



HAL
open science

Méthodologie et outils pour la conception d'un habitat intelligent

Sylvain Bonhomme

► **To cite this version:**

Sylvain Bonhomme. Méthodologie et outils pour la conception d'un habitat intelligent. Informatique [cs]. Institut National Polytechnique (Toulouse), 2008. Français. NNT: 2008INPT014H . tel-04456710

HAL Id: tel-04456710

<https://hal.science/tel-04456710>

Submitted on 14 Feb 2024

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

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

N° d'ordre :

THESE

présentée

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE
délivré par l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

École doctorale : SYSTEMES

Spécialité : Informatique

Préparée au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS
et au laboratoire des Renardières de EDF R&D

Par **Sylvain BONHOMME**

Titre de la thèse : **METHODOLOGIE ET OUTILS POUR LA CONCEPTION D'UN
HABITAT INTELLIGENT**

Soutenue le : 15 mai 2008 devant le jury composé de :

| | | | |
|-----|----------------------|--|-----------------------|
| M. | Jean-Pierre THOMESSE | Professeur – ENSEM-INPL Nancy | Rapporteur |
| M. | Serge MIRANDA | Professeur – Université de Nice Sophia-Antipolis | Rapporteur |
| M. | Mario PALUDETTO | Professeur – Université de Toulouse III | Membre |
| M. | Norbert NOURY | Maître de Conférences-HDR – Université de Grenoble I | Membre |
| M. | Alain ANFOSSO | Ingénieur CSTB Nice | Membre |
| Mme | Joëlle GUENNEC | Ingénieur EDF R&D | Co-encadrante |
| M. | Daniel ESTEVE | Directeur de Recherches Emérite - CNRS | Co-Directeur de thèse |
| M. | Eric CAMPO | Professeur – Université de Toulouse II | Directeur de thèse |

Remerciements

Le travail présenté dans ce manuscrit est le résultat de trois années de travail réalisées dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) du CNRS et Electricité de France Recherche et Développement (EDF-R&D). Cette thèse a été effectuée au sein du groupe Nano Ingénierie et Intégration des Systèmes (N2IS) du LAAS-CNRS sous la direction de M. Malik GHALLAB et M. Raja CHATILA, Directeurs successifs du laboratoire, ainsi que Mme Anne-Marie GUÉ et M. Jean-Yves FOURNIOLS, Responsables successifs du groupe N2IS que je remercie de m'avoir accueilli dans le laboratoire.

Je tiens à remercier particulièrement mon directeur de thèse M. Eric CAMPO, Professeur des Universités, pour son encadrement, son soutien et ses judicieux conseils qui m'ont permis de travailler dans les meilleures conditions durant toutes ces années. Je remercie également M. Daniel ESTEVE, Directeur de Recherches Emérite, pour avoir co-encadré ma thèse et dont la disponibilité, la pédagogie, les qualités exemplaires à la fois humaines et scientifiques m'ont permis d'aborder intelligemment ce thème de recherche. Je tiens à remercier également ma collaboratrice Mme Marie CHAN, Chargée de recherche, dont j'ai apprécié de travailler de manière efficace et coordonnée.

Je remercie M. Daniel GUILLERMIN, Responsable du département EnerBat à EDF-R&D aux Renardières, qui a permis de mettre en place cette thèse, ainsi que Mme Joëlle GUENNEC, Ingénieur, pour avoir suivi l'ensemble des travaux. Je remercie également M. Yves DHERBECOURT, Ingénieur à EDF-R&D Clamart, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et pour ses qualités humaines que j'ai fort appréciées. Je tiens à remercier particulièrement M. Denis COVALET et M. Hassan BOUIA, pour m'avoir enseigné méticuleusement les éléments clés de la thermique du bâtiment.

J'ai, par ailleurs, été très honoré de la présence au jury de thèse de :

M. Jean-Pierre THOMESSE, Professeur à l'ENSEM-INPL de Nancy et M. Serge MIRANDA, Professeur à l'Université de Nice Sophia-Antipolis, qui ont accepté de rapporter mon travail, et que je remercie pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à l'égard de mes travaux scientifiques ainsi que pour les perspectives pertinentes qu'ils ont suggérées.

M. Mario PALUDETTO, Professeur à l'Université de Toulouse III, qui m'a fait l'honneur d'examiner mon travail et de présider mon jury de thèse.

M. Alain ANFOSSO, Ingénieur au CSTB de Nice, et M. Norbert NOURY, Maître de Conférences-HDR à l'Université de Grenoble I, pour avoir participé au jury de thèse et apprécié le contenu de mes travaux.

Je tiens particulièrement à honorer l'ensemble des occupants de la résidence Isabelle-Romée qui m'ont maintes fois accueilli chaleureusement, en particulier Mme Lailler, Directrice de la résidence, Mme GAUCHE, Mme HUGUET, Mme HADDAD, etc.

Je tiens également à exprimer toute mon estime envers les personnes que j'ai rencontrées et appréciées durant ces trois années Miss Emilie MARCHAND et Arlette EVRARD, Mme Brigitte DUCROCQ, Mme Sophie ACHTE dont les rires et sourires illuminent nos journées. Je remercie également M. Christian BERTY, Mme Dominique DAURAT et M. Daniel DAURAT pour leur disponibilité notamment lors de la réalisation de cet ouvrage.

J'adresse également mes remerciements à tous ceux qui ont rendu ces années de travail agréables et heureuses : mes collègues et amis Christophe, Angel, Rémy, Juan-Carlos, Philippe, Albert, Edu, Hélène, Gustavo, Marine, Amine, Aïmed, Cédric, Nabil, Mehdi, Pascal, Jean-Marie, Stéphane et tous les autres... J'adresse un remerciement particulier à Hugues, pour tous les 'échecs' que j'ai entendus avec délectation, ainsi qu'à Crisan, pour tous ses mats 'machiavéliques'.

Mes derniers remerciements s'adressent à ceux qui me sont chers et qui me supportent depuis longtemps. Mes amis de la capitale Fafa, Polo, Vince, Lionnel, Alex, Nels, Hélène, Claire, Virginie, Marine, Nadège, Lolo, ainsi que Kamel, Jessica, Charly, Fairid, David, Karine, les Yahiaoui et tous les autres... Je remercie également mes parents, Madeleine, Doudou, Roland et toute ma famille qui ont toujours été présents et m'ont toujours soutenu de manière exemplaire. Je remercie bien sûr et enfin, mon indispensable dulcinée, Bina.

Je terminerai par une devise qui me tient à cœur depuis longtemps...

« Science sans conscience n'est que ruine de l'âme »

F. Rabelais

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE | 9 |
| CHAPITRE I ETAT DE L'ART DES ACQUIS DE L'HABITAT INTELLIGENT | 13 |
| I.1 LA DOMOTIQUE ET SES AVANCEES | 15 |
| I.2 DEFINITION DES TERMES DU DOMAINE | 18 |
| I.3 LA SITUATION NATIONALE | 20 |
| I.3.1 L'offre de service des grands opérateurs | 20 |
| I.3.2 L'offre sécuritaire | 21 |
| I.4 LA SITUATION DANS LE MONDE : LES MAISONS INTELLIGENTES..... | 22 |
| I.4.1 Aux Etats-Unis | 22 |
| I.4.2 En Asie | 25 |
| I.4.3 En Europe..... | 27 |
| I.4.4 En Australie..... | 31 |
| I.4.5 En Nouvelle- Zélande..... | 31 |
| I.4.6 Synthèse..... | 32 |
| I.5 LES GRANDES ORIENTATIONS DE LA RECHERCHE..... | 34 |
| I.6 L'ETHIQUE | 36 |
| I.7 L'ETAT DES TRAVAUX CONDUITS PAR LE LAAS ET EDF | 36 |
| I.7.1 La domotique de confort : le projet ERGDOM..... | 37 |
| I.7.2 La domotique de soins à domicile : le projet PROSAFE..... | 40 |
| I.7.3 Recommandations et perspectives | 42 |
| I.8 PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE THESE | 44 |
| I.9 CONCLUSION..... | 47 |
| | |
| CHAPITRE II CONCEPTION DOMOTIQUE : RECHERCHE D'UNE SOLUTION | |
| LOGIQUE SELON L'EIA-632 | 49 |
| II.1 INTRODUCTION | 51 |
| II.2 LA NORME EIA-632..... | 51 |
| II.2.1 Les exigences des processus définis par la norme EIA-632 | 52 |
| II.2.2 Les processus de conception | 53 |
| II.2.3 Les processus d'évaluation technique | 54 |
| II.2.4 Le cadre d'application de la norme | 55 |
| II.3 L'ETABLISSEMENT D'UN MODELE LOGIQUE DE FONCTIONNEMENT SELON LES | |
| RECOMMANDATIONS DE L'EIA-632 | 55 |
| II.3.1 Le modèle de contexte | 57 |
| II.3.2 L'identification des services | 60 |
| II.3.3 La définition des séquences..... | 66 |
| II.3.4 La modélisation de la logique de commande | 70 |
| II.3.5 La transformation du modèle SYSML au modèle HiLes | 71 |
| II.3.6 La vérification formelle de la logique de commande par TINA..... | 80 |
| II.3.7 L'intégration de la gestion des données | 83 |
| II.4 L'ETABLISSEMENT DU MODELE PHYSIQUE SELON LES RECOMMANDATIONS DE L'EIA₆₃₂ | 86 |
| II.4.1 Le modèle de configuration matérielle..... | 87 |
| II.4.2 Le modèle de déploiement | 89 |
| II.4.3 Le modèle d'exploitation | 91 |
| II.4.4 Le partitionnement | 92 |
| II.5 CONCLUSION | 98 |

| | |
|---|------------|
| CHAPITRE III LE CONFORT DANS L'HABITAT : LE PROJET ERGDOM | 99 |
| III.1 INTRODUCTION | 101 |
| III.2 RAPPEL DES RESULTATS ANTERIEURS | 102 |
| III.2.1 Le concept de ERGDOM I..... | 102 |
| III.2.2 Résultats | 103 |
| III.3 NORMES ET STANDARDS UTILES A L'EXTENSION DE ERGDOM II | 105 |
| III.3.1 Le confort thermique..... | 105 |
| III.3.2 La qualité de l'air intérieur | 106 |
| III.4 PERCEPTION DU CONFORT DANS L'HABITAT | 107 |
| III.4.1 Les différentes dimensions du confort dans ERGDOM II..... | 108 |
| III.4.2 Les indices mesurables du confort..... | 111 |
| III.5 LA CONCEPTION SYSTEME | 112 |
| III.5.1 Architecture | 112 |
| III.6 LES EXTENSIONS DE ERGDOM II | 113 |
| III.6.1 Approche Ergdom II pour la climatisation | 113 |
| III.6.2 Approche Ergdom II pour la gestion des occupants | 114 |
| III.6.3 Approche Ergdom II pour la ventilation..... | 114 |
| III.6.4 Approche Ergdom II pour la gestion de l'humidité..... | 115 |
| III.6.5 Problèmes posés par l'intégration des fonctionnalités..... | 115 |
| III.7 EVALUATION DES APPORTS NATURELS POUR LA GESTION DU CONFORT | 116 |
| III.7.1 Exigences et réglementation..... | 116 |
| III.7.2 Principe du « Free cooling » | 119 |
| III.7.3 La régulation du réchauffement par rayonnement solaire..... | 122 |
| III.7.4 Synthèse | 125 |
| III.8 DEFINITION D'UNE LOGIQUE DECISIONNELLE ERGDOM II | 127 |
| III.8.1 Principe | 127 |
| III.8.2 L'interprétation des consignes..... | 128 |
| III.8.3 Le calcul de la vitesse de ventilation..... | 130 |
| III.8.4 Le choix des actionneurs | 131 |
| III.8.5 Le calcul des commandes | 134 |
| III.9 CONCLUSION | 135 |
| | |
| CHAPITRE IV LA SECURITE DANS L'HABITAT : LE PROJET PROSAFE | 137 |
| IV.1 INTRODUCTION | 139 |
| IV.2 RAPPEL DES RESULTATS ANTERIEURS | 140 |
| IV.2.1 Le concept PROSAFE | 140 |
| IV.2.2 Principe de détection d'incident..... | 141 |
| IV.2.3 L'apprentissage supervisé..... | 141 |
| IV.3 LA SURVEILLANCE EN INSTITUTION : L'EXPERIMENTATION DE CHARRON | 141 |
| IV.3.1 Architecture de PROSAFE..... | 141 |
| IV.3.2 Résultats | 143 |
| IV.3.3 Bilan..... | 144 |
| IV.3.4 Limites du système..... | 145 |
| IV.4 LA SURVEILLANCE SECURITAIRE EN APPARTEMENT | 146 |
| IV.4.1 Vers une extension « Indoor » | 147 |
| IV.4.2 L'expérimentation d'Orléans..... | 149 |
| IV.4.3 Modélisation générale des habitudes de vie | 154 |
| IV.4.4 Algorithme de détection d'incidents | 163 |
| IV.4.5 Résultats | 167 |
| IV.4.6 Evaluation des performances..... | 173 |
| IV.5 L'AIDE AU DIAGNOSTIC MEDICAL | 174 |
| IV.5.1 Principe..... | 174 |
| IV.5.2 La mesure de la déviance | 175 |
| IV.5.3 Les témoins des capacités physiques..... | 176 |
| IV.6 CONCLUSION | 178 |
| | |
| CONCLUSION GENERALE | 179 |
| BIBLIOGRAPHIE | 185 |

Liste des figures

| | |
|---|-----|
| Figure 1 : Production de véhicules particuliers en millions. | 15 |
| Figure 2 : Ménages en France possédant un Micro-ordinateur et Internet depuis 1999. | 18 |
| Figure 3 : Acteurs du réseau de soins. | 29 |
| Figure 4 : Champs d'investigations de l' « Habitat Intelligent »..... | 32 |
| Figure 5 : L'état des travaux conduits par le LAAS et EDF. | 37 |
| Figure 7 : Principe du concept ERGDOM. | 38 |
| Figure 8 : Architecture matérielle du gestionnaire ERGDOM..... | 39 |
| Figure 9 : Positionnement du système ERGDOM en terme de coût..... | 40 |
| Figure 10 : Positionnement du système ERGDOM en terme d'insatisfaction de l'utilisateur. | 40 |
| Figure 11 : Schéma d'implantation des capteurs dans les chambres. | 41 |
| Figure 12 : Performances de la détection d'incidents. | 42 |
| Figure 13 : Les processus d'Ingénierie Systèmes de l'EIA-632. | 52 |
| Figure 14 : Le processus de conception selon la norme EIA-632..... | 53 |
| Figure 15 : Les processus d'évaluation technique selon la norme EIA-632..... | 54 |
| Figure 16 : Démarche globale de la conception de la solution logique..... | 55 |
| Figure 17 : Démarche globale de la conception de la solution logique..... | 56 |
| Figure 18 : Diagramme de contexte dynamique du système ERGDOM II..... | 58 |
| Figure 19 : Cas d'utilisation du système ERGDOM II. | 61 |
| Figure 20 : Hiérarchisation des fonctions. | 64 |
| Figure 21 : Séquences : événements asynchrones liés à la présence de l'utilisateur. | 68 |
| Figure 22 : Séquences : boucle principale de régulation. | 69 |
| Figure 23 : Activité : « Gérer confort »..... | 71 |
| Figure 24 : Méta-modèle HiLes. | 74 |
| Figure 25 : Diagramme hiérarchique du modèle HiLes..... | 77 |
| Figure 26 : Niveau 0 du « modèle ERGDOM II »..... | 78 |
| Figure 27 : Bloc « ERGDOM II ». | 78 |
| Figure 28 : Bloc « Gestion confort ». | 79 |
| Figure 29 : Paramétrage de l'outil TINA..... | 82 |
| Figure 30 : Description des données. | 84 |
| Figure 31 : Activité : « Gérer confort »..... | 85 |
| Figure 32 : Démarche globale de la conception de la solution physique. | 87 |
| Figure 33 : Fournitures spécifiées par le cahier des charges. | 88 |
| Figure 34 : Modèle de configuration matérielle du système ERGDOM II..... | 89 |
| Figure 35 : Le modèle de déploiement. | 90 |
| Figure 36 : Le modèle d'exploitation. | 91 |
| Figure 37 : Modèle de partitionnement..... | 93 |
| Figure 38 : Méta-modèle de définition des interfaces. | 94 |
| Figure 39 : Interfaces du modèle physique de ERGDOM II..... | 95 |
| Figure 40 : Interfaces matérielles du système ERGDOM II..... | 96 |
| Figure 41 : Diagramme interne - Bloc « Unité de traitements »..... | 97 |
| Figure 42 : Fonctionnement du gestionnaire ERGDOM..... | 103 |
| Figure 43 : Fréquence des activités en fonction des intervalles horaires..... | 104 |
| Figure 44 : Facteurs du confort sensoriel. | 108 |
| Figure 45 : Architecture ERGDOM : gestion du confort thermique (rafraîchissement)..... | 114 |
| Figure 46 : Architecture ERGDOM : gestion du confort visuel..... | 114 |
| Figure 47 : Architecture ERGDOM : gestion de la qualité de l'air. | 115 |
| Figure 48 : Architecture ERGDOM : gestion de l'humidité. | 115 |
| Figure 49 : Zones climatiques de France selon la RT2000..... | 117 |
| Figure 50 : Modélisation d'un logement type. | 119 |
| Figure 51 : Evolution des températures en fonction des scénarios de ventilation..... | 121 |
| Figure 52 : Evolution des températures en fonction des scénarios d'occultation..... | 124 |
| Figure 53 : Procédure de la logique décisionnelle. | 128 |
| Figure 54 : Valeurs de l'indice Humidex..... | 129 |
| Figure 55 : Personnalisation du modèle de confort..... | 130 |
| Figure 56 : Le calcul des commandes..... | 135 |
| Figure 57 : Architecture fonctionnelle PROSAFE..... | 140 |

| | |
|--|-----|
| Figure 58 : Principe de détection d'un incident..... | 141 |
| Figure 59 : Architecture matérielle du système « PROSAFE » existant..... | 142 |
| Figure 60 : Activités des patients en Institution..... | 143 |
| Figure 61 : IHM d'exploitation du système pour le personnel médical..... | 144 |
| Figure 62 : Evaluation des différentes causes d'erreurs de diagnostic..... | 145 |
| Figure 63 : Architecture multifonctionnelle..... | 148 |
| Figure 64 : Architecture logique du système de surveillance « PROSAFE-étendu »..... | 152 |
| Figure 65 : Architecture matérielle..... | 153 |
| Figure 66 : Configuration capteurs appartement 1..... | 154 |
| Figure 67 : Configuration capteurs appartement 2..... | 154 |
| Figure 68 : Principe de fonctionnement des algorithmes évolutionnaires..... | 156 |
| Figure 69 : Définition d'un individu..... | 157 |
| Figure 70 : Opérateur de croisement génétique..... | 158 |
| Figure 71 : Opérateur de mutation génétique..... | 158 |
| Figure 72 : Fréquences des valeurs de mutation..... | 159 |
| Figure 73 : Découpage temporel d'une journée..... | 160 |
| Figure 74 : Exemple de trajectoire pour le calcul de la distance « estimée »..... | 162 |
| Figure 75 : Filtrage des données des capteurs..... | 164 |
| Figure 76 : Métriques calculées..... | 165 |
| Figure 77 : Patron de mail de confirmation d'alarme..... | 167 |
| Figure 78 : Immobilité par tranches horaires en fonction des zones..... | 168 |
| Figure 79 : Temps de séjour par tranches horaires en fonction des zones..... | 169 |
| Figure 80 : Agitation par tranches horaires en fonction des zones..... | 170 |
| Figure 81 : Distances relatives par tranches horaires..... | 171 |
| Figure 82 : Vitesses relatives par tranches horaires en fonction des trajectoires..... | 172 |
| Figure 83 : Situation de chute..... | 173 |
| Figure 84 : Comparaison des performances des algorithmes PROSAFE..... | 174 |
| Figure 85 : Principe de calcul de la déviance..... | 175 |
| Figure 86 : Déviance du comportement calculé sur une journée..... | 176 |
| Figure 87 : Evolution des critères d'activités en fonction du temps..... | 177 |
| Figure 88 : Séquences : commande utilisateur pour la gestion du confort..... | 202 |
| Figure 89 : Séquences : Commander appareils..... | 202 |
| Figure 90 : Séquences : la gestion du modèle de confort..... | 203 |
| Figure 91 : Séquences : la gestion du modèle thermique..... | 203 |
| Figure 92 : Séquences : la gestion du modèle de présence..... | 203 |
| Figure 93 : Activité : « Gérer système »..... | 204 |
| Figure 94 : Activité : « Modéliser la thermique de l'habitat »..... | 204 |
| Figure 95 : Activité : « Modéliser les habitudes de présence de l'utilisateur »..... | 204 |
| Figure 96 : Activité : « Détecter présence »..... | 205 |
| Figure 97 : Activité : « Modéliser le confort de l'utilisateur »..... | 206 |
| Figure 98 : Activité : « Logique décisionnelle »..... | 206 |
| Figure 99 : Activité : « Calculer commandes »..... | 207 |
| Figure 100 : Activité : « Acquérir conditions intérieures »..... | 207 |
| Figure 101 : Activité : « Acquérir conditions extérieures »..... | 208 |
| Figure 102 : Activité : « Acquérir conditions intérieures »..... | 208 |
| Figure 103 : Activité : « Commander appareils »..... | 208 |
| Figure 104 : Activité : « Acquérir tarification »..... | 208 |
| Figure 105 : Bloc : « Gestion système »..... | 209 |
| Figure 106 : Bloc : « Détection de la présence »..... | 210 |
| Figure 107 : Bloc : « Habitudes de présence »..... | 210 |
| Figure 108 : Bloc : « Habitudes de confort »..... | 211 |
| Figure 109 : Bloc : « Logique décisionnelle »..... | 212 |
| Figure 110 : Bloc : « Modèle thermique »..... | 212 |
| Figure 111 : Logement individuel 'Mozart'..... | 213 |
| Figure 112 : Description du modèle thermique paroi par paroi..... | 214 |
| Figure 113 : Modélisation du logement Mozart sous Clim2000 (windows)..... | 215 |
| Figure 114 : Modélisation thermique détaillée du séjour..... | 215 |
| Figure 115 : Modèle thermique du logement Mozart sous Clim2000 (Unix)..... | 216 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau 1 : Synthèse des méthodes appropriées aux traitements des données des capteurs. | 33 |
| Tableau 2 : Synthèse des méthodes appropriées aux traitements des données des capteurs. | 33 |
| Tableau 3 : Tableau comparatif des détecteurs de présence. | 45 |
| Tableau 4 : Les exigences des processus définies par l'EIA-632. | 52 |
| Tableau 5 : Abréviations utilisées pour la spécification des fonctions. | 59 |
| Tableau 6 : Liste des messages échangés entre acteurs et cas d'utilisation. | 63 |
| Tableau 7 : Règles de transformation des activités aux Réseaux de Petri. | 75 |
| Tableau 8 : Règles de connexion entre les blocs structurels HiLes. | 76 |
| Tableau 9 : Propriétés des blocs HiLes : fonctionnement nominal. | 83 |
| Tableau 10 : Propriétés des blocs HiLes : cycle général de fonctionnement. | 83 |
| Tableau 11 : Normes destinées à évaluer le confort thermique. | 105 |
| Tableau 12 : Normes spécifiant la QAI dans l'habitat. | 107 |
| Tableau 13 : Effets thermiques. | 109 |
| Tableau 14 : Principaux polluants de l'air ambiant. | 111 |
| Tableau 15 : Débits d'extraction d'air imposés par la norme RT2000. | 118 |
| Tableau 16 : Caractéristiques des scénarios de ventilation. | 120 |
| Tableau 17 : Capacités de rafraîchissement du free cooling. | 122 |
| Tableau 18 : Capacités calorifique du rayonnement solaire. | 125 |
| Tableau 19 : Analyse des interactions entre automates. | 126 |
| Tableau 20 : Règles de sécurité pour la qualité de l'air. | 130 |
| Tableau 21 : Choix de la vitesse de ventilation. | 131 |
| Tableau 22 : Identification des objectifs de la régulation. | 132 |
| Tableau 23 : Logique de décision. | 134 |

INTRODUCTION GENERALE

L'idée d'un Habitat Intelligent, associé au concept de Domotique remonte aux années 1980 : le développement des fonctions électroniques intégrées et la baisse des coûts qui lui était associé ouvraient de nouvelles perspectives d'automatismes des commandes et de surveillance : confort, sécurité, communication... L'explosion du marché que l'on prévoyait ne s'est pas concrétisée alors que parallèlement, d'autres domaines connaissaient une forte pénétration, comme l'automobile qui a atteint aujourd'hui plus de 25% de son prix de revient... Par contre, de nombreuses avancées ont été réalisées sur les équipements domestiques intérieurs, et sur les communications qui laissent penser qu'une « offre globale domotique intégrée » est aujourd'hui possible.

Plus récemment, l'éventualité d'un réchauffement climatique met l'accent sur l'urgence d'un habitat économe en énergie et respectueux de l'environnement : nul doute que cette perspective contribue aussi à accélérer la mutation programmée de l'habitat.

Le LAAS a commencé ses travaux, sur le sujet de la Domotique dès les débuts des années 90 après une enquête conduite au nom du CNRS sur l'Habitat Intelligent [Este97]. Cette enquête mettait l'accent sur la priorité à donner aux attentes des usagers pour simplifier l'activité de conduite des systèmes (en limiter la programmation) et intégrer des fonctions jugées essentielles de sécurité des personnes et des biens. Cette analyse ouvrait des perspectives scientifiques intéressantes sur les capteurs et la fusion de données recueillies pour optimiser les actions de commandes automatiques des appareils domestiques. Parallèlement, l'idée d'une représentation de l'utilisateur par ses habitudes (habitudes de présence et de localisation) a progressé.

Cette option de modélisation par les habitudes de l'utilisateur, originale à cette période, a été soumise à EDF en 1995 et a fait l'objet d'une première étape de validation sur simulateur sur un objectif de confort automatique : c'est la naissance du projet ERGDOM, système de gestion automatisée du confort, qui a donné lieu au dépôt d'un brevet commun EDF-CNRS en 1997 [Bail97]. Sur le même concept, d'apprentissage des habitudes, un second projet centré sur les questions de surveillance des personnes âgées à domicile était lancé en 1995, intitulé PROSAFE qui a également été soumise à EDF donnant lieu au dépôt d'un brevet commun EDF-CNRS en 2003 [Fiol03a]. Plusieurs années de collaboration ont suivi pour démontrer sur site réel l'intérêt de l'approche d'une commande automatique par les habitudes.

En 1999, commençait une campagne de validation ERGDOM sur Habitation [Camp03a], avec le concours des entreprises (Delta-Dore et Legrand), appliqué à la conduite du confort thermique hivernal. Cette campagne (réalisée à Rennes et Limoges) a été un total succès sur le plan de l'efficacité et du retour des utilisateurs.

En 2002, commençait une campagne d'essais sur PROSAFE, à Charron [Camp02] dans un établissement médicalisé. Il s'agissait d'effectuer une surveillance de nuit : l'expérience met à exergue l'intérêt d'une fonction nouvelle « agitation », bien réalisée par des capteurs de présence pyroélectrique, et l'appui apporté à l'infirmière dans la conduite de son travail. Des expériences complémentaires étaient nécessaires pour bien couvrir la question de détection de chute. Ce point, fait au démarrage de nos travaux de thèse, invitait à :

- d'une part, élargir les fonctionnalités de ERGDOM au confort toutes saisons, en évaluant la pertinence des algorithmes d'apprentissages, et en introduisant de nouveaux scénarios et actionneurs (la climatisation, la ventilation, les occultants, l'éclairage).
- d'autre part, ouvrir la voie à une surveillance PROSAFE, portant sur un appartement complet alors que les premières expérimentations ne concernaient qu'une chambre en Institution.

Cet intérêt applicatif s'est doublé d'une problématique scientifique plus ambitieuse : définir et mettre en place les méthodes et les outils de conception d'un habitat intelligent intégrant ces objectifs de confort et sécurité. C'est le sens du travail de thèse que nous avons engagé en 2005.

Notre thèse s'intitule donc : *Méthodologie et outils pour la conception d'un habitat intelligent*. Elle a été réalisée sous la direction de :

- J. Guennec (encadrante de thèse), D. Guillermin, Y. Dherbecourt, F. Benard à EDF R&D,
- E. Campo (directeur de thèse) et D. Estève (co-directeur de thèse) au LAAS dans le groupe N2IS.

Nous présentons, dans ce manuscrit, nos travaux en quatre chapitres :

- Le premier chapitre tracera d'abord un état de l'art, au travers d'une étude bibliographique, des démonstrateurs nombreux qui vont être construits. On s'efforcera de dégager de cette première présentation, des enseignements généraux sur la meilleure façon de conduire l'effort collectif dans le futur. Nous reviendrons ensuite sur les travaux conduits au LAAS-CNRS en collaboration avec EDF. Nous tenterons ensuite de donner une perspective moderne à l'habitat intelligent à la fois sur la construction et sur les fonctions qui devront y être intégrées. Nous terminerons ce chapitre par une présentation des objectifs de thèse d'abord scientifiques : méthodes et outils, puis applicatifs ERGDOM étendu et PROSAFE étendu.
- Le second chapitre est consacré aux méthodes et outils à mettre en place : de nombreux capteurs y sont utiles pour mesurer les conditions environnementales selon notre approche par les habitudes des utilisateurs, le capteur clef étant, de notre point de vue, le capteur de présence. Même si nous avons sur ce sujet travaillé sur de nouvelles générations de capteurs : capteur thermopile et capteur de comptage de personnes que nous présenterons comme une première construction, la part la plus importante du chapitre sera consacrée à la façon

dont nous préconisons de conduire un travail de conception d'un habitat intelligent vu sous l'angle « concepts d'apprentissage », « confort thermique » et « sécurité ». Notre approche s'efforce d'être conforme avec les grands principes de l'ingénierie des systèmes, c'est-à-dire d'appliquer une procédure descendante à partir d'un cahier des charges précis (et on voit ici l'intérêt de la collaboration avec EDF qui a pris en charge cet aspect du processus). Nous montrerons ensuite comment opérer pour établir un modèle de fonctionnement logique et comment aboutir à un prototypage virtuel d'un algorithme de commande. Nous concluons ce chapitre sur les états des progrès dans la commande et des insuffisances qui pourront être comblées peu à peu par d'autres contributions mis en œuvre pour évaluer, tester et valider des méthodes, des outils et des systèmes (capteurs, fusion de données, communication) avec l'objectif principal d'aider à la surveillance de personnes âgées et/ou dépendantes et à l'optimisation du confort sensoriel.

Les deux derniers chapitres sont plus applicatifs :

- Le troisième chapitre est consacré à l'élargissement du projet ERGDOM vers la conduite d'un confort toutes saisons : Hiver – Été. Nous continuerons d'exploiter une modélisation des habitudes de présence de l'occupant et en tireront les éléments d'une commande prédictive. Nous détaillerons les nouvelles avancées que nous proposons pour offrir un service économe et complet de confort toutes saisons.
- Le chapitre 4 considère les questions de surveillance sécuritaire appliquée à la surveillance des personnes âgées souhaitant vivre à domicile. L'ambition de notre travail a été de dépasser la surveillance de nuit d'une chambre en institution à la surveillance d'une personne isolée vivant dans un appartement. Cela oblige à proposer de nouveaux outils que nous détaillerons dans ce chapitre. Nous avons eu la chance, grâce à une expérimentation en site habité souhaitée par EDF, d'explorer l'intérêt de nos propositions dans un appartement au sein d'un foyer logement dans la ville d'Orléans. Nous présenterons en détail les premiers résultats de validation.

Nous tirerons finalement la leçon de notre expérience par rapport à l'objectif ultime d'un habitat intégrant toutes les fonctions confort, sécurité, communication, maintenance... Nous ferons un point sur l'état d'avancement et les perspectives à court et moyen termes, considérant que les orientations socio-politiques actuelles font une urgence d'un habitat économe et respectueux de l'environnement.

Chapitre I Etat de l'art des acquis de l'habitat intelligent

| | |
|---|-----------|
| I.1 LA DOMOTIQUE ET SES AVANCEES | 15 |
| I.2 DEFINITION DES TERMES DU DOMAINE | 18 |
| I.3 LA SITUATION NATIONALE..... | 20 |
| I.3.1 L'offre de service des grands opérateurs..... | 20 |
| I.3.2 L'offre sécuritaire..... | 21 |
| I.4 LA SITUATION DANS LE MONDE : LES MAISONS INTELLIGENTES | 22 |
| I.4.1 Aux Etats-Unis..... | 22 |
| I.4.2 En Asie | 25 |
| I.4.3 En Europe..... | 27 |
| I.4.4 En Australie..... | 31 |
| I.4.5 En Nouvelle- Zélande..... | 31 |
| I.4.6 Synthèse..... | 32 |
| I.5 LES GRANDES ORIENTATIONS DE LA RECHERCHE..... | 34 |
| I.6 L'ETHIQUE..... | 36 |
| I.7 L'ETAT DES TRAVAUX CONDUITS PAR LE LAAS ET EDF | 36 |
| I.7.1 La domotique de confort : le projet ERGDOM..... | 37 |
| <i>I.7.1.a Principe</i> | <i>37</i> |
| <i>I.7.1.b Les expérimentations en logements</i> | <i>39</i> |
| <i>I.7.1.c Performances</i> | <i>39</i> |
| I.7.2 La domotique de soins à domicile : le projet PROSAFE | 40 |
| <i>I.7.2.a Principe</i> | <i>40</i> |
| <i>I.7.2.b La surveillance en institution</i> | <i>41</i> |
| <i>I.7.2.c Performances</i> | <i>42</i> |
| I.7.3 Recommandations et perspectives | 42 |
| I.8 PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE THESE | 44 |
| I.9 CONCLUSION | 47 |

I.1 La domotique et ses avancées

La Domotique est, depuis de très nombreuses années, identifiée comme un axe à fort potentiel de développement pour les technologies électroniques. Dès les années 80, des applications très diverses étaient inventoriées sur le confort et la sécurité des personnes et des biens. Le marché, malgré des productions très élaborées et bien ciblées, est resté en retrait d'autres développements parallèles comme les Télécommunications et l'Automobile, où la part de l'Electronique y est tous les ans plus importante.

Avec le recul, nous pouvons trouver plusieurs raisons à l'échec technologique initial de la Domotique, dont les plus souvent invoqués sont des besoins et des usages mal identifiés, des technologies de télécommunication peu développées et un manque de standard. Les usagers très sollicités ont ainsi eu d'autres priorités par rapport aux offres domotiques proposées :

- sur l'Automobile, qui a connu à partir des années 80, des ventes très soutenues activées par les innovations sécuritaires et l'amélioration rapide de l'infrastructure routière, et qui continuent de rester très soutenues avec les nouveaux marchés émergents : en Chine, en Inde, au Brésil, etc. Selon les chiffres publiés par le ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi [Sess], la production automobile en France est en constante progression, elle a été multipliée par 20 entre 1950 et 2004, passant de 0,257 millions d'automobiles particulières produites en 1950 à 5,168 millions en figure 1.

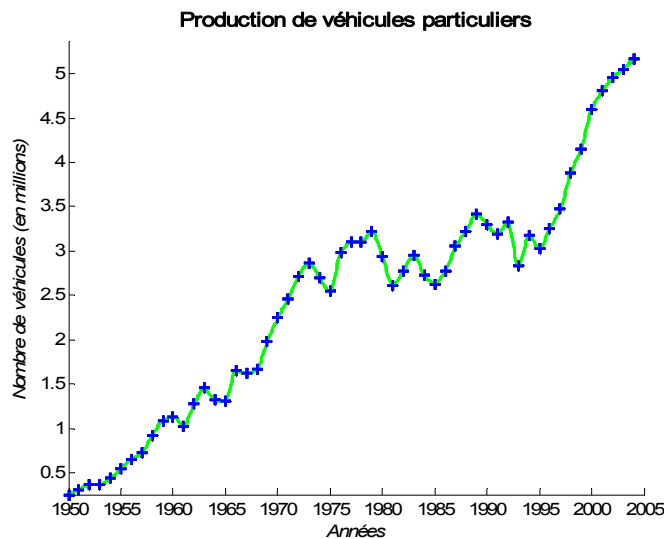


Figure 1 : Production de véhicules particuliers en millions.

La politique des constructeurs automobiles a, en effet, très tôt été de proposer à prix constant de nouveaux services et fonctionnalités embarqués. Cette politique associée à une grande diversification dans l'offre a sûrement contribué à l'expansion du marché.

- **sur les équipements audio-visuels,**

On peut penser que les dépenses des ménages ont été consacrées à ces pratiques nouvelles ne laissant pas de place à des achats massifs d'autres équipements domotiques notamment ceux basés sur les automatismes et le contrôle de l'environnement. Une autre raison qui nous agrée davantage tient au fait que l'industrie du bâtiment est restée dans la tradition d'offres multiples : celles de la construction et celles des autres corps de métier. Cette pratique est à comparer avec l'offre automobile intégrée.

Dans le développement de l'habitat, au contraire, tout investissement d'infrastructure informatique ou télécommunication apparaît comme un surcoût que l'on peut éviter ou délayer. Les ménages dépensaient une grande partie de leur revenu pour des marchandises telles que les voitures, les ordinateurs, etc. et une très petite partie pour l'achat de dispositifs de domotique. Encore aujourd'hui, il n'existe pas d'offre intégrée sur le marché pour l'habitat individuel, même s'il existe quelques propositions pour les bureaux et immeubles professionnels. Les faiblesses de l'offre et de la demande n'ont donc pas permis à la Domotique de se développer aussi rapidement qu'on pouvait le prédire restant ainsi dispersée et peu innovante.

Depuis les années 2000, la « Domotique » a fait place à la « Maison communicante » basée sur des dispositifs de communications nombreux et accessibles permettant de proposer de nouveaux services plus adaptés dont plusieurs progrès récents méritent d'être rappelés :

- **La télégestion** : Grâce aux technologies modernes de communication (Internet, hauts débits ADSL/SDSL, Wifi, réseaux privés virtuels, etc.), qui sont courantes en Informatique, il est possible de collecter à distance toutes les informations nécessaires aux problématiques d'exploitation d'installations industrielles ou privées, de leur surveillance ou encore de leur maintenance. Elles permettent le diagnostic et la gestion des interventions à domicile par des intervenants pour le compte de prestataires de services et/ou de financeurs de ces services. Dans ce cadre et pour la maison, toutes les données : dépenses en fluide, en énergie (gaz, électricité), en télécommunications peuvent être envoyées à distance sans déplacement de personnels, par simple relevé distants et automatiques des compteurs. Pour le confort de l'habitat : le chauffage, la climatisation, la ventilation, l'éclairage, les ouvertures (portes et fenêtres), etc. peuvent également être contrôlés de manière automatique et le cas échéant, de manière télé-opérée. Les différents appareils électroménagers, les machines à laver le linge, la vaisselle, le réfrigérateur, la cuisinière etc. peuvent aussi être programmés de telle sorte qu'en l'absence de l'utilisateur, les différents appareils peuvent exécuter leurs tâches. En matière de loisirs, les postes de TV, de radio et autres appareils de divertissement peuvent être connectés à des réseaux et recevoir une grande diversité de programmes.
- **La sécurité des biens**, se fonde sur la mise en place d'un système d'alarme qui est installé à domicile et relié à un intervenant par réseau téléphonique. Ainsi, le propriétaire de la maison surveillée, peut à tout moment savoir ce qui se passe dans son domicile. Il reçoit des alarmes et peut organiser son action, soit en allant lui-même contrôler, soit en confiant ce travail à un voisin ou un membre de la famille disponible, soit encore, confier ce travail à un professionnel de la télésurveillance moyennant le paiement d'une prestation. Son système est alors connecté à un centre spécialisé de télésurveillance distant, alerté par

un transmetteur téléphonique. Le service, disponible 7 jours sur 7 et 24 heures sur 24, agit immédiatement en effectuant un contre appel à domicile et prévient immédiatement, en cas de nécessité, les personnes désignées. Après confirmation et caractérisation de l'évènement, un agent spécialiste de l'intervention peut être dépêché sur place pour effectuer un contrôle et remettre tout en ordre.

- **La téléassistance des personnes âgées :** Depuis les années 80, les personnes âgées peuvent bénéficier d'un service de téléassistance pour le maintien à domicile. Un dispositif miniature porté autour du cou, sur le poignet ou dans une poche rassure la personne qui par simple pression sur un bouton, peut entrer en relation avec sa famille ou avec un service spécialisé. Le dispositif se présente sous la forme d'un boîtier sans fil relié au téléphone, que la personne âgée utilise en cas de danger ressenti. Il peut faire partie d'une offre de services supportée par les compagnies d'assurance, les collectivités locales et autres associations. Ce service, disponible 7 jours sur 7 et 24 heures sur 24, réagit immédiatement en cas d'appel, en effectuant un contre appel à domicile pour vérifier le bien fondé de l'appel. Il organise, en cas de danger, le service de prise en charge en confiant la personne au service médical compétent, au pompier ou à la famille [Esso][Soge][Acce].

Ces rappels et cette analyse montrent que, même si l'Electronique en Domotique n'a pas développé son volume de marché aussi rapidement que prévu, d'importants progrès techniques ont toutefois été réalisés, qui définissent des besoins et des perspectives nouvelles de développement.

En quoi les choses ont-elles changé ?

- Il y a eu un développement rapide de l'électronique grand public et en particulier de la microélectronique pour les technologies sans fil permettant notamment l'accès à Internet à moindre coût. En 2004, selon les sources françaises de l'INSEE [Inse07], 45% des ménages français disposaient d'un micro-ordinateur à domicile et 30,7% de l'accès à Internet. Aujourd'hui, la plupart des régions en France ont accès à l'Internet haut débit essentiellement de type ADSL (figure 2).

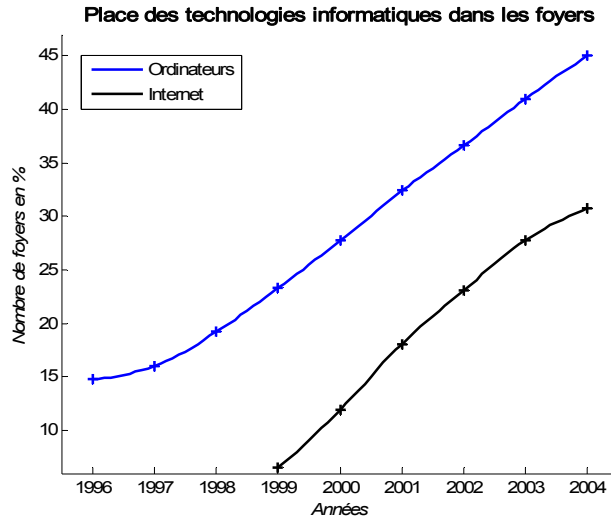


Figure 2 : Ménages en France possédant un Micro-ordinateur et Internet depuis 1999.

- Il y a une progression rapide de la maîtrise des capteurs miniaturisés, autonomes et sans fil, permettant une installation et une utilisation technique plus aisée de l'infrastructure de capture des informations nécessaires à la mise en place de services d'aide à domicile, de sécurité (contrôle d'accès, protection anti-intrusion, détection du feu, de gaz, etc.)
- Il y a de manière plus générale, le développement de micro-objets passifs ou actifs de plus en plus utilisés, les « tag ». Ces sont des puces embarquées, des « étiquettes » avec lesquelles il est possible de communiquer. La miniaturisation des puces, la généralisation de la connectivité sans fil et le développement des capteurs et actionneurs ouvrent la voie aux objets « intelligents » et « communicants », capables de détecter et d'agir dans leur environnement, qu'il s'agisse d'un espace physique, d'une machine, d'un objet inanimé, d'une chaîne de production ou du corps humain.
- Il y a également le téléphone mobile offrant une relation permanente domicile - extérieur, et facilitant l'interconnexion et l'interaction entre les divers intervenants et les personnes surveillées. Ces téléphones portables peuvent être équipés de systèmes de localisation de type GPS, GALILEO, EGNOS.

Il se dessine donc une nouvelle Domotique très ambitieuse sur tous les points avec des usages mieux identifiés : du confort, des loisirs, de la sûreté des biens et des personnes, sur la communication, la maintenance, etc. Un objectif de ce chapitre au-delà de faire le point de la situation, est donc d'inviter les opérateurs industriels à construire une offre intégrée engageant enfin le développement de la Domotique performante et à faible coût dont le besoin croît partout dans le monde.

I.2 Définition des termes du domaine

Pour classifier avec précision les systèmes domotiques qui ont été proposés ces dernières années, il est nécessaire de rappeler les termes qui ont été utilisés et qui évoluent encore selon les services, les fonctionnalités et les acteurs considérés.

Le terme « *télémédecine* » (« *telemedicine* ») définit les systèmes exploitant la vidéo, l'audio, les informations numériques et les autres moyens de télécommunications issus des technologies pour transmettre les informations et les données se rapportant aux diagnostics et traitements médicaux, et fournissant des services de soins et de santé à des patients situés dans des environnements physiques distants [Mahe07]. A l'origine, la définition s'appliquait à des services consultatifs délivrés essentiellement par vidéo interactive, mais depuis l'avènement de l'Internet et de l'ère multimédia, la « *télémédecine* » a évolué vers la « *télésanté* » (« *telehealth* ») qui a une portée plus large que les réseaux de télémeédecine, et considère non seulement l'éducation du patient, la prévention de la maladie et la prise de décisions thérapeutiques, mais également les ressources administratives, les données physiologiques du patient et les bases de données médicales.

Le terme « *télésanté* » semble aujourd'hui ainsi plus approprié dans la mesure où il cadre l'ensemble des technologies, des réseaux et des services de soins basés sur la télécommunication et comprenant les programmes d'éducation, de recherche collaborative, de consultation ainsi que d'autres services offerts dans le but d'améliorer la santé du patient [Moor99].

Le terme « *télésanté à domicile* » (home telehealth) définit le cas où un fournisseur de soins exploite les télécommunications pour mettre en relation les patients situés dans leur domicile, à une ou plusieurs des sources d'information de santé, d'éducation et de service de soins, extérieures au domicile, au moyen de téléphones, ordinateurs, télévision interactive [Sprin98].

Il y a quelques années, le terme « *eHealth* », défini par Eysenbach, identifiait le domaine émergent alliant l'informatique médicale, la santé publique et le business, rapportés aux services de santé, à l'information délivrée par l'Internet et aux technologies de communication sous-jacentes. Dans un sens plus large et au-delà des développements techniques, il définissait un état d'esprit, une manière de penser, une attitude, une réflexion globale et un engagement destiné à améliorer les soins de santé localement, régionalement et mondialement, en exploitant les technologies de l'information et de la communication [Eyse01].

Le terme « *soins de santé à domicile* » (home healthcare), apparaît aux Etats-Unis pour définir les services de soins de santé ainsi que les services sociaux associés tels que la réhabilitation, le travail social, les soins infirmiers et les aides de santé fournis aux individus, à leur famille, aux intervenants et aux patients dans leur domicile.

Le terme « *télémédecine à domicile* » (telehomecare) définit les technologies de télécommunication et de vidéoconférence pour permettre à un prestataire de soins de santé, tel une clinique, de communiquer avec les patients lorsqu'ils sont dans leur logement. Ce type d'interaction est appelé « *visite virtuelle* », par opposition au terme « *visite réelle* » faisant référence à la visite traditionnelle du prestataire de soins de santé dans le domicile du patient. Le principe de « *visite virtuelle* » à domicile impose de maîtriser plusieurs fonctionnalités réparties dont notamment la commande distante et le transfert des informations physiologiques du patient (rythme cardiaque, respiration, pression artérielle, signes vitaux, etc.) fournis par des dispositifs embarqués, portatifs, etc.

Demiris introduit le concept de « *eHealth à domicile* » (home based eHealth) incluant à la fois la « *télémédecine à domicile* » et la « *maison intelligente* » (smart

home). Il s'agit de coupler l'apport des technologies destinées à améliorer les services de soins à domicile, avec les services de prévention de la maladie et de surveillance non envahissante des usagers qui ne sont pas nécessairement des sujets à risques, tels que les personnes âgées ou handicapées [Demi07].

Des « *dispositifs d'assistance* » (« assistive device ») ont donc été conçus et mis sur le marché pour accomplir des fonctions spécialisées et s'intégrer dans l'ensemble de ces applications [Guer94]. Un « *système entièrement intégré* » (« integrated system ») est un dispositif dont les fonctions sont commandées par une interface homme-machine [Nisb96][Romi84]. Cooper et Keating ont utilisé le terme « *systèmes domotiques intégrés* » (« integrated home system ») même si l'on rencontre aujourd'hui plusieurs définitions grand public identiques décrivant ces intégrations de systèmes électroniques : systèmes domotiques, systèmes domotiques intégrés, maisons intelligentes (« smart house », « smart-home »), etc. Toutes les approches dans le domaine des systèmes domotiques intégrés permettent aux différents appareils électroniques du consommateur de communiquer de sorte qu'ils puissent coopérer et former un système plutôt que de fonctionner de manière indépendante [Coop96].

Le concept de « *système intégré pour la réhabilitation* » (« rehabilitation integrated system ») se rapporte aux dispositifs d'assistance destinés à la réhabilitation des individus handicapés, habituellement électroniques et caractérisés par une ergonomie adaptée facilitant l'accès [Cherr96]. L'intégration des technologies améliore ainsi la vie sociale des personnes handicapées.

La « domotique » est l'ensemble des technologies de l'électronique, de l'informatique et des télécommunications qui sont utilisées dans les domiciles afin d'intégrer, dans un tout cohérent, différents systèmes assurant des fonctions de sécurité, de confort, de gestion d'énergie, de communication, de divertissement, d'éducation, etc.

L'« immotique » est le terme utilisé pour les systèmes domotiques implantés dans un immeuble.

Le terme « *maison automatisée* » (« automated house ») a la même signification que le terme « *domotique* » issu du latin (« domotic ») [Lore04], et se rapporte, en anglais, à la définition de « *maison intelligente* » (smart home) [Alle96]. Si les termes « maison », « ménage », « logement » sont synonymes, c'est généralement le terme « logement » qui est le plus souvent utilisé pour désigner les demeures. Le terme « maison intelligente » se rapporte ainsi à l'environnement de vie, ou de travail, soigneusement construits et instrumentés pour aider les personnes à exécuter leurs activités quotidiennes, et améliorer leur qualité de vie en exploitant divers systèmes techniques assistifs.

I.3 La situation nationale

I.3.1 L'offre de service des grands opérateurs

Les grands opérateurs, en France, déjà fournisseurs d'énergie et de communication prennent progressivement conscience de leur rôle possible dans la structuration d'une

offre domotique. Ils restent toutefois sur une conception de l'habitat intelligent vu comme un ensemble de services *supplémentaires offerts aux usagers*.

EDF a mis en place un bouquet de services en matière d'habitat communicant. Pour l'heure, les domaines d'application se limitent à la sécurité (télésurveillance), aux économies d'énergie (électricité, énergies fossiles, eau).

L'opérateur français « France Telecom » a lancé en novembre 2004 « MaLigne Visio » qui propose un service de visiophonie permettant de recevoir l'image de son correspondant sur un téléphone fixe. La personne voit ses correspondants tout en ayant une conversation téléphonique traditionnelle. « MaLigne Visio » peut donc contribuer au maintien à domicile des personnes âgées, handicapées ou dépendantes. Les services médico-sociaux peuvent ainsi mieux évaluer les besoins de la personne et converser avec elle, plus confortablement et plus efficacement [Ftel07].

En France, on compte en 2005 environ 800 000 personnes atteintes de la démence de type Alzheimer, dont les trois-quarts vivant à domicile [Rama]. Près de 60% des personnes malades feraient des fugues ou seraient victimes d'absences qui ont de grandes chances d'être fatales si le sujet n'est pas retrouvé rapidement [Gurl]. Les technologies ont dans ce contexte un rôle majeur pour améliorer le mode de vie de ces personnes d'un point de vue sécuritaire, médical et social. « France Telecom » a lancé un bracelet anti-alzheimer en juin 2005. La société canadienne « Médical Intelligence », en collaboration avec la société « Medimep » et l'opérateur français a créé un système de sécurité, basé sur les technologies de la téléphonie mobile pour localiser un individu, grâce à un bracelet téléphone, le « Columba ». Equipé d'un système GPS, d'un émetteur-récepteur GSM/GPRS et d'une carte SIM, il peut à la fois localiser la personne et servir de téléphone mains-libres pour communiquer directement avec le porteur. Ce dispositif alerte les secours dès que la personne sort d'une zone de sécurité préalablement définie par elle-même et son entourage. Dans le cas d'une fugue, un centre médical ou un centre de secours, voire la famille du patient, peut être prévenu.

I.3.2 L'offre sécuritaire

L'offre sécuritaire des biens et des personnes s'est développée comme une fonction spécifique que l'on vient intégrer dans l'habitat sans que cette fonction n'ait été prévue au stade de la conception de cet habitat. Elle est installée par des opérateurs locaux spécialisés ou simplement par les occupants de l'habitation qui achètent le système en kit et l'installent eux-mêmes. L'offre de base est par exemple celle proposée par la société française « Comod'Alarm » [Como07] qui propose une protection de la famille et des biens. Pour la téléassistance familiale, elle offre, grâce à un transmetteur connecté à un téléphone fixe ou portable, la possibilité de dialoguer avec l'appelant qui peut être une personne âgée. Elle permet la mise en relation vers un central de téléassistance par un bouton d'appel de soins avec la possibilité de transmission numériques des appels téléphoniques. Cette société offre un service de surveillance des enfants, « Angelcare », surveillant la respiration des nourrissons avec un système placé sous le matelas ainsi que l'éloignement imminent d'un enfant. Pour la protection des biens, l'offre est basée sur un système de capteurs de détection de mouvements infrarouge et de capteurs de détection de substance diverse (pour la détection d'intrusion, de vol, de fumée, de gaz) à installer soi-même. Il faut distinguer

ici les systèmes anti-vol, des systèmes visant l'intégrité des personnes. Dans ce deuxième cas, il existe depuis peu une offre basée sur l'inactivité suspecte [Acce]. La société de téléalarme en question propose la sécurité des biens (détection d'intrusion, de vol, fuite d'eau, détection de fumée) et la sécurité des personnes âgées basée à la fois sur l'appel de détresse par bouton et sur la surveillance de l'immobilité de la personne, en répartissant dans le logement des capteurs de mouvement situés dans l'entrée, les couloirs menant aux toilettes, la chambre, la cuisine ainsi que dans la salle à manger. La téléalarme prévient automatiquement la personne chargée de la télésurveillance et la met directement en liaison phonique avec l'habitation (micro et haut-parleur), dans le cas où la personne ne circulerait pas dans ces lieux au moins une fois, dans un laps de temps défini à l'avance (exemple de programmation pour 4, 8 ou 12 heures). Au-delà du bouton d'appel de détresse et de l'immobilité suspecte, il n'existe pas d'autres offres structurées... Pourtant il existe un vrai marché où les besoins se font de plus en plus pressants notamment pour les services à la personne, particulièrement pour les personnes âgées dont on évalue la population en France métropolitaine selon les sources de l'INSEE [Inse07] en 2005 à 22,5 % pour la tranche des 55 à 64 ans, à 16,3 % la tranche des 65 à 74 ans et à 8 % les plus de 75 ans par rapport à la population totale. Le niveau de vie des personnes âgées en France a progressé : le pouvoir d'achat moyen d'un retraité est similaire à celui d'une personne active, alors qu'en 1970, un quart des personnes âgées vivait en dessous du seuil de pauvreté [Cour05].

I.4 La situation dans le monde : les maisons intelligentes

Plusieurs habitats intelligents ont été imaginés dans le monde pour explorer et valider les nombreuses propositions techniques visant deux objectifs majeurs. Un premier objectif est d'optimiser le confort, le bien être et la qualité de vie de ses habitants et dans ce cas, la maison et/ou ses différents appareils électroménagers sont équipés de capteurs et d'actionneurs. Au-delà des objectifs de confort, des loisirs et de surveillance technique, un second objectif est de veiller sur les personnes ayant des handicaps moteurs, visuels auditifs ou cognitifs ainsi que sur les personnes âgées, dans le cadre du maintien à domicile [Tang00][Stau91][Yerr93][Broo97][Chan08]. Dans ce cas, les dispositifs intégrés à la maison ont parfois des fonctionnalités de surveillance biomédicales. Tous ces dispositifs sont reliés en réseau à un serveur central qui collecte et traite les données afin de fournir, d'une part, des diagnostics de situations et coordonner les procédures d'assistance et d'intervention, et commander, d'autre part, les différents dispositifs assistifs, appareils domestiques et appareils de régulation du confort. Nous proposons ici de lister les principales expérimentations conduites à travers le monde et les méthodes utilisées pour atteindre ces objectifs communs.

I.4.1 Aux Etats-Unis

Dans le Colorado à Boulder, une « maison adaptative » a été développée pour contrôler automatiquement la température, le chauffage et l'éclairage. Le système intègre la présence des occupants pour d'une part, éviter la programmation préalable par ses locataires, et d'autre part, assurer une certaine économie des ressources énergétiques basée sur l'observation des habitudes de vie et des désirs de ses habitants. Le

système, nommé « ACHE », surveille l'environnement, observe les actions prises par les résidents sur les lumières et les thermostats, puis construit un modèle permettant la prédiction de ses actions, en utilisant l'apprentissage par renforcement sur la base de réseaux neuronaux [Moze98].

Le projet « MavHome » à l'Université d'Arlington propose une maison agissant comme un agent rationnel cherchant à maximiser le confort de ses habitants tout en réduisant les coûts de fonctionnement. Pour atteindre ses buts, l'agent prédit les habitudes de mobilité de ses habitants et les usages des appareils ménagers. Des approches basées sur la théorie de l'information sont utilisées pour construire un modèle précis de l'environnement, dont notamment la méthode nommée « LeZi » qui exploite les séquences de mouvements des personnes et l'utilisation des appareils dans la maison pour déterminer la probabilité du prochain déplacement en fonction observations. Le projet « MavHome » combine les technologies des multimédia, intelligence artificielle, informatique mobile et robotique [Das02].

L'université de Floride propose la « Maison de Matilda » qui comporte un système de localisation des habitants basé sur les ultrasons. L'objectif du projet est d'optimiser le confort en contrôlant l'environnement en fonction des habitudes de mobilité des usagers. Expérimenté en laboratoire, le système de localisation est composé de pilotes ultrasons (receivers), installés aux quatre coins de la pièce surveillée, et de deux balises (beacon) légères (transmitters), placées sur les épaules de la personne. Un calcul précis de l'emplacement de la personne dans la pièce est alors effectué par triangulation [Hela03].

La même équipe propose un projet de 2^{ème} génération de maison intelligente nommé « Gator Tech Smart House » qui comporte un grand nombre d'équipements « intelligents » : boîte aux lettres, porte d'entrée, lit, salle de bain, miroirs (utilisés comme pense bête), plancher sensitif, etc. Le système de localisation est identique et tous les dispositifs sont couplés à des capteurs et des actionneurs reliés à une plateforme opérationnelle optimisant le confort et la sécurité des personnes âgées à domicile [Hela05].

Le projet de maison intelligente de l'Université du Massachusetts au laboratoire des systèmes multi-agent d'Amherst se base sur un ensemble d'agents de contrôle autonomes déployés dans un environnement domotique intelligent simulé. L'objectif est d'automatiser certaines tâches effectuées par les occupants afin d'améliorer l'efficacité et la qualité de la tâche. Quatre pièces (chambre à coucher, séjour, salle de bains et cuisine, juxtaposées à un vestibule commun) sont supervisées par les agents intelligents contrôlant l'environnement comme le chauffe-eau, la cafetière, le climatiseur, le lave-vaisselle, l'aspirateur, etc.

Un robot est également couplé au système pour transporter des objets d'un emplacement à un autre. Le principe de fonctionnement est le suivant : les agents agissent selon leurs tâches assignées et sélectionnent les buts en fonction des souhaits des résidents et des ressources disponibles. Le framework, développé spécifiquement, permet de représenter et de quantifier les ressources, les interactions entre ressources, les interactions entre tâches ainsi que les performances de chaque action. A toutes actions (primitives) sont associées des distributions de probabilité sur la durée, la qualité et le coût de l'action. Les agents interagissent et se coordonnent en fonction des ressources partagées (par exemple le lave-vaisselle et le chauffe-eau partagent simultanément l'énergie électrique, etc.). L'agent peut ainsi raisonner et trouver le bon compromis

entre plusieurs plans d'actions possibles tout en s'adaptant aux évolutions de l'environnement [Less99].

Les chercheurs du laboratoire « Aware Home Research » de l'Institut de Technologie de Géorgie ont élaboré, dans une maison de 3 étages, un laboratoire interdisciplinaire « in situ » pour concevoir, développer et évaluer les technologies domotiques futures. L'objectif majeur est d'aider et de maintenir les personnes âgées dans leur environnement familial, non seulement pour améliorer leur qualité de vie mais également pour allonger leur durée de vie. Les interactions entre la personne et l'habitat sont modélisées par des techniques d'apprentissages basées sur les chaînes de Markov cachées et les réseaux de neurones. Le système exploite des tapis intelligents pour la localisation et l'analyse du pas, et localise les objets couramment égarés (lunettes, montre, télécommandes, etc.) qui sont équipés d'un « tag » muni d'un dispositif radio à faible portée. Le système peut en effet guider l'utilisateur vers l'objet perdu par des répliques sonores. Les bornes interactives LCD placées dans des endroits stratégiques de la maison permettent à l'occupant d'interagir avec le système [Kidd99].

Le projet « EasyLiving » de Microsoft propose un système de suivi des résidents exploitant l'analyse d'images vidéo couplée à des détecteurs de mouvements placés dans les murs, un plancher sensible ainsi qu'un système de badge actif pour l'authentification des personnes. L'ensemble des traitements, basé sur l'analyse de contexte (« context aware computing »), fournit une précision de localisation des différentes entités (individus, meubles, objets, etc.) inférieure au mètre. L'objectif principal est de concevoir une architecture capable d'intégrer différents dispositifs dans une modélisation cohérente de l'environnement afin d'assurer une gestion automatique du confort, sans intervention humaine, comme par exemple le déclenchement de la lumière lorsque l'occupant se déplace la nuit [Krum00][Brum02].

Le laboratoire « House_n » du MIT propose le projet de « la maison du futur » dont le but est d'équiper une maison intelligente afin d'entreprendre des études qualitatives et quantitatives sur les relations entre l'environnement, les comportements des individus et les technologies de l'information. L'objectif est d'identifier et de proposer de nouveaux services [Tapi04]. Les capteurs sont installés sur des meubles et sur des appareils domestiques (lave-vaisselle, machine à laver, dispositifs dans la salle de bains, etc.). Le principe est basé sur trois types de traitements : la collecte des changements d'états des capteurs, l'enregistrement par l'utilisateur de ses propres activités en utilisant l'interface MSE et la construction de modèles, basés sur les réseaux bayésiens, permettant de prédire les activités de l'utilisateur. Au démarrage de l'étude, les sujets disposent d'un PDA doté de l'interface MSE pour saisir leurs activités. Les principaux problèmes rencontrés dans cette étude ont concerné : la qualité et le nombre d'échantillons d'activités car plus d'un mois de collecte sont nécessaires, l'interprétation des images vidéo et la sensibilité des capteurs [Inti02] [Tapi04].

Le projet « Aging in Place » à l'Université du Missouri est un nouveau système de soins à long terme des personnes âgées, proposant des services de santé adaptés dans l'environnement de leur choix. Le projet est composé de deux entités complémentaires : « Senior Care » et « TigerPlace ». « Senior Care » a été conçu pour allier la communauté des services de santé et les personnes âgées vivant dans des logements (notamment les logements « TigerPlace »), ou résidences, publiques et privées dans le comté de Boone - Missouri.

Le projet dont le but est d'améliorer la qualité de vie des personnes âgées dans leur environnement de vie cadre : la recherche interdisciplinaire, des programmes

d'enseignement innovateurs pour les étudiants et un environnement adapté à l'intégration des services de soins [Rant05]. Le projet de « TigerPlace » exploite un réseau de capteurs sans fil pour mesurer les déplacements du sujet, peser la personne par l'intermédiaire de tapis instrumentés, et analyser plusieurs signes vitaux. Le système évalue les risques en fonction du déclin observé et transmet une alarme vers les services de santé. L'« American Corporation » de Sikeston, en collaboration avec l'Université Sinclair dans le Missouri (UM), ont mis en place plusieurs logements « TigerPlace » dans une communauté de personnes âgées située à quelques kilomètres du campus de la UM en 2004.

Le système « Elite Care », à Portland - Orégon, est un ensemble de technologies d'assistance des personnes âgées, souffrantes ou atteintes de la maladie d'Alzheimer [Elit07]. L'objectif est de prolonger l'indépendance des personnes âgées et de permettre au personnel médical d'identifier les problèmes de santé des résidents au plus tôt. C'est un système non invasif détectant les périodes de sommeil à partir de capteurs de pression piézoélectriques connectés à Internet, indiquant les changements d'état physique. Le système détecte ainsi l'heure du coucher du résident, l'heure du lever ainsi que les changements de posture [Adam03].

1.4.2 En Asie

En Asie, une quinzaine de maisons intelligentes sont en cours de développement. L'objectif majeur, pour la plupart, est de maintenir des personnes âgées à domicile en leur créant un environnement adapté et confortable tout en exploitant des technologies assistives.

Le projet de Togawa, « Welfare Techno-House » a pour objectif d'étudier les habitudes des personnes âgées afin de surveiller les activités physiques et physiologiques relatifs à leur santé. Pour étudier les activités des individus, le logement est équipé de dispositifs spécialisés dans la salle d'eau assurant différentes fonctions physiologiques (ECG, température, etc.), de capteurs infrarouges dans les chambres et de capteurs magnétiques sur les portes. Le système de surveillance permet une analyse du comportement mental et physique du sujet dont les résultats obtenus sur plusieurs semaines d'expérimentation sont présentés dans les publications [Yama98][Tamu98].

La maison intelligente d'Osaka, issue du projet de Matsuoka, détecte automatiquement les événements inhabituels causés par certaines pathologies ou accidents. Elle est équipée de 167 capteurs et de 17 appareils électroménagers instrumentés (réfrigérateur, télévision, cuiseur, climatiseur, etc.). Les différentes activités de la personne sont déterminées en fonction des spécificités des capteurs et des informations telles les activités de lever, coucher, préparation des repas, toilette, douche et de bureau, etc. Les résultats de l'étude montre que pour une famille de quatre personnes observées durant une année, le système a détecté 73 situations anormales dont 19 étaient réelles [Mats04].

En Corée, le projet « Intelligent Sweet Home » propose une maison intelligente dédiée aux personnes âgées et handicapées incluant notamment un lit *robotisé intelligent* équipé d'une *main intelligente*, un fauteuil roulant motorisé ainsi qu'un élévateur intelligent permettant de déplacer la personne entre le lit et le fauteuil roulant. Le but est d'assister la personne dans sa mobilité : aller au lit, s'asseoir dans le fauteuil, tendre un livre ou un journal, le remettre dans l'étagère, etc. Des interfaces homme

machine spécifiques ont été conçues pour contrôler automatiquement l'ensemble des dispositifs électromécaniques [Park03][Park07].

Deux universités Coréennes ont développé une maison intelligente capable de détecter les différentes modes de vie du résidant dans le but d'anticiper les besoins du résidant et offrir un service domotique approprié. Le système exploite des détecteurs pyroélectrique pour localiser la personne et une expérimentation a été menée dans une chambre mesurant 4 x 4 x 2,5 mètres instrumentée par 12 capteurs placés dans les plafonds. Une évaluation des performances à travers une expérimentation a été faite et a conclu au développement d'un algorithme de suivi-multiples capable de reconnaître les trajectoires des résidants, lorsqu'ils se trouvent dans la même pièce [Ha06].

Les laboratoires « NTT Multimedia Communications Laboratories » au Japon ont développé un système capable de modéliser et d'identifier le comportement des personnes sur la base de capteurs et de tags RFID (« Radio Frequency Identification-tagged »). Il propose un système d'identification des activités de l'utilisateur basé sur une description des séquences d'états définissant le contexte de l'utilisateur. Le contexte considère les relations spatio-temporelles entre l'utilisateur et les objets de son environnement. Le système a été mis en oeuvre dans une maison expérimentale où divers capteurs et dispositifs RFID ont été installés. Un arbre de décision est construit par un algorithme exploitant les changements d'états des capteurs et des tags RFID. Le contexte de l'utilisateur est obtenu par comparaison entre la série d'événements observée et le modèle de référence. Après l'évaluation des performances du système, les auteurs ont conclu que leur système est adapté à la reconnaissance spatio-temporelle du contexte de l'utilisateur [Isod04].

Le projet « Ubiquitous Home » a pour but d'aider le résidant en adaptant les technologies et les interfaces homme-machine à ses besoins. C'est un véritable espace de vie où le système d'information et les technologies de communication domotiques facilitent la création de nouveaux services dans la maison par l'intégration de dispositifs, de capteurs et d'appareils connectés en réseaux [Yama06]. Un appartement destiné à accueillir une famille comportant une salle de séjour, une salle à manger, une cuisine, des chambres, des toilettes et une salle de bain, est connecté à un centre opérateur distant. Le logement est équipé de caméras et de microphones discrets dédiés à la surveillance des activités humaines. Le sol est muni de capteurs de pression pour suivre les déplacements des résidants et connaître l'emplacement des meubles. Deux systèmes RFID, l'un actif et l'autre passif, sont utilisés pour identifier les personnes. Le système passif, placé dans les murs de chaque pièce, détecte les tags que les occupants portent lorsqu'ils passent dans les entrées. De plus, un tag RFID est fixé sur chaque objet que le résidant peut déplacer dans la maison. Quatre accéléromètres couplés à des capteurs de vibration sont placés dans les quatre coins de la chambre à coucher pour détecter le 'comportement' humain. Un écran plasma, des interfaces LCD et des haut-parleurs permettent aux résidants de suivre les programmes audiovisuels. Des robots omniprésents sont utilisés pour assurer des services domotiques agissant en tant qu'intermédiaire entre les résidants et le système. Les services offerts sont des recommandations de programmes télévisés, des recettes affichées dans la cuisine ainsi que différents services de renseignements. Leur objectif est de construire dans un futur proche la ville la plus ambitieuse qui sera une nouvelle génération d'environnement intellectuel et hospitalier pour les enfants, les personnes âgées et les handicapées. Le système a également été enrichi d'une fonction de surveillance du sommeil basé sur l'analyse des signes vitaux (respiration, rythme cardiaque, ronfle-

ment et mouvement du corps) au travers d'un matelas instrumenté et connecté par une liaison série à un PC. Pour les auteurs du projet, le principal problème concerne la vie privée des résidants qui est entièrement transparente au travers des caméras et microphones omniprésents dans la maison [Ando04].

A Ibaraki au Japon, un environnement intelligent « SELF » (Sensorized Environment for LiFe) a été développé. Le but est de surveiller la santé de la personne, en analysant plusieurs critères physiologiques, et de lui communiquer les différents diagnostics par des représentations visuelle et numérique. Le statut physiologique de la personne est obtenu à partir d'un modèle de chambre nommé « SELF » traitant les données issues de capteurs de pression sous le lit, de microphones dans le plafond et d'un lavabo avec affichage LCD. Le service de soins est basé sur un modèle humain des évolutions de plusieurs paramètres physiologiques : posture, mouvement du corps, respiration, taux d'oxygène dans le sang, pression pulmonaire et apnée. « SELF » enregistre et analyse les données physiologiques, puis fournit un bilan quotidien des activités physiologiques de la personne [Nish00].

A l'Université de Tokyo, une chambre a été instrumentée afin d'apprendre et étudier l'évolution des actions humaines. C'est un système adapté aux modes de vie des personnes à domicile, destiné à l'analyse de leur comportement. Le système comporte plusieurs dispositifs et commutateurs placés sur les tables, chaises, lit, congélateur, réfrigérateur, micro-onde, grille-pain, fenêtres et tiroirs. Un algorithme spécifique a été développé permettant d'identifier les changements significatifs à partir d'une segmentation des données, et de reconnaître les relations d'implication entre les différents contextes à partir des segments labellisés. Il quantifie les données accumulées et peut donc reconnaître les changements significatifs des situations [Nogu02].

I.4.3 En Europe

En Europe, on trouve également un grand nombre de projets de maisons intelligentes dédiées d'une part à la gestion du confort et d'autre part, au maintien à domicile des personnes âgées. Le projet de Gloucester, en partenariat avec « Housing 21 », « Bath Institut of Medical engineering » et « Dementia Voice » est destiné à aider les sujets souffrant de démence dont notamment la maladie d'Alzheimer. Des dispositifs d'assistance ont été conçus spécifiquement pour améliorer la qualité de vie de ces personnes. La plupart des équipements des maisons sont équipés de capteurs pour notamment réguler l'environnement intérieur, la température du bain, etc. [Orpw01].

Le système « CarerNet », ou « l'hôpital à la maison », a été conçu au Royaume-Uni dans le but d'offrir plusieurs services de santé à domicile tels que l'alarme d'urgence à la maison, la prise en compte des services de soins et la surveillance de la déambulation. C'est une architecture de système générique qui favorise l'intégration des dispositifs matériels et des services de surveillance à domicile. « CarerNet » distingue la couche capteurs exploitant un bus de communication spécifique, le système de surveillance intelligent et l'unité de contrôle des dispositifs thérapeutiques. Les fonctionnalités sensorielles du système « CarerNet » sont basées : sur l'ECG, la pression sanguine, la température du corps, le rythme respiratoire (pour les critères physiologiques), sur des détecteurs de mouvements, accéléromètres, badges d'identification (pour l'analyse des habitudes de vie), et sur la température intérieure,

la détection de fumée et l'enregistrement sonore (pour la surveillance de l'environnement). Les réseaux communicants avec l'environnement du client local sont le « HomeLAN » et le « Body Area Network ». L'intelligence est répartie dans les capteurs intelligents, les dispositifs thérapeutiques, les unités de traitements locales et l'archivage des soins de santé de la personne. L'étude a été effectuée en considérant le cas d'un individu qui avait subi une opération sur le cerveau après une rupture d'anévrisme dans l'hémisphère gauche et qui était surveillé par un prototype spécifique de « CarerNet » dans sa maison [Will98].

La « maison de l'an 2000 » a été développée durant cette collaboration pour aider les personnes âgées à vivre dans leur domicile. L'objectif principal est de développer un système sophistiqué adapté à la surveillance des activités des usagers pour détecter les incidents domestiques. La « maison de l'an 2000 » est basée sur l'analyse des habitudes de vie des personnes âgées dans le but d'identifier et d'intégrer les besoins des personnes indépendantes. L'infrastructure technique inclut des capteurs infrarouges passifs sur les murs pour détecter les mouvements, des capteurs de pression sous les pieds de chaises et du lit pour y détecter la présence, et des contacteurs magnétiques sur les portes et les fenêtres pour détecter d'éventuelles intrusions. Le système inclut des temporisateurs réglables pour signaler la prise de médicaments et des capteurs de température pour veiller à ce que la température ambiante ne soit pas dangereuse pour la santé de la personne. Le système gère la télévision, les haut-parleurs et le téléphone pour pouvoir, d'une part, interagir avec l'utilisateur, et d'autre part, améliorer le travail social [Barn98].

La maison d'Eindhoven est équipée d'un système de surveillance des personnes et de technologies assistives. Des détecteurs de mouvements mesurent l'activité de l'individu et signalent toute inactivité suspecte et toute intrusion. Un système d'appel par un bouton complète également la fonction sécuritaire et des actuateurs électroniques ont été conçus pour contrôler l'éclairage, le chauffage et les appareils de cuisine [Verm97][Harr00].

Le projet « ENABLE » étudie l'impact des technologies d'assistance sur la qualité de vie des personnes souffrant de démence douce et modérée. Dans le cadre du projet, environ dix dispositifs ont été installés en appartement dont deux ont été spécifiquement conçus pour accroître l'autonomie des personnes dans leur maison [Hage01][Adla04].

A Tønsberg en Norvège, la maison appelée « SmartBo » (« Bo » signifiant nid en suédois), dotée de deux chambres, a été construite spécifiquement pour les personnes âgées. « SmartBo » est une maison high-tech gérant le confort en température. Les éléments principaux de la maison sont contrôlés automatiquement (éclairage, porte, fenêtres, volets, etc.) et un mécanisme d'alarme est inclus pour signaler une situation inconfortable ou un dysfonctionnement [Elge98][Deaf07].

L'expérimentation HIS de Grenoble consiste en un appartement équipé de capteurs infrarouges (pour la mesure de l'activité), de capteurs de poids et de capteurs de signes vitaux (pour mesurer l'état de santé), le tout relié en réseau à un serveur pour le traitement des données et la délivrance d'une alarme en cas de danger. L'état de santé général du patient est diagnostiqué automatiquement par l'analyse des critères physiologiques. L'agitation et la mobilité quotidiennes sont des indicateurs de la fréquence des déplacements qui caractérisent le profil de la personne. Les différentes techniques de calculs utilisées ont été validées par simulation [Viro02][Lebe06]. Le laboratoire TIMC-IMAG CNRS [Timc] a également été amené à identifier tous les

acteurs des services de soins tels que présenté figure 3 où les différents corps de métier des domaines médical, social, administratif, technique et familial coopèrent pour veiller à la santé et au bien être de la personne qui reste au cœur des préoccupations. Une plateforme d'évaluation, « AILISA », des technologies de télésurveillance médicale et d'assistance en gérontologie a ainsi été élaborée [Nour05].

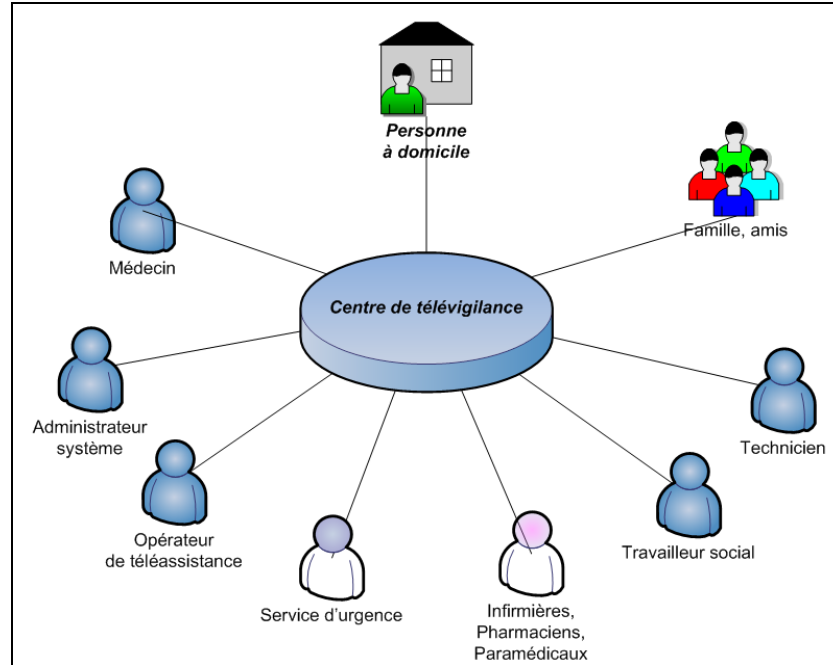


Figure 3 : Acteurs du réseau de soins.

En Espagne, une plate-forme de soin à domicile basée sur le multimédia a été développée pour aider les patients atteints de pathologies spécifiques à vivre dans leur maison. La plate-forme multimédia gère plusieurs services numériques intégrés, dont la vidéo via Internet pour la vidéoconférence (normes H.320 et H.323), et le poste de télévision pour l'interaction avec le patient. La plate-forme est composée de deux parties. La première est l'unité de traitement située dans la maison qui traite les données et la vidéoconférence (un PC est placé derrière la télévision pour intégrer l'environnement audiovisuel de la maison, incorporant des périphériques USB et RS232) et l'enregistrement de signes vitaux (tension artérielle, température, ECG). Toutes les données sont transférées au PC par une liaison série. La seconde partie est un cabinet médical composé d'un centre d'appel, de plusieurs stations médicales de travail, d'un système de gestion des données. De nombreuses fonctionnalités sont exécutées à partir des postes de travail du centre médical dont la prescription, la vidéoconférence, le contrôle des fonctions de surveillance et les fonctions de communication. La plate-forme multimédia a été testée avec des patients, des femmes enceintes et des étudiants [Guil02].

Un environnement domotique de santé nommée « TERVA » a été développé en Finlande pour surveiller simultanément plusieurs critères psycho-physiologiques exploitant des mesures physiologiques et les états comportementaux (informations sur l'humeur et les émotions, la consommation de tabac, alcool, café et thé) lorsque le patient est à l'extérieur de l'hôpital pendant de longues périodes. Le système inclut un ordinateur portable pour contrôler « TERVA » et paramétrer les différents modules de mesure. Les données des différents dispositifs de mesure sont rassemblées par

l'intermédiaire d'un port série (RS232). Le système inclut les fonctionnalités de surveillance de santé (tension artérielle, rythme cardiaque, température, activité, poids, couché) [Korh98]. L'équipe de recherche de TERVA a exploré les rythmes journaliers et hebdomadaires de 14 critères de santé enregistrés pendant deux mois. L'élaboration des statistiques applique successivement un filtrage des données, un calcul des dérivées des variables, puis un ré-échantillonnage temporel pour pouvoir comparer les variables enregistrées à des cadences différentes (tels que le rythme cardiaque et le poids corporel) [Tuom06].

La maison intelligente de « British Telecom » et « Anchor Trust » en Angleterre, surveille à distance l'activité de la personne. Elle comporte des capteurs infrarouges et des capteurs de contacts magnétiques sur les portes d'entrée ainsi que sur la porte du réfrigérateur. Un capteur de température est également placé dans l'environnement de vie pour surveiller la température ambiante. Basé sur l'étude du style de vie, le système déclenche une alarme lorsqu'une situation anormale est détectée [Barn98].

Le projet « GERHOME », initié par le CSTB de Nice, a pour but de concevoir, d'expérimenter et de certifier des solutions techniques supportant des services d'aide au maintien à domicile des personnes âgées. Le laboratoire aménagé comme un appartement de deux pièces est équipé de capteurs permettant de déduire les activités de l'occupant (contacts magnétiques sur les portes, fenêtres, placards, capteurs de température, de consommation d'eau, interrupteurs, systèmes vidéos) afin de détecter tout risque domestique (débordement, fuite, chute) [Gerh].

Le projet européen « Handicom », issu de l'initiative AAL-119 (« Ambient Assistive Living ») du traité européen, élabore une infrastructure ouverte de services dont l'objectif est d'améliorer la qualité de vie des personnes âgées et handicapées dans le monde. Considérant la clé de la réussite par l'intégration des besoins spécifiques de chaque personne, le principe est de concevoir l'ensemble des services appropriés, quelque soit l'environnement et le contexte dans lequel se trouve la personne : ce qui inclus non seulement l'environnement de vie « Indoor » et l'environnement extérieur (« Outdoor »). Le projet « Global Village Initiative » s'appuie ainsi sur les capacités des technologies intelligentes au travers d'un programme de recherche international faisant collaborer, la recherche, les industries et les acteurs sociaux. Ce projet de grande envergure a pour but d'aboutir, sur la base des innovations de la recherche, à un déploiement et une offre commerciale soutenue par une action internationale [Handic].

Le projet « PROSAFE » à Toulouse a été développé pour la surveillance continue des personnes âgées à domicile. L'objectif est d'assurer le maintien des personnes âgées autonomes dans leur logement et d'envoyer automatiquement, sans intervention humaine, un signal d'alarme en cas d'urgence [Chan03][Chan99][Pros03]. Le système est composé de capteurs de mouvements (infrarouge passif), interfacés à une unité de calcul. Plusieurs chambres en Institution et à domicile ont été instrumentées. Une unité de calcul placée à l'extérieur de la chambre ou de l'appartement permet d'évaluer la mobilité et plusieurs critères d'activités de la personne. Une première étude consistait à établir des modèles d'habitudes de présence et d'absence des personnes en utilisant des techniques d'apprentissage basées sur les réseaux de neurones [Chan95] et les statistiques. Des travaux de validation ont été menés sur plusieurs mois sur sites habités pour corréliser les diagnostics automatisés et les comportements du patient. La surveillance s'effectue essentiellement de nuit et mettait en évidence

les habitudes de : lever, coucher, sortie, douche, etc. Les résultats statistiques traitaient la mobilité, l'immobilité et l'agitation au lit [62-63]. Une étude dédiée à la classification des trajectoires de position a été menée pour pouvoir identifier les déambulations habituelles et inhabituelles [Chan04].

Le système « ERGDOM » est un gestionnaire auto-adaptatif pour la régulation du confort d'hiver dans l'habitat et la réduction de la consommation énergétique. Un réseau de capteurs de présence infrarouges distribués permet au système de connaître les habitudes de présence de l'occupant dans chaque pièce. Des bornes de commandes du système sont placées dans des endroits stratégiques de l'appartement permettant notamment à l'occupant d'augmenter ou diminuer la puissance des convecteurs. Le concept ERGDOM se base sur l'exploitation des techniques d'apprentissage pour prendre en considération les habitudes de présence des occupants, leurs préférences en matière de confort et la réaction thermique de l'habitat pour prédire l'ambiance et anticiper la présence des personnes à leur domicile [Camp03a].

I.4.4 En Australie

Le projet de B. Celler propose un système de suivi des individus à domicile grâce aux mesures des interactions entre l'occupant et les différents dispositifs de la maison. La maison est instrumentée de capteurs infrarouges, capteurs de pression, capteurs de luminosité, capteurs de température, capteurs sonore et de capteurs de consommation électrique. Des données sont transmises par un module de transmission, « Echelon LonWorks PLT-10 », par ligne électrique dont les signes physiologiques (ECG, pouls, oxymétrie, pression artérielle, température et glucose dans le sang) [Cell94][Cell95].

Une autre équipe étudie l'anxiété comme indicateur d'anormalité dans la maison, en analysant un profil d'activité. Les résultats sont présentés sous forme de scénarios d'utilisation de la cuisine pour une formulation de l'anxiété basée sur l'interaction de l'occupant avec les équipements : par exemple, moins il utilise sa cuisinière, plus il est anxieux [Weib51]. L'activité spatiale a été étudiée comme modèle chimiotactique, inspiré d'un modèle biologique dédié au traitement des données très bruitées [Ried05].

I.4.5 En Nouvelle- Zélande

Un environnement domotique intelligent a été construit pour apprendre les habitudes des usagers afin d'établir des décisions adaptées au comportement de la personne.

Le système surveille l'état de santé par des mesures quotidiennes des signes vitaux tels que la tension artérielle systolique et diastolique, la pression artérielle moyenne, l'arythmie cardiaque, les voix respiratoires, le sucre de sang, le poids, la température et taux de cholestérol. Le système peut également compléter les informations manquantes. Les données sont classifiées, permettant au système d'évaluer l'écart d'une donnée observée par rapport aux évolutions courantes afin d'ajuster au mieux les seuils de détection. Le système exploite les habitudes régulières de l'utilisateur pour connaître l'évolution de leur santé et renforcer la véracité des décisions au fur et à mesure du temps et en fonction des changements de comportements. Le système peut

alors améliorer la prise de médicament de l'utilisateur tout en respectant les cadences nécessaires [Dieg05].

I.4.6 Synthèse

Cette large présentation des champs d'investigation établis dans le domaine de l'« Habitat Intelligent » est synthétisée figure 4 selon les aspects :

- utilisateurs, essentiellement les personnes âgées, handicapées et démentes,
- services, distingués par deux grandes catégories :
 - la sécurité des biens et des personnes (surveillance, services de soins, téléassistance, assistance thérapeutique, assistance médicale, etc.)
 - la gestion du confort, intégrant à la fois le confort d'usage (multimédia) et le confort sensoriel (régulation de l'ambiance, gestion énergétique, etc.)
- Pour les projets les plus avancés, ils sont intégrés à un centre de décision (services d'urgence, médical, social, administratif, d'aide à domicile, etc.),
- bases de données, centralisées ou réparties sur plusieurs organismes, stockant différents types d'informations sur la personne (données administratives, traitements thérapeutiques, activités, états physiologiques, etc.),
- fonctionnels, par la localisation et le suivi de trajectoires, l'authentification des personnes, l'identification et l'anticipation de situations (activités, gestes, etc.), diagnostics physiologiques, le contrôle/commande d'appareils domestiques ainsi que la communication des informations à un système secondaire ou à un service de plus haut niveau,
- Systèmes d'informations, destinés essentiellement à la modélisation des habitudes de vie des personnes, des évolutions de signes vitaux sur une base experte ou par apprentissage tel que présenté tableau 1,
- équipements, constitués essentiellement de détecteurs, d'actionneurs mais également de dispositifs assistifs conçus pour spécifiquement.

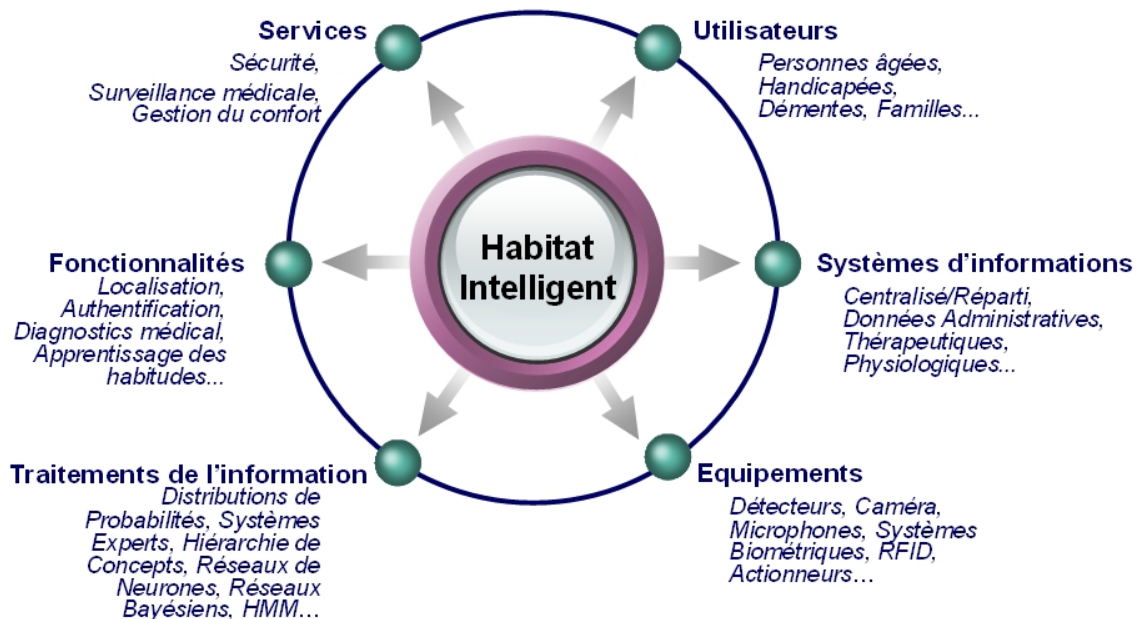


Figure 4 : Champs d'investigations de l'« Habitat Intelligent ».

Nous pouvons regrouper les différents types de systèmes selon le type de détecteurs exploités et des méthodes utilisées pour les traitements des données. Cette synthèse est présentée tableau 1.

| Auteurs | Description du système | Méthode |
|---|--|--|
| Chan [Chan95] [Pros03], Campo [Camp02] Mozer [Moze98] Das [Das02] | Détecteurs IF, Détecteurs Détecteurs | Réseaux de neurones Statistiques, seuils de détection d'activité Réseaux de neurones Modélisation et Suivi de mouvement Prédiction des actions de l'utilisateur Algorithme LeZi |
| Helal [Hela03][Hela05] | Détecteurs ultrasons Tapis instrumentés | Localisation précise Localisation |
| Krumm [Krum00] | Caméras vidéo, badges | Analyse d'image, statistiques, modèle de suivi des personnes |
| Intille, Tapia [Inti02][Tapi04] Mihailidis [Miha04] Matsuoka [Mats04] | Détecteurs Systèmes basés sur la vision Détecteurs, Caméras vidéo, | Analyse de contexte Visionique, Intelligence Artificielle Analyse statistiques activités par les séries temporelles |
| Isoda [Isod04] | Détecteurs, RFID, objets | Représentation spatio-temporelle de l'état de l'utilisateur, |
| Williams [Will98] Noury [Viro02][Lebe06] | Plancher sensitif Détecteurs Détecteurs IF, magnétique, contacteurs | Analyse de contexte Analyse simple de données Statistiques et Probabilités |
| Barnes [Barn98] | Détecteurs IF, magnétique, contacteurs | Statistiques, analyse des activités, Utilisation anormale des équipements |
| West [Weib51] | Détecteurs, contacteurs | Modèle statistique de l'anxiété |

Tableau 1 : Synthèse des méthodes appropriées aux traitements des données des capteurs.

Les méthodes exploitées pour les traitements de l'information, et notamment pour les techniques basées sur l'apprentissage artificiel, résultent de choix et de contraintes relatifs à la fonctionnalité, au service attendu et à l'information fournie par le dispositif. Le tableau 2, extrait de [Corn02], présente la qualité des différentes représentations des hypothèses en fonction des méthodes utilisées.

| Méthodes | Fonctions séparatrices | Distributions probabilités | Fonctions Etat - actions | Arbre de décision | Hierarchie de concept | Réseaux bayésiens | Chaines de Markov | Système de règles |
|-------------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Représentation | | | | | | | | |
| Concept | ✓ | ✓ | - | ✓ | ✓ | - | - | ✓ |
| Classes multiples | ✓ | ✓ | - | ✓ | ✓ | - | - | ✓ |
| Ontologies | - | - | - | ✓ | ✓ | - | - | ✓ |
| Régression | - | ✓ | ✓ | ✓ | - | - | - | ✓ |
| Evolution temporelle | - | ✓ | ✓ | - | - | - | ✓ | - |
| Apprentissage non supervisé | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | - | - | - |
| Données continues | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | - | - | ✓ | - |
| Connaissances relationnelles | - | - | ✓ | - | ✓ | ✓ | - | ✓ |
| Degré de certitude | - | ✓ | ✓ | - | - | ✓ | - | ✓ |
| Degré d'imprécision | - | ✓ | ✓ | - | - | ✓ | - | - |
| Transparence, intelligibilité | - | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | - | ✓ |

Tableau 2 : Synthèse des méthodes appropriées aux traitements des données des capteurs.

Les méthodes basées sur les distributions de probabilités, les fonctions état-transitions, les arbres de décision, les réseaux bayésiens et les systèmes de règles sont les méthodes les plus flexibles par leur large pouvoir d'expression. Le couplage de ces méthodes peut permettre d'optimiser le système en rendant le traitement des informations plus robuste.

I.5 Les grandes orientations de la recherche

Le développement de la Domotique tel que nous venons de le décrire apparaît plus comme une affaire d'adaptation de l'offre et de la demande technologique aux besoins sociétaux que d'une insuffisance des connaissances et d'une affaire de recherche. La réalité est toute autre, puisqu'il s'agit d'« apprivoiser le progrès technologique » et le mettre au service des aspirations intimes de l'individu... Dès 1987, le CNRS-SPI constituait une commission d'experts [Este87] « Habitat intelligent », pour mieux identifier les questions que pourrait poser la Domotique à la Recherche Scientifique et définir des priorités :

- Une première évidence était et reste la mise en place d'une infrastructure de communication intégrée à l'habitat. La programmation de la recherche européenne a appelé, à plusieurs reprises, à une standardisation des protocoles de communication [Inri]. Des propositions ont été étudiées mais sont restées sans suite immédiates par la volonté des grands candidats industriels à la Domotique de s'appuyer sur des protocoles de réseaux « propriétaires » pour garantir les développements de leur offre fonctionnelle. Au plan technique, il y a eu d'intéressantes évolutions, par exemple, sur la transmission d'information par courant porteur [Lin02][Inte] offrant à l'utilisateur un allègement des travaux sur l'infrastructure du bâtiment. Par ailleurs le développement du réseau téléphonique numérique et de l'Internet a amené une première solution aux télé-surveillances et téléopérations... Depuis, les propositions de réseaux locaux se sont multipliées et l'actualité est axée sur la communication « sans fil » et l'économie d'énergie. L'intérêt de nos réflexions dépend beaucoup du succès de ces activités de recherche où se succèdent innovations et mise en œuvre, sur des cycles de vie extrêmement courts...
- Une deuxième évidence est la faiblesse de l'instrumentation de mesure : le développement des nouveaux capteurs et les interprétations dans les réseaux d'échanges. Il existe une très grande diversité de paramètres physiques et biophysiques à mesurer avec des exigences fortes de précision et de fiabilité et avec des contraintes évidentes sur les coûts pour rester compatibles avec les diffusions qui intègre la domotique. Ici la Recherche doit résoudre deux problématiques bloquantes :
 - la maîtrise des mécanismes fondamentaux dans la mesure surtout chimique et biochimique indispensable à la surveillance de l'environnement : CO, CO₂, H₂O, CH₄, produits de combustion...
 - l'intégration de systèmes multifonctionnels : la mesure, le traitement du signal, le diagnostic local, la communication et l'autonomie énergétique.

Mais la grande question à résoudre pour la Recherche est apparue dans les années 80, sur l'interfaçage de ces progrès techniques avec les besoins vitaux de l'individu et

avec la société. C'est ainsi, que la communauté d'experts, commanditée par le CNRS-SPI, proposait comme axe prioritaire : l'organisation des soins à domicile. C'est sur cette base que nous avons au LAAS-CNRS orienté nos travaux sur la surveillance des personnes âgées à domicile [Chan99] et plus tard collaboré à des programmes nationaux tels que TISSAD [Nour01][Rial01][Thom01], PROSAFE sur la Télésurveillance [Chan03].

Dès cette époque, la complexité des problèmes avait été appréhendée, ne serait ce que par la multiplicité des acteurs et intervenants :

- Il y a tout d'abord, les patients eux-mêmes : malades, convalescents, personnes âgées ou handicapées, etc. qui ont à exprimer les besoins et à guider les choix. Nul doute qu'une bonne hypothèse de réflexion est qu'il y a des perspectives d'amélioration de la qualité des soins et du confort des patients à domicile. Nul doute aussi qu'il y a des risques de désadaptation de la technologie aux besoins qu'il convient d'identifier et d'exclure au plus tôt.
- Il y a ensuite l'environnement proche : la famille, les voisins et l'action bénévole, les organisations de terrain qui interviennent quotidiennement ainsi que les professionnels de santé : médecins et plateformes hospitalières, appelés pour réaliser et éventuellement mettre en œuvre les diagnostics. Ce sont des acteurs essentiels qui ont à exprimer des besoins complémentaires à ceux des patients pour pouvoir disposer de bonnes conditions de travail et développer une efficacité globale du système de soins.
- Il y a bien sûr tous les acteurs industriels, fournisseurs et tous les acteurs professionnels chargés de soins qui ont à construire, à diffuser et à maintenir des moyens bien adaptés aux besoins.
- Il y a enfin l'environnement non opérationnel qui incite, encourage, légifère, finance... et qui de fait, garantit le bon cap à long terme.

Cette analyse conduisait à des recommandations dont l'essentiel était de programmer un développement profond de la Recherche passant par des phases successives d'analyse, de spécifications, de recherche de solutions et de « démonstrations », sur des objectifs de pédagogie, d'implémentation et de validation technologique. Une originalité de ce travail prospectif a été de mettre l'accent sur deux points stratégiquement essentiels :

- le développement de la Recherche qui va nécessairement se heurter à côté de l'exigence éthique, aux règles qui organisent la société : responsabilité des chercheurs dans les étapes de démonstration, articulations avec les professionnels de santé, les travailleurs sociaux, les associations spécialisées, etc.
- la problématique « recherche », intervient alors que l'on fait face à une limitation profonde de l'organisation des soins pour des raisons évidentes de maîtrise de coûts et de garantie de la qualité des soins.

Ces constatations restent vraies aujourd'hui, et expliquent que le travail technique a été le plus souvent limité à des démonstrations sur site prototype, comme en témoignent les multiples expérimentations de « maisons intelligentes » présentées précédemment.

I.6 L'éthique

La conception d'un « Habitat Intelligent » assurant des services avancés tels que présentés section I.4 , doit considérer certains problèmes d'éthiques. En effet, les systèmes de surveillance, qu'ils soient dédiés à la sécurité des biens, des personnes ou à la gestion du confort, se basent sur des observations (présence, activités, état de santé, consommation, etc.) de la vie privée des personnes. Ces systèmes deviennent dès lors sensibles, dans la mesure où ils doivent répondre aux exigences de protections des informations individuelles, tout en les communiquant aux organismes spécifiques dédiés.

Le problème crucial concerne l'habitat qui devient hautement 'poreux' et public lorsque des informations médicales passent directement de son habitat à l'hôpital, au cabinet du praticien ou à celui de son soignant (infirmier) ou encore à un centre de surveillance par l'intermédiaire notamment de réseaux publics tel Internet. La barrière séparant le domicile du domaine public (hôpital, cabinet du praticien, centre de surveillance, etc.) est facilement dissoute.

Les concepteurs, les utilisateurs et les parties prenantes du système doivent garantir la fiabilité, la confidentialité des échanges et le respect du secret professionnel pour éviter les pertes accidentelles, ou les détournements intentionnels des informations relatives aux usagers. L'intégrité des données transmises doit être authentique et non dégradée pour assurer une bonne interprétation et garantir une prise en charge sans faute. Un problème similaire fut par exemple celui du fax laissé à la portée de toute personne ayant accès au télécopieur [Coul99].

La prise en charge à distance à grande échelle, émane certes, d'intentions honorables, mais peut s'avérer néfaste pour le bien être et la gestion personnelle de la santé du patient. La technologie déshumanise les relations humaines et les « visites virtuelles » pourraient transformer les infirmières et praticiens en techniciens à distance réduisant le contact humain essentiel entre le soignant et le soigné. Si en terme de vie privée, les systèmes de télésurveillance respectent les aspects confidentialité, sécurité, qualité morale, humaine et bien être du patient, leurs mises en œuvre dans les « maisons intelligentes » doivent être judicieusement comparée aux bénéfiques d'un suivi du patient entouré à l'hôpital ou dans une institution [Baue00][Demi06]. Le praticien ou le soignant doit par ailleurs s'assurer que le patient comprenne bien le principe de surveillance et des soins qui lui sont proposés, sa participation à des études clinique en télémédecine ou télésurveillance et qu'il ait accordé son consentement éclairé [Ripp02].

I.7 L'état des travaux conduits par le LAAS et EDF

Depuis 1995, le LAAS-CNRS et EDF-R&D collaborent dans un but commun de conception et de mise au point de systèmes domotiques intelligents assurant la gestion personnalisée du confort et la sécurité des personnes dans leur habitat (voir figure 5).

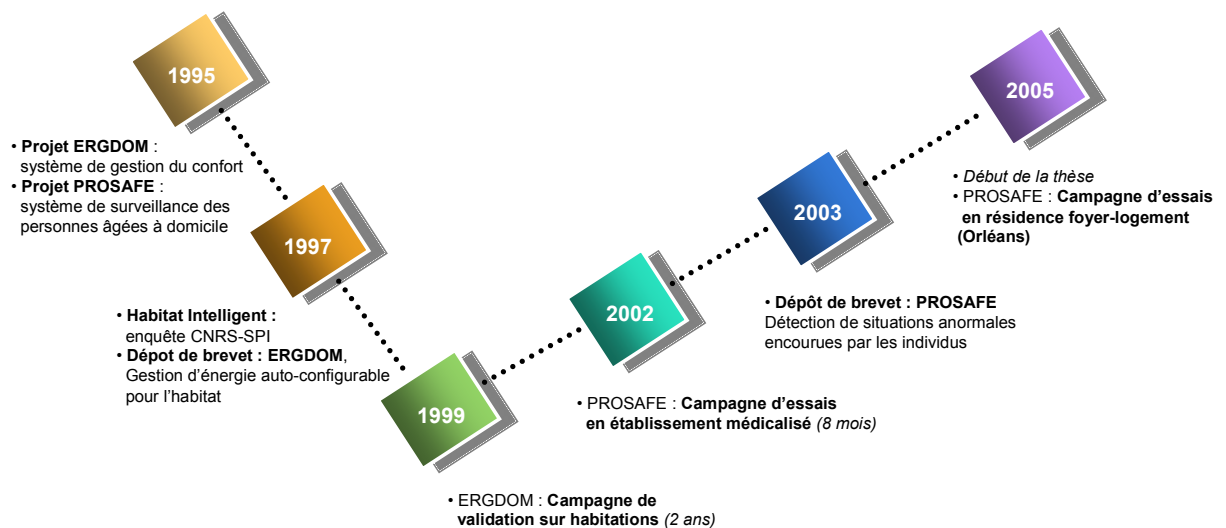


Figure 5 : L'état des travaux conduits par le LAAS et EDF.

Une première approche, telle que nous la préconisons, apporte un premier niveau d'intérêt avec l'utilisation des capteurs, notamment des capteurs de présence. Cet objectif a déjà été discuté [Camp08], montrant que l'on pouvait spécifier des capteurs piézo-électriques ou thermoélectriques utilisables tant dans la gestion du confort thermique que dans la surveillance des biens et dans une certaine mesure des personnes. Ces capteurs de présence sont donc les composants clés d'une infrastructure intelligente servant le développement des fonctions domotiques : savoir qui est là et où il se trouve à chaque instant, va pouvoir directement être utilisé pour gérer l'énergie et tous les dispositifs de confort et de loisirs, en arrêtant par exemple le fonctionnement de tous ces dispositifs en cas d'absence. Dans cette première série d'applications, où l'erreur n'est pas critique, la décision peut être prise dans tous les cas, en privilégiant le confort avant la dépense énergétique.

Si l'on considère les problèmes posés par la sécurité des personnes, il faut considérer très tôt les questions de responsabilités : l'objectif du « sans faute » est très important. Ce qui implique, au-delà de nos travaux antérieurs, de renforcer le diagnostic.

Nous voulons montrer ici que nos options de base, illustrées par les concepts des projets PROSAFE et ERGDOM, préservent l'homme bénéficiaire qui reste au cœur de nos préoccupations. L'idée se résume à créer, par des techniques d'apprentissage, un modèle de l'homme « usager » au travers de ses habitudes. Nous proposons ici les exigences et les fonctionnalités générales à prendre en compte dans une Domotique de confort et de soins à domicile à travers la présentation des principes et de l'état de ces deux projets au début de nos travaux.

1.7.1 La domotique de confort : le projet ERGDOM

1.7.1.a Principe

Le système ERGDOM I de première génération opère une gestion multicritères intelligente du confort et des dépenses d'énergie liés au chauffage. Il applique une pro-

cédure automatique d'apprentissage basée sur l'observation permanente du comportement des usagers dans l'habitat, et des réglages apportés par l'occupant au travers d'une interface spécifique.

Un réseau de capteurs de présence infrarouge, répartis dans l'habitat permet au système de connaître automatiquement les habitudes de présence de l'individu dans l'appartement. L'objectif d'apprendre la présence des occupants dans les différentes zones du logement est :

- d'une part, d'effectuer des anticipations sur la présence dans le logement afin d'obtenir le bon niveau de confort lorsqu'une zone est occupée,
- d'autre part, de réduire le niveau de chauffage lorsque le logement est inoccupé.

Ainsi, sur la base de la probabilité d'occupation d'un lieu donné de l'habitat à un instant donné, le système élabore un modèle du comportement des usagers lequel est ensuite confronté systématiquement à la situation courante.

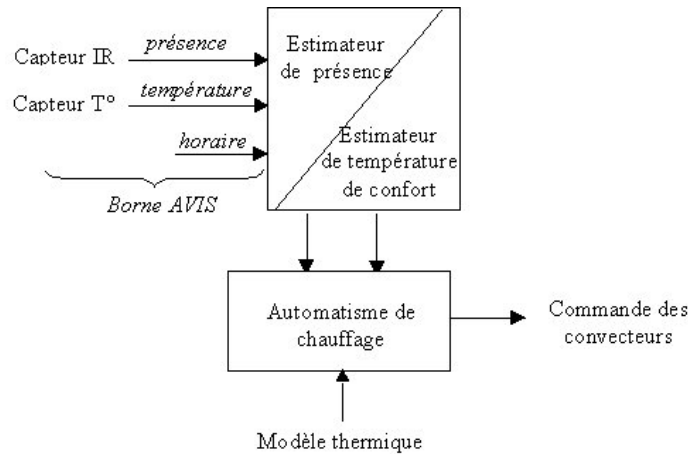


Figure 6 : Principe du concept ERGDOM.

Trois fonctions principales logicielles constituent le cœur du système et sont représentés dans la figure 6. Il s'agit des fonctions d'estimation de la présence, de la température de confort et de la réponse thermique du logement. Ces fonctions sont alimentées par des données liées à la présence de l'utilisateur mais aussi par des paramètres environnementaux tels que les températures intérieures et extérieures, l'ensoleillement et la tarification électrique journalière. L'ensemble s'opère sans intervention, ni programmation des occupants effectuant ainsi une gestion « intelligente » de l'énergie.

Le modèle thermique utilisé est un modèle linéaire paramétrique, qui prend en compte plusieurs facteurs. L'estimation de l'écart de température ΔT , après un intervalle de temps Δt (15 minutes), est calculée de la façon suivante :

$$\Delta T = \alpha.p + \beta.(T_e - T_p) + \gamma.(T_a - T_p) + \delta.E$$

p : Puissance fournie par le convecteur pendant l'intervalle de temps Δt qui suit. Cette valeur comprise entre 0 et 1, représente le pourcentage de temps pendant lequel le convecteur sera en marche.

T_e : Température extérieure à l'instant t .

T_p : Température de la pièce à l'instant t .

T_a : Température ambiante à l'instant t . Moyenne des températures des autres pièces.

E : Ensoleillement à l'instant t .

Un historique de l'évolution de la température de la pièce en fonction des paramètres est disponible à partir duquel une estimation est effectuée pour paramétrer un vecteur $\mathbf{x} = [\alpha, \beta, \gamma, \delta]$ solution de l'équation $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{B}$ avec $\mathbf{A}[i] = [p(t[i]), T_e(t[i]) - T_p(t[i]), T_a(t[i]) - T_p(t[i]), E(t[i])]$ et $\mathbf{B}[i] = [T_p(t[i+1]) - T_p(t[i])]$ avec $t[i+1] = t[i] + \Delta t$.

Avec un système sur-dimensionné, on effectue le calcul de \mathbf{x} au sens des moindres carrés en résolvant : ${}^t\mathbf{A} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = {}^t\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$.

I.7.1.b Les expérimentations en logements

La mise en application de cette approche implique une architecture matérielle et logicielle (figure 7) minimale constituée de :

- un ordinateur central regroupant les algorithmes d'acquisition et de traitement des données et connecté à des capteurs météorologiques (température extérieure et ensoleillement),
- une borne spécifique par pièce intégrant un détecteur de mouvement, une sonde de température ainsi qu'une interface-utilisateur simple.

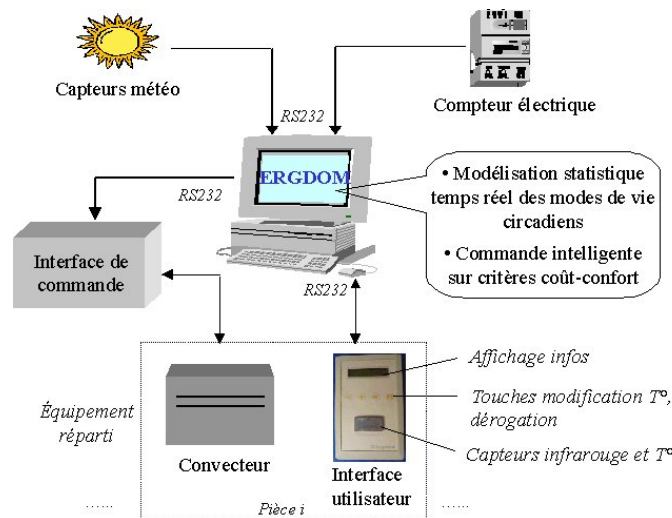


Figure 7 : Architecture matérielle du gestionnaire ERGDOM.

La collecte des informations de tous les capteurs permet de calculer et de mettre en œuvre une commande optimale équilibrant les dépenses et le confort.

I.7.1.c Performances

Les dernières expérimentations réalisées en 1999 et 2000 sur une dizaine d'habitations individuelles [Camp03a] avec le concours des entreprises Delta-Dore et Legrand ont permis de démontrer l'intérêt d'exploiter les habitudes de comportement dans la gestion automatisée du confort en particulier pour certaines tranches horaires de la journée. Elles contribuent en effet à apporter un confort thermique satisfaisant tout en réduisant la charge de programmation des utilisateurs.

La figure 8 et la figure 9 illustrent le positionnement du système ERGDOM I par rapport aux autres solutions, en termes de coût moyen énergétique et d'insatisfaction de confort ressenti des usagers (écart calculé $> 1^\circ$ entre $T_{réelle}$ et $T_{confort}$). Nous constatons que le système ERGDOM se positionne pour le coût moyen énergétique, entre le système idéal de confort permanent et les systèmes programmables avancés, et qu'il reste proche de ces derniers en terme d'insatisfaction des utilisateurs. La différence essentielle étant qu'ERGDOM ne requiert pas de programmation de l'utilisateur.

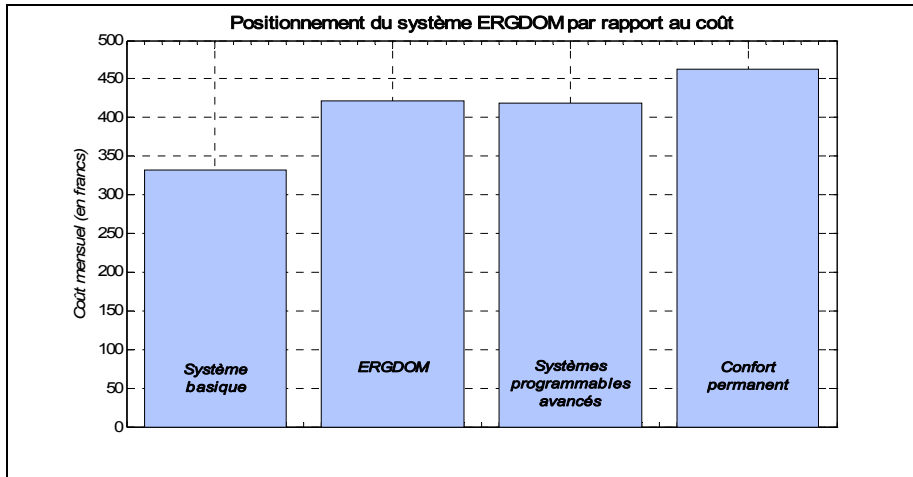


Figure 8 : Positionnement du système ERGDOM en terme de coût.

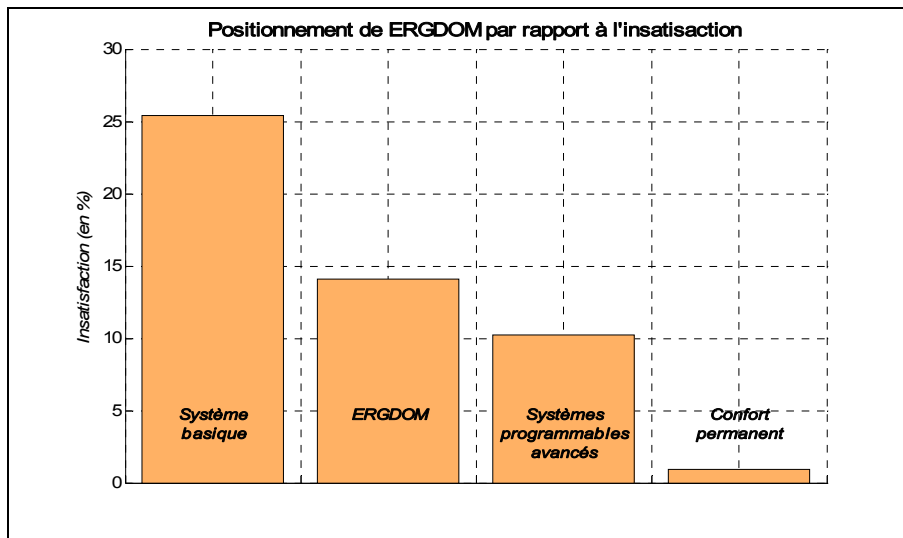


Figure 9 : Positionnement du système ERGDOM en terme d'insatisfaction de l'utilisateur.

1.7.2 La domotique de soins à domicile : le projet PROSAFE

1.7.2.a Principe

PROSAFE a été initialement conçu en tant que système de prévention d'incidents en temps-réel dans un environnement médicalisé. Le concept exploité par PROSAFE

consiste à mesurer l'écart du comportement du patient par rapport à ses habitudes pour détecter trois types d'incidents : la chute, la fugue et l'agitation. Un système de communication des alarmes a également été mis en place pour prévenir le personnel médical en cas d'incident par leur beeper portatif. Une IHM a été conçue spécifiquement pour permettre au personnel médical de suivre à distance les activités du patient (levers, couchers, etc.) et de consigner les alarmes générées par le système.

Les fonctionnalités générales de PROSAFE se décomposent en deux ensembles :

- l'analyse des activités en temps-réel afin de veiller au bien être du patient. C'est la partie intelligente du système qui reconnaît certains types d'évènements anormaux et prévient le personnel médical en cas de danger.
- l'analyse différée du comportement afin de suivre l'évolution des habitudes du patient ainsi que la déviance du comportement.

1.7.2.b La surveillance en institution

En 2002, une campagne d'essais sur PROSAFE a été réalisée durant huit mois dans une maison de retraite semi médicalisée à Charron. La configuration matérielle utilisée durant l'expérimentation de Charron (près de la Rochelle) sur 3 chambres occupées chacune par des personnes âgées est donnée figure 10. Elle s'appuie sur un réseau de communication de type filaire installé dans plusieurs chambres. Le patient est la plupart du temps seul dans son logement et l'interface de visualisation du système est placée dans le local des infirmières situé à proximité des chambres.

Les trois chambres possèdent une configuration matérielle centralisée à un superviseur placé dans le bureau du personnel médical.

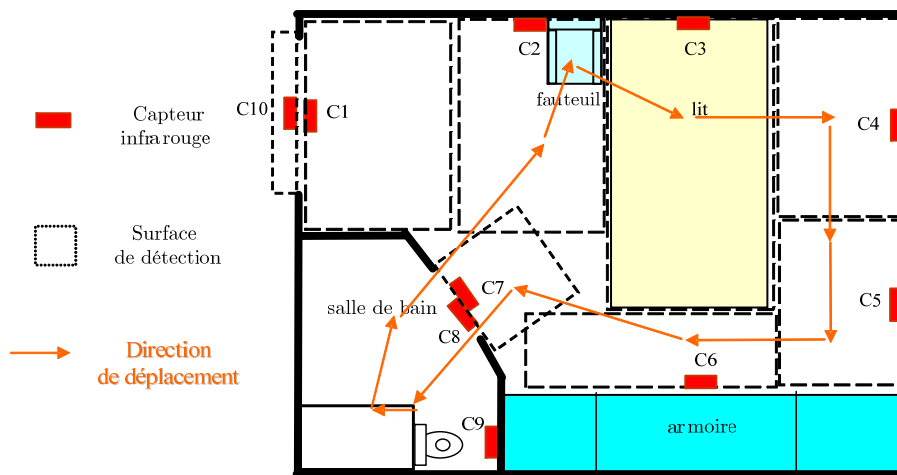


Figure 10 : Schéma d'implantation des capteurs dans les chambres.

Les détecteurs infrarouges fixés au plafond, de manière à ne pas gêner les mouvements du patient étaient répartis géographiquement au plafond pour couvrir 10 zones théoriques au sol d'une surface allant de 1 à 1,5 m² et couvrant la totalité de la chambre.

I.7.2.c Performances

Les performances du système, présentées figure 11, ont été évaluées durant le dernier mois. Parmi 18 incidents alarmes émises par le système, 10 correspondaient à de réels problèmes et 8 résultaient d'une erreur de diagnostic (mauvaise interprétation de position, seuil de déclenchement d'alarme non approprié...).

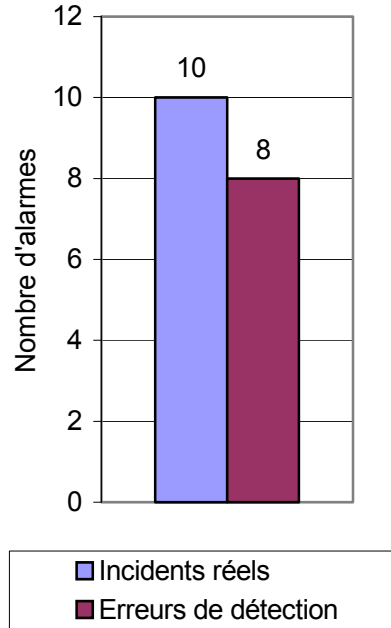


Figure 11 : Performances de la détection d'incidents.

L'expérimentation a aussi mis en évidence une dimension nouvelle de la surveillance que nous avons appelé « agitation » : grâce aux propriétés des capteurs de présence, on peut accéder aux mouvements du patient (gestes, mouvements corporels, marche, etc.). C'est ainsi que l'on a pu détecter des comportements inhabituels et suivre l'influence de certains médicaments sur le sommeil des patients.

I.7.3 Recommandations et perspectives

La mise en œuvre des habitats dédiés à la gestion automatisée du confort, économe en énergie et respectueux de l'environnement résulte d'une organisation transversale faisant collaborer : la maîtrise d'œuvre (architectes, bureaux d'études, ingénierie, etc.), le gros œuvre (entreprises et métiers du bâtiment), le second œuvre (électriciens, installateurs, génie climatique, etc.) les fabricants (distributeurs en électroménager, appareillages électriques, systèmes de confort, de sécurité, etc.) et les prestataires de services (sociétés de maintenance, distributeurs d'énergie, opérateurs de télécommunication, assurances, téléservices, etc.).

Cette organisation s'est très tôt mise en place pour satisfaire les demandes croissantes de confort et réduire les dépenses énergétiques liées à l'accroissement des

consommations individuelles et aux coûts de l'énergie. Cet ensemble structuré de ces corps de métiers émane des objectifs communs de développement durable et de confort global (confort sensoriel, confort d'usage et confort moral) considérant l'habitat dès sa conception. Dans ce contexte, les recherches technologiques, contribuent fortement aux défis du développement durable en proposant des solutions pour l'énergie sous la forme :

- de nouveaux matériaux (parois actives, composants à changement de phase, super isolants, etc.),
- d'une électronique diffuse (capteurs intelligents, composants actifs, etc.),
- de nouvelles sources d'énergie (solaire, éolienne, biomasse, puits canadien, etc.),
- de nouveaux automatismes de gestion (systèmes de régulations, gestion des consommations, etc.).

Le point central de ces solutions étant le contrôle automatique, l'idéal est d'aboutir à un système de supervision commun, adapté et flexible permettant de maîtriser les coûts et les performances des services proposés à l'utilisateur qui reste au cœur des préoccupations.

Parallèlement, l'organisation des soins à domicile n'est pas une organisation unique. Elle dépend de la cible visée : le handicap, la vieillesse et ses maladies, les maladies aiguës ou chroniques insuffisantes (rénaux, cardiaques, respiratoires...), les convalescents. Dans chaque cas, il faut identifier les populations concernées et tous les acteurs du réseau de soins qui devront se mettre en place. Mais dans tous les cas, il faut proposer des solutions qui, au-delà de leur efficacité, restent conviviales avec tous les utilisateurs et notamment les bénéficiaires. Une exigence forte, malgré une évidente évolution des mœurs vis-à-vis des systèmes de surveillance, reste la sauvegarde de l'intimité et de la dignité des usagers.

Dans ce contexte, développer des recherches technologiques et cliniques est un exercice délicat : comment gérer les risques et intérêts contradictoires pouvant être par endroit divergents (scientifiques, technologiques, sociaux et humains) considérant qu'il faut des accords écrits dans la peur des bénéficiaires, code d'éthique, code de Santé Publique, code déontologique... L'idéal est, au stade de la recherche, que se constitue une équipe pluridisciplinaire, en regard des objectifs du projet, capable de le piloter. Au-delà de la recherche, le transfert des résultats suppose un débat de fond avec tous les acteurs du développement industriel et de la mise en œuvre de terrain : Sécurité Sociale, médecins, intervenants associatifs... avec en priorité, les habitudes et aspirations humaines des bénéficiaires...

Toutes ces recommandations psychosociales sont à intégrer dans les spécifications techniques comme des exigences incontournables. Cette évidente constatation renforce l'idée d'une approche personnalisée et d'une « intégration » prioritaire dans le système technique proposé d'une modélisation des habitudes du bénéficiaire.

Les progrès technologiques et la réduction des coûts des composants électroniques autorisent aujourd'hui de proposer une surveillance des usagers non intrusive, préservant l'intimité, grâce au développement des systèmes ambulatoires et des capteurs répartis en réseau dans l'environnement. Les données recueillies sont mises à profit pour établir une modélisation de l'homme dans son environnement habituel... Cette modélisation, une fois acquise, peut être en permanence enrichie et adaptée. Sa prise en compte dans la décision est fondamentale de manière à répondre aux exigences que

nous avons identifiées. Nous traçons ainsi un chemin de personnalisation et de respect des aspirations et des modes de vie spécifiques. Ces principes ont commencé d'être expérimentés avec le projet PROSAFE, d'abord pour la surveillance à l'intérieur dans l'habitat. Il est en train d'évoluer vers le traitement de l'environnement immédiat de l'habitation.

I.8 Problématique et objectifs de thèse

L'habitat est devenu un enjeu essentiel de nos sociétés par les innovations qui accompagnent son renouvellement pour des situations confortables, sûres, économes et respectueuses de l'environnement. Nous considérons ici cette question très ouverte sous l'angle d'un habitat confortable et sûr, en faisant intervenir les questions d'énergie et de pollution dans les critères de choix. Nous avons, en considérant l'« habitat intelligent » sous toutes ses formes, fait un bilan des expérimentations dans le monde qui sont très nombreuses et montrent que les technologies existent et sont disponibles, et introduit les projets ERGDOM et PROSAFE dans leur état d'avancement au démarrage de nos travaux. En résumé, les concepts sont en place et ont été validés pour des démonstrations de faible complexité.

Notre tâche est ici de dégager les éléments d'une nouvelle étape permettant de traiter des opérations de grande complexité :

- Pour ERGDOM, nous proposons d'aller du chauffage électrique vers la gestion plus complexe où le confort intègre plusieurs champs interdépendants : la ventilation, la climatisation, l'éclairage, l'énergie radiative...
- Pour PROSAFE, nous proposons d'élargir le concept de surveillance d'une pièce unique à un appartement.

Pour des raisons de lisibilité du document, cette présentation de thèse ne traite pas des activités que le LAAS-CNRS a conduites sur les détecteurs de présence des personnes. Rappelons simplement que toute la stratégie des projets ERGDOM et PROSAFE repose sur la détection de présence.

De nombreuses solutions techniques basées sur une grande diversité de phénomènes physiques sont disponibles et sont encore améliorées régulièrement. Mis à part la généralisation de l'infrarouge passif (détecteur PIR), des capteurs de vibrations et de chocs, les systèmes actifs utilisant la lumière infrarouge, les ultrasons ou micro-ondes sont également utilisés. Les caméras vidéo sont également largement appliquées dans les systèmes de sécurité. Différents systèmes de contrôle d'accès, y compris les clés électroniques (transpondeurs, le bouton intelligent (iButton) et les systèmes d'identification biométriques (reconnaissance des empreintes digitales, reconnaissance d'écriture,...) sont développés. Nous donnons dans le tableau suivant, un résumé comparatif des principaux détecteurs de présence utilisant des technologies de détection différentes.

| Type de détecteurs | Précision / résolution de l'information | Information | | | | | Coût | Inconvénients |
|-------------------------|---|------------------------|--------------------|----------------|--------------|-------------------|------------|--|
| | | Détection de mouvement | Nombre d'occupants | Identification | Localisation | Activité physique | | |
| Infrarouge passif | Basse | + | - | - | - | +/- | Faible | Résolution faible |
| Barrières lumineuses | Basse | +/- | + | - | - | - | Faible | Résolution faible |
| Détecteurs micro-ondes | Basse | + | - | - | - | - | Moyen | Résolution faible et prix élevé |
| Ultrasons (simple) | Basse | + | - | - | - | - | Faible | Résolution faible |
| Ultrasons (intelligent) | Relativement basse | + | - | - | +/- | +/- | Moyen | Précision faible |
| Détecteurs de chocs | Haute | + | - | - | - | +/- | Moyen | Installation relativement complexe |
| Caméra infrarouge | Très haute | + | + | - | + | + | Très élevé | Prix très élevé |
| Pyrodétecteurs 360° | Très haute | + | + | - | + | + | Moyen | Bruits mécaniques |
| Transpondeurs | Basse | + | - | + | - | - | Moyen | Résolution et portée faible |
| Caméra vidéo | Très haute | + | + | +/- | + | + | Elevé | Algorithmique complexe, intrusion dans la vie privée, critique par luminosité insuffisante |
| Systèmes biométriques | Basse | - | + | + | - | - | Elevé | Résolution faible, facteurs psychologiques |

Tableau 3 : Tableau comparatif des détecteurs de présence.

Le choix initial du LAAS s'est porté sur les détecteurs infrarouges passifs parce qu'ils sont déjà présents dans le marché Domotique et qu'ils peuvent être améliorés. C'est ce que nous avons contribué à faire dans trois études parallèles hors du cadre de la thèse :

- avec la société CEDOM, nous avons spécifié et créé une nouvelle génération de capteurs sans fil, particulièrement adaptés à nos besoins : ils seront la base de notre expérimentation à Orléans (cf. chapitre IV),
- à la demande EDF, nous avons conduit une étude qui a consisté à définir et à réaliser les principes d'un compteur de personnes à base de détecteurs infrarouges passifs. Les performances réelles de ce compteur restent à valider,
- à la demande de EDF, nous avons imaginé un détecteur bi-fonctionnel à base de capteurs infrarouges thermopiles capable de détecter une présence humaine en mouvement ainsi qu'au repos [Escr05]. Ce capteur a fait l'objet d'un dépôt de brevet commun EDF-CNRS [Bena04].

Dans ces choix initiaux du Laboratoire, en s'interdisant le recours à une identification des personnes pour des raisons essentiellement éthiques mais pas seulement, il existe :

- des systèmes transpondeurs de type RFID qui permettent l'identification d'une personne mais possèdent l'inconvénient de devoir embarquer en permanence une étiquette d'identification. Ce problème peut être résolu partiellement par l'implantation de ces transpondeurs dans des objets comme les montres, ou les vêtements. Les portées sont limitées à quelques centimètres, et il est possible de détecter la direction de mouvement (si l'utilisateur entre ou quitte une pièce). Néanmoins, cette solution d'identification est simple, fiable et bon marché. En combinaison avec un compteur de personnes sur tous les accès de passage critique, on peut obtenir à la fois des informations sur le nombre des occupants et leur identité. D'autres systèmes encore plus évolués proposent une identification des utilisateurs grâce à la récupération des propriétés biométriques (détection du visage, reconnaissance de la voix) suscitant de nombreuses études de recherches. Toutefois, les solutions rapportées sont encore loin d'être satisfaisantes en matière de flexibilité, de temps d'apprentissage et de fiabilité.
- des caméras vidéo pour la localisation et le suivi des personnes qui peuvent également être une solution. Les principaux problèmes techniques rencontrés avec les systèmes vidéo sont la forte dépendance à l'égard des conditions d'éclairage et de masquage des objets. Pour parvenir à un système fiable et souple, la caméra doit être utilisée en combinaison avec d'autres systèmes tels que les barrières infrarouges, les détecteurs pyroélectriques, etc.

Nous sommes restés, dans notre démarche, proche des solutions techniques déjà éprouvées. Cependant rien ne s'oppose, au contraire, à un enrichissement des mesures par des barrières et le comptage des personnes, par des identifications embarquées ou des caméras placées à des endroits judicieusement choisis si les considérations éthiques sont parfaitement maîtrisées.

Notre travail doit de plus répondre à une exigence méthodologique. En effet, la complexité des nouvelles fonctionnalités envisagées dans les systèmes PROSAFE et ERGDOM, nous conduit à mettre en place une procédure complète de conception partant du cahier des charges jusqu'aux choix des technologies. L'objectif est de permettre à terme, avec rigueur et justesse, de pouvoir dimensionner parfaitement et « sans faute » un système réel.

I.9 Conclusion

La Domotique a été identifiée comme un axe technologique de développement dans les années 80, sans que l'on ait réellement atteint les objectifs initiaux. La Domotique s'ouvre aujourd'hui encore plus largement vers la définition d'un habitat économe et respectueux de l'environnement.

De nombreux travaux de démonstration ont été réalisés dans le monde pour illustrer les technologies disponibles. Nous avons présenté, dans ce chapitre, l'essentiel de ce qui a été fait et décrit les principales avancées montrant que le problème est plus un problème de conception qu'un problème de disponibilité des technologies pour certifier, sécuriser et assurer la pérennité des systèmes face à la diversité des services émergents.

Nous avons ensuite présenté les projets ERGDOM et PROSAFE, dont l'originalité est basée sur une modélisation des usagers par les habitudes pour gérer automatiquement le confort et assurer une sécuritaire des personnes en appartement sans intervention humaine. L'opérationnalité de ce concept est démontrée et notre objectif est d'en faire la base d'une structure générale d'un habitat, confortable, sûr et économe en énergie.

Nous avons également rappelé quelques travaux complémentaires que nous avons réalisés pour améliorer ou renouveler les concepts de détection des personnes, pour nous consacrer seulement aux aspects systèmes.

Notre plan de travail comporte trois aspects :

- l'extension du concept ERGDOM à la réalisation d'un système complet associant chauffage, climatisation, ventilation et occupants,
- l'extension du concept PROSAFE à la surveillance des personnes âgées autonomes en appartement,
- la définition d'une stratégie méthodologique pour permettre une conception plus rapide et plus fiable, à partir des concepts précédents, capable d'intégrer toutes les exigences des services et des systèmes domotiques.

Chapitre II Conception Domotique :

Recherche d'une solution logique

selon l'EIA-632

| | |
|--|-----------|
| II.1 INTRODUCTION | 51 |
| II.2 LA NORME EIA-632..... | 51 |
| II.2.1 Les exigences des processus définis par la norme EIA-632 | 52 |
| II.2.2 Les processus de conception | 53 |
| II.2.2.a Les processus de définition des exigences..... | 53 |
| II.2.2.b Les processus de définition de la solution logique..... | 53 |
| II.2.3 Les processus d'évaluation technique | 54 |
| II.2.4 Le cadre d'application de la norme | 55 |
| II.3 L'ETABLISSEMENT D'UN MODELE LOGIQUE DE FONCTIONNEMENT SELON LES | |
| RECOMMANDATIONS DE L'EIA-632 | 55 |
| II.3.1 Le modèle de contexte..... | 57 |
| II.3.1.a Les fonctions techniques dans le système ERGDOM II..... | 58 |
| II.3.1.b Pré-inventaire des fonctions | 59 |
| II.3.1.c Les fonctions du système ERGDOM II interagissant avec d'autres | |
| systèmes, entités ou personnes spécifiées dans le cahier des charges..... | 59 |
| II.3.1.d Le diagramme de contexte..... | 60 |
| II.3.2 L'identification des services..... | 60 |
| II.3.2.a Réalisation du diagramme..... | 61 |
| II.3.3 La définition des séquences..... | 66 |
| II.3.3.a Les diagrammes de séquences rapportés aux cas d'utilisation..... | 68 |
| II.3.4 La modélisation de la logique de commande | 70 |
| II.3.5 La transformation du modèle SYSML au modèle HiLes | 71 |
| II.3.5.a Le formalisme HiLes | 72 |
| II.3.5.b La transformation des activités SYSML au modèle HiLes..... | 73 |
| II.3.5.c Le modèle HiLes de la solution logique de ERGDOM II | 76 |
| II.3.6 La vérification formelle de la logique de commande par TINA..... | 80 |
| II.3.6.a Les critères d'analyse | 80 |
| II.3.6.b La méthodologie de validation..... | 81 |
| II.3.6.c La vérification formelle..... | 82 |
| II.3.7 L'intégration de la gestion des données..... | 83 |
| II.3.7.a La description des données..... | 83 |
| II.3.7.b L'intégration des données dans les activités | 84 |
| II.3.7.c Le modèle HiLes de la solution logique | 85 |
| II.4 L'ETABLISSEMENT DU MODELE PHYSIQUE SELON LES RECOMMANDATIONS DE L'EIA- | |
| 632..... | 86 |
| II.4.1 Le modèle de configuration matérielle..... | 87 |
| II.4.2 Le modèle de déploiement | 89 |
| II.4.3 Le modèle d'exploitation | 91 |
| II.4.4 Le partitionnement..... | 92 |
| II.5 CONCLUSION | 98 |

II.1 Introduction

La conception « Domotique » est, dans notre approche, une dérivée « métier » dans l'ingénierie des systèmes. Elle doit donc s'inspirer des démarches génériques proposées par les standards de l'Ingénierie des Systèmes. Dans cet esprit, nous proposons d'appuyer notre démarche sur les recommandations de l'EIA-632 [EIA99] que nous introduisons très succinctement au début de ce chapitre. La démarche méthodologique présentée s'intègre d'une part, dans le processus de conception couvert par la norme, et propose d'autre part, une organisation des représentations du système par des modèles (de type MDA « Model Driven Architecture » [Kobr03]) et des documents à chaque étape de la conception.

Selon les recommandations de l'EIA-632, il convient, dans un premier temps et sur la base d'un cahier des charges précis (voir annexe A), d'établir un modèle fonctionnel logique du système à concevoir. Après vérification formelle des propriétés de la solution, nous choisissons les technologies pour définir un modèle physique que l'on simule pour des objectifs de validation et d'optimisation (prototypage virtuel). Notre travail est limité à la définition des algorithmes de commande (ERGDOM) et de surveillance (PROSAFE). Nous présentons donc la démarche que nous avons élaborée dans le cas du projet ERGDOM en la centrant sur l'objectif de conception des solutions logique et physique.

A chacune des étapes de la conception, sont associées des modèles, des langages et des outils qui seront introduits chaque fois que nécessaire dans la présentation de la démarche. Pour la clarté de la présentation, nous travaillerons pas à pas.

II.2 La norme EIA-632

Il est avant tout nécessaire de décrire les principes préconisés par la norme EIA-632 [EIA99]. Celle-ci définit l'ensemble des processus de l'Ingénierie Système pour réaliser les produits, de la définition des besoins jusqu'à leur mise en service.

Cette norme industrielle distingue le produit final, du produit contributeur. Le produit contributeur est l'ensemble des produits permettant d'obtenir le produit final et qui peut être utilisé par d'autres produits finaux. A ce jour, 7 produits contributeurs sont proposés : développement, test, production, déploiement, formation, support et retrait du produit. Le produit désiré est dès lors décomposé en un ensemble de sous-produits finaux et produits contributeurs définis en tant que module. L'intérêt d'une telle hiérarchie est alors de faciliter la représentation des aspects d'intégration et de planification des produits sous-traités menés parallèlement ou séquentiellement. La figure 12 présente les processus d'Ingénierie Systèmes identifiés par l'EIA-632.

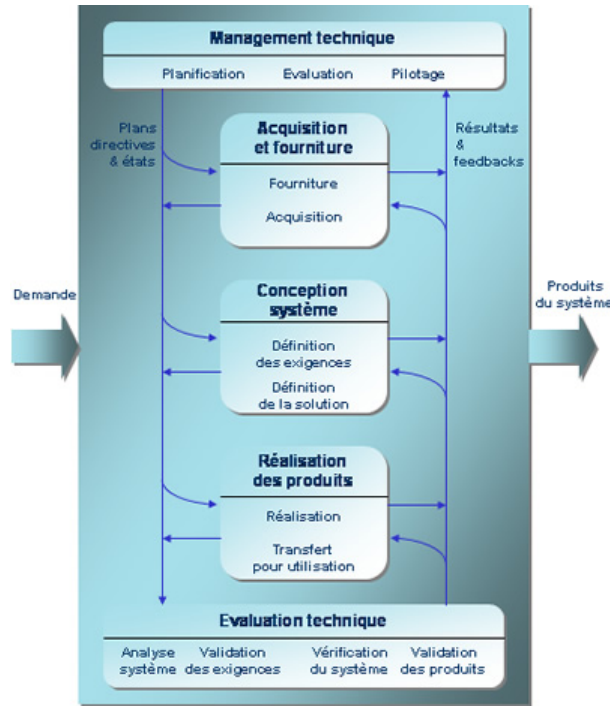


Figure 12 : Les processus d'Ingénierie Systèmes de l'EIA-632.

Les processus de management technique et d'évaluation technique cadrent le processus d'acquisition et fourniture, le processus de conception système et le processus de réalisation des produits. Ces cinq catégories regroupent treize processus intermédiaires qui sont appliqués à chaque niveau de la hiérarchie du produit désiré pour permettre de spécifier, modéliser, développer, valider, etc. les produits finaux, tout en répondant à un certain nombre d'exigences.

II.2.1 Les exigences des processus définis par la norme EIA-632

La norme EIA-632 définit 33 exigences énumérées dans le tableau 4 :

| | | |
|---|--|---|
| Exigences du processus de fourniture 1. Fourniture du produit | Exigences du processus de contrôle 12. Gestion des résultats 13. Dissémination de l'information | Exigence du processus d'analyses des systèmes 22. Analyses d'efficacité 23. Analyses des compromis 24. Analyses des risques |
| Exigences du processus d'acquisition 2. Acquisition du produit 3. Performances des fournisseurs | Exigences du processus de définition des exigences 14. Exigences d'acqureur 15. Exigences des autres parties prenantes 16. Exigences techniques du système | Exigences du processus de validation des exigences 25. Validation de l'expression des exigences 26. Validation des exigences d'acqureurs 27. Validation des exigences des autres parties prenantes 28. Validation des exigences techniques du système 29. Validation des représentations de la solution logique |
| Exigences du processus de planification 4. Stratégie de mise en œuvre du processus 5. Définition de l'effort technique 6. Ordonnancement et organisation 7. Plans techniques 8. Directives de travail | Exigence du processus de définition de la solution 17. Représentations de la solution logique 18. Représentations de la solution physique 19. Exigences spécifiées | Exigences du processus de vérification du système 30. Vérification de la solution conçue 31. Vérification du produit final 32. Vérification du produit contributeur |
| Exigences du processus d'évaluation 9. Progrès relatifs aux plans et aux échéances 10. Progrès relatifs aux exigences 11. Revues techniques | Exigences du processus d'implémentation 20. Implémentation | Exigences du processus de validation des produits finaux 33. Validation des produits finaux |
| | Exigences du processus de transition vers l'utilisation 21. Transition vers l'utilisation | |

Tableau 4 : Les exigences des processus définies par l'EIA-632.

Nous concentrerons nos efforts sur le processus de conception, à savoir les processus de définition des exigences et de la solution, ainsi que sur le processus d'évaluation technique et plus particulièrement le processus de vérification du système.

II.2.2 Les processus de conception

La figure 13 présente les interactions entre le processus de définition des exigences et le processus de définition de la solution qui, à partir des exigences d'acqureur et des exigences des autres parties prenantes, vont fournir les différentes spécifications, représentations et modèles de la solution logique et de la solution physique.

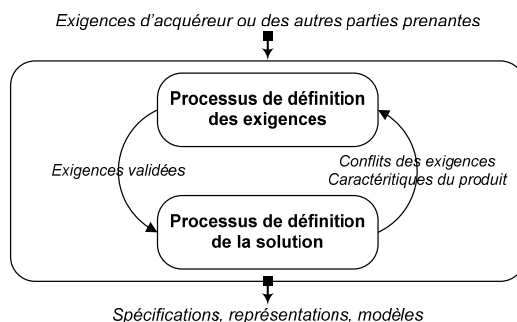


Figure 13 : Le processus de conception selon la norme EIA-632.

II.2.2.a Les processus de définition des exigences

Le processus de définition des exigences distingue :

- les exigences d'acqureur (E14), où tous les besoins de l'acqureur sont représentés,
- les exigences des parties prenantes (E15), où tous les besoins des autres parties prenantes sont représentés et qui contraignent précisément certains produits contributeurs,
- les exigences techniques du système (E16), où sont définies les contraintes opérationnelles du système et les exigences de performances.

La tâche consiste ainsi à collecter et classifier les exigences à partir :

- des contrats, autres documents et personnes liés au système,
- des résultats issus des autres processus tels que les plans, les décisions techniques, etc.

II.2.2.b Les processus de définition de la solution logique

Le processus de définition de la solution logique définit la représentation logique du système à partir de modèles conceptuels formels, ou semi-formels (E17) et distingue le modèle logique, du modèle physique (E18).

Les formalismes de modélisation choisis doivent permettre la description fonctionnelle du système, l'intégration des exigences techniques et faciliter les modes de vérification retenus (E19) : vérification formelle, tests, simulations, etc.

II.2.3 Les processus d'évaluation technique

Les processus d'évaluation technique sont : l'analyse système, la validation des exigences, la vérification des exigences et la validation des produits. Les interactions entre ces processus, présentées figure 14, permettent, à partir des analyses des requêtes des exigences et des produits mis en œuvre, de fournir les modèles analytiques, les évaluations, les exigences validées et les produits vérifiés.

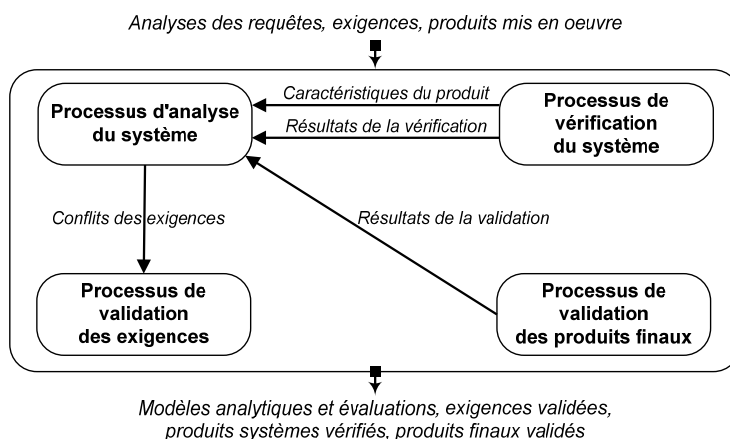


Figure 14 : Les processus d'évaluation technique selon la norme EIA-632

Ils interagissent pour :

- Valider les exigences (E25, E26, E27),
- Justifier les prises de décisions (E29),
- Evaluer les solutions logiques et physiques (E30).

Le processus de validation des exigences a pour objectif de s'assurer que toutes les exigences identifiées répondront aux différents besoins et contraintes. La validation des déclarations des exigences est une étape clé, permettant d'identifier certains conflits ou incohérences des exigences. Elle doit formuler un ensemble d'exigences complètes, homogènes et complémentaires, dont la qualité facilite les développements des solutions de conception. Il s'agit de valider les exigences de l'acquéreur, les exigences des autres parties prenantes et les exigences techniques du système. Il s'agit également de choisir les méthodes et procédures de validation de ces exigences, d'en déterminer une traçabilité et de valider la représentation des solutions logique et physique :

- en choisissant les méthodes et les procédures de validation des ensembles des représentations,
- en corrélant d'une part, les exigences validées aux différentes représentations de la solution logique, et en analysant, d'autre part, les propositions de représentation des solutions.

Le processus de vérification du système a pour but de vérifier que toutes les exigences établies pour la représentation de la solution physique sont satisfaites par les produits finaux. L'activité consiste à élaborer un plan de vérification et de procéder aux vérifications de la solution de conception par application des procédures choisies : vérifications formelles, tests, simulations, etc.

II.2.4 Le cadre d'application de la norme

La norme EIA-632 est une démarche ouverte qui ne précise pas de méthode permettant d'aboutir au produit final. Les processus fondamentaux décrits par la norme peuvent s'appliquer sur tous les cycles de vie des systèmes. Nous choisissons ainsi d'appuyer l'organisation de notre démarche sur le processus de développement en « Y » (figure 15) qui distingue :

- Le point de vue fonctionnel du système : branche gauche du « Y »,
- Le point de vue technique du système : branche droite du « Y »,
- L'intégration des deux représentations pour aboutir au produit final : branche centrale du « Y ».

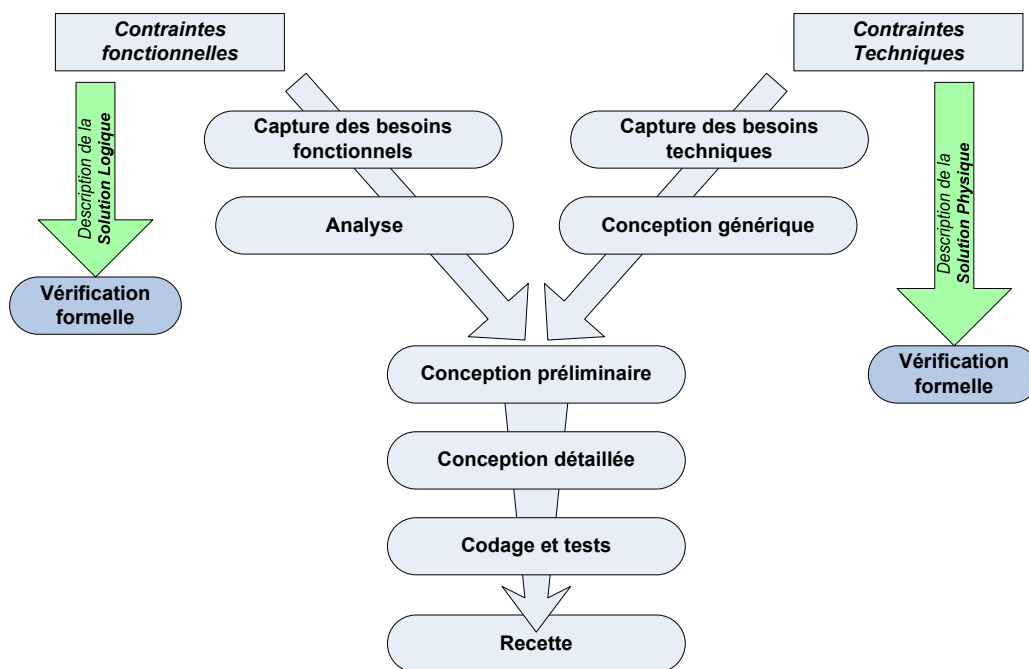


Figure 15 : Démarche globale de la conception de la solution logique.

Nous souhaitons, d'une part, vérifier formellement la représentation de la solution logique selon une approche fonctionnelle et, d'autre part, vérifier la représentation de la solution physique qui intègre la dimension technologique. Nous considérons ces deux étapes de vérification essentielles avant de procéder à la réalisation du produit final.

II.3 L'établissement d'un modèle logique de fonctionnement selon les recommandations de l'EIA-632

Pour réaliser un produit, la norme EIA-632 préconise, dans un premier temps, d'élaborer le modèle logique de la solution. On entend par modèle logique, la représentation d'une solution logique fonctionnelle du système selon les recommandations de l'EIA-632.

Cette solution logique ne propose pas de technologies de réalisation. Seuls les concepts sont mis en avant sous la forme de fonctions. La solution logique précède la solution physique qui intégrera la dimension technologique construite à partir de l'état de l'art des technologies et des fournitures disponibles. La solution logique se présente d'abord sous la forme d'un modèle simulable : le prototype virtuel, sur lequel on pourra faire des vérifications formelles et des optimisations. L'étape terminale d'assemblage conduit au prototypage réel que l'on devra valider expérimentalement.

La démarche de conception du modèle logique est explicitée figure 16. Nous allons construire le modèle logique selon une procédure imaginée au LAAS-CNRS déjà expérimentée dans les travaux de [Guil07][Maur05][Hamo05] qui, au travers d'une succession de diagrammes partant du cahier des charges jusqu'aux diagrammes de séquences, proposait une solution logique basée sur les Réseaux de Petri et une traduction automatique en VHDL-AMS [Vhdl]. Dans ce travail de thèse, nous ne considérerons pas cette dernière car nous souhaitons avant tout valider formellement le comportement dynamique du système.

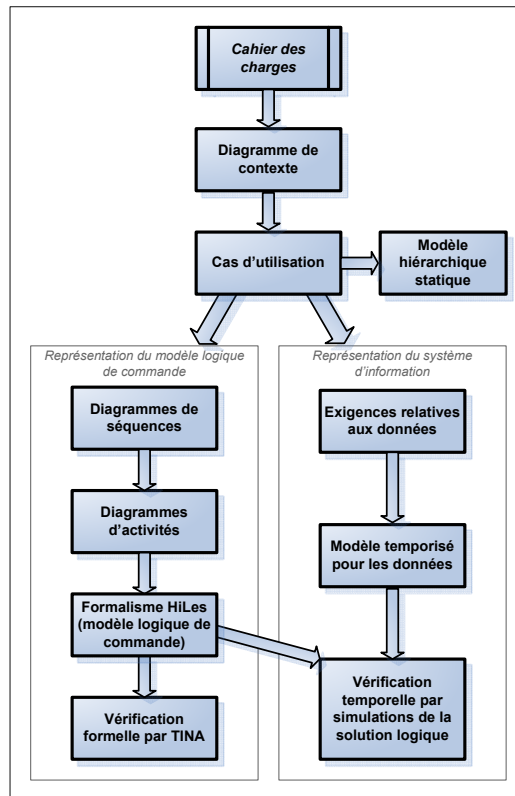


Figure 16 : Démarche globale de la conception de la solution logique.

Aujourd'hui, nous proposons une extension de la démarche, intégrée aux processus de l'EIA-632, qui représente le modèle logique par les diagrammes d'activités du formalisme SYSML [Sysml06]. Notre ambition est plus importante car, d'une part, nous transformons automatiquement la représentation SYSML de la solution logique en un modèle HiLes adapté à la vérification formelle des propriétