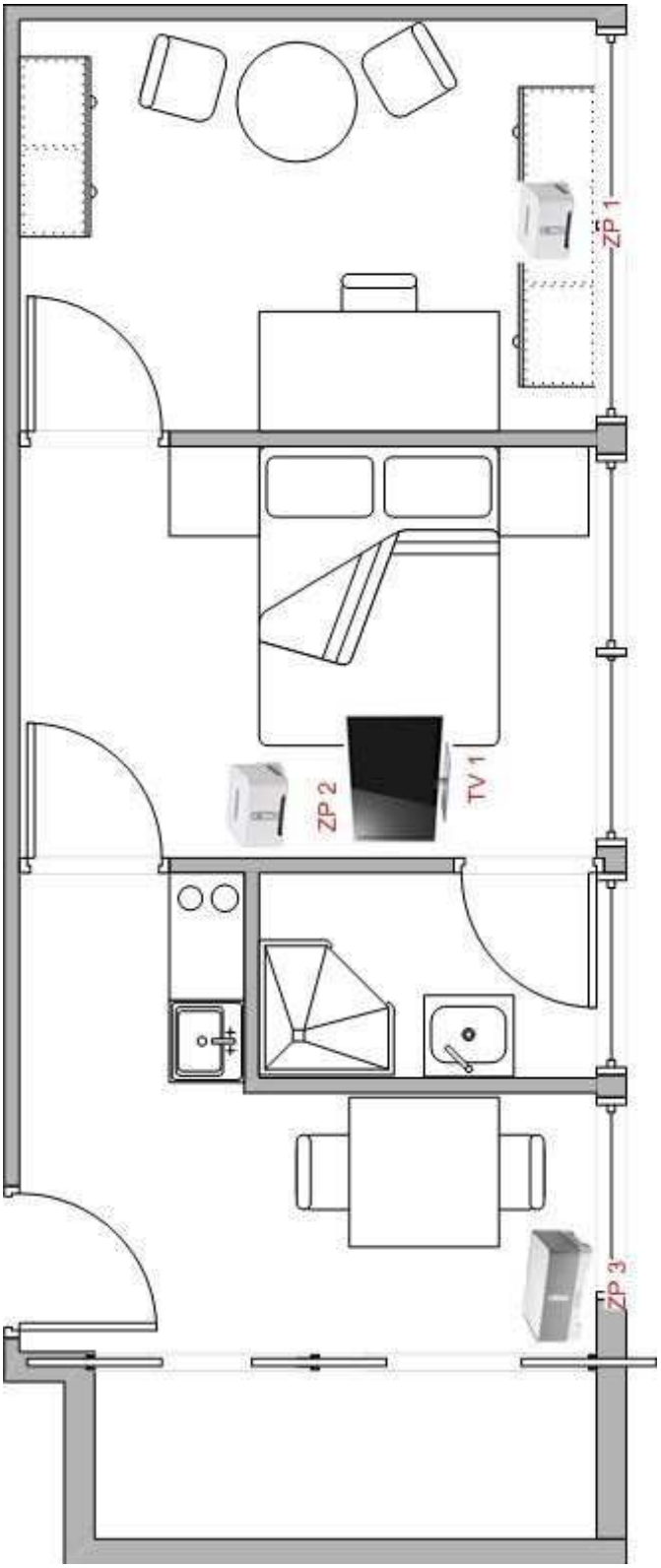


Figure 10-6. Schéma d'implantation des objets multimédia

Nom	Type	Localisation	Identifiant unique (volume)	Identifiant unique (url contenu)
ZP 1	Audio Renderer device	Bureau	FFFE1432ADAA	FFFE59188D82
ZP 2	Audio Renderer device	Chambre	FFFEC2A9ABBA	FFFE98E7BCDD
ZP 3	Audio Renderer device	Cuisine	FFFE9B398B4B	FFFE8AAA49B5
TV 1	Audio/Video Renderer device	Chambre	FFFE7A8B0DA9	

Tableau 10-6. Liste des objets multimédia associés à leurs identifiants et modèles d'application

10.6.1 Autres capteurs

10.6.1.1 Qualité de l'air

Nom	Identifiant unique	Location	Profil d'application	Unité
Température	FFFE9DA3A50A	Bureau	Température (9.3.2)	°C
Température	FFFEB8A8CCBB	Chambre	Température (9.3.2)	°C
Concentration de CO_2	FFFE97678AAD	Chambre	CO_2 (9.3.4)	ppm
Humidité relative	FFFE3CE1BCAA	Chambre	% (9.3.3)	%

Tableau 10-7. Liste des données relatives à la qualité de l'air

10.6.1.2 Consommation et données électriques

Nom	Identifiant unique	Profil d'application	Unité
Consommation cumulée depuis la mise en service	FFFED998E65A	Comptage (9.4)	kW/h
Intensité instantanée	FFFEDBAABA48	Comptage (9.4)	Amp.
Puissance instantanée sur la phase 1	FFFEDBB898DE	Comptage (9.4)	W/h
Puissance totale instantanée	FFFE755B9A41	Comptage (9.4)	W/h
Tension instantanée	FFFE7AA3A7CE	Comptage (9.4)	Volts

Tableau 10-8. Liste des données issues du compteur électrique

10.6.1.3 Consommation d'eau

Nom	Identifiant unique	Profil d'application	Unité
Consommation cumulée d'eau chaude	FFFE395A4D9C	Comptage (9.4)	L
Consommation instantanée d'eau chaude	FFFE8A746A6D	Comptage (9.4)	L/h
Consommation cumulée d'eau froide	FFFE3E7AA49B	Comptage (9.4)	L
Consommation instantanée d'eau froide	FFFEDAABBCB5	Comptage (9.4)	L/h

Tableau 10-9. Liste des données relatives à la consommation d'eau

10.6.1.4 Données extérieures

Nom	Identifiant unique	Profil d'application	Unité
Température extérieure	FFFEA94554AA	Générique (9.7)	°C
Pression atmosphérique	FFFEAA37796B	Générique (9.7)	mbar
Humidité relative	FFFE3EC6C939	Générique (9.7)	%

extérieure			
Vitesse du vent	FFFE9A4A5BAB	Générique (9.7)	m/s
Direction du vent	FFFEC7BCDDE9	Générique (9.7)	Degrés
Index UV	FFFE8B34ABAC	Générique (9.7)	1 à 10

Tableau 10-10. Liste des données issues d'une station météo

11 Protocole expérimental

11.1 Check-list de préparation

Préparation du dispositif « sujet »

- Vérification du niveau de charge de la tablette numérique
- Test du fonctionnement de l'application
    - Chargement de l'interface
    - Vérification de la connectivité avec le serveur de traces
- Mise à l'état neutre des échelles

Vérification du dispositif « traces »

- Nettoyage du dossier de destination des traces
- Vérification de l'espace disque disponible
- Vérification du fonctionnement du système
    - Actionnement de divers objets de l'appartement afin de confirmer l'enregistrement des traces
- Test de l'interface de l'expérimentateur
    - Vérification de la réception de données
    - Vérification de l'émission de données
- Mise en route de l'enregistrement des traces
- Forçage de lecture sur les différents capteurs et effecteurs pour acquisition de l'état initial

Préparation de l'appartement

- Vérifier l'aspect général
    - Présence de câbles gênants
    - Rangement vaisselle, table repas, etc.
- Préparation de S1 :
    - Mise en route de l'ordinateur
    - Ouverture de l'application « *stress-game* »
    - Vérification des paramètres de l'ordinateur
        - Pas de mise en veille
        - Volume sonore faible
- Préparation de S2 :
    - Mise en route de la télévision
    - Présélection d'un documentaire et mise en pause
- Préparation de S3 :
    - Choix d'une recette de cuisine
    - Mise en évidence des ustensiles nécessaires
    - Mise en évidence des ingrédients nécessaires

Préparation du dispositif expérimental

- Mise en route des différents dispositifs
    - Retour sonore

- Caméras
- Vérification du dispositif de communication avec le sujet
  - Charge des talkies walkies
  - Disponibilité du canal radio (autre personnes pouvant l'utiliser)
- Mise en route de l'interface de l'expérimentateur

Accueil du sujet

- Présentation de la plateforme, de l'équipe
- Présentation du contexte de l'expérience
- Présentation pièce par pièce de l'appartement
- Consignes tâche par tâche avec mise en situation
- Présentation du questionnaire
  - Signification des échelles

11.2 Retours de l'expérimentateur

11.2.1 Retour des entretiens de conclusion

Suite aux expérimentations, l'expérimentateur s'entretenait avec le sujet afin de connaître son ressenti global concernant l'ensemble de l'expérience, en particulier si il avait eu une gêne spécifique durant l'un des trois scénarios.

Dans l'ensemble, les candidats ont jugé l'environnement agréable. La source de gêne la plus fréquemment citée est le bruit de la ventilation. Durant le scénario 2, 7 sujets se sont exprimés sur la trop forte luminosité et ont manifesté leur souhait de vouloir fermer rideaux et volets, sans savoir comment faire.

Egalement, l'expérimentateur a dû intervenir plusieurs fois, pour soit des bugs techniques concernant l'interface, soit des difficultés à localiser des ustensiles de cuisine lors du troisième scénario.

11.2.2 Synthèse

Date	N	Genre	Age	Clo	VMC	Météo	Remarques
24/3/11 9:00	1	M	> 60	0,5	on	beau	
28/3/11 9:00	2	F	30-40	0,6	on	beau	
28/3/11 17:00	3	M	40-50	0,6	on	Beau, soleil couchant	
28/3/11 19:00	4	M	30-40	0,6	on	Nuit	
29/3/11 14:00	5	M	> 60	0,7	on	beau	Sujet refusant le scenario de cuisine
30/3/11 18:00	6	F	20-30	0,4	on	beau	
31/3/11 10:00	7	F	30-40	0,5	on	maussade	
31/3/11 16:00	8	F	< 20	0,5	disjonctée	maussade, légère pluie	
1/4/11 14:00	9	F	40-50	0,6	disjonctée	beau	Passation interrompue dès la fin du premier scénario
5/4/11 17:00	10	F	30-40	0,5	on	très beau, soleil couchant	
6/4/11 10:00	11	F	30-40	0,7	on	très beau, avec oiseaux en activité	
6/4/11 15:00	12	F	< 20	0,5	on	très beau	Sujet souffre d'un léger rhume (nez bouché, sensibilité odorat réduite)
6/4/11 17:00	13	M	< 20	0,5	on	beau, soleil couchant	
7/4/11 10:00	14	M	20-30	0,4	on	beau, légèrement voilé	Sujet souffre d'un léger rhume (éternuements réguliers, sensibilité odorat réduite)
7/4/11 13:00	15	M	> 60	0,5	on	beau	
7/4/11 16:00	16	F	< 20	0,5	on	très beau, avec oiseaux en activité	Sujet souffre d'un léger rhume (éternuements réguliers, sensibilité odorat réduite)
11/4/11 12:00	17	F	20-30	0,5	on	beau mais frais	
11/4/11 14:00	18	F	50-60	0,6	on	beau mais frais	Surdité partielle
12/4/11 10:00	19	M	50-60	0,4	on	maussade, gris	
15/4/11 14:00	20	F	< 20	0,4	disjonctée	beau mais frais	

Tableau 11-1. Synthèse des conditions de l'expérimentation "in vitro"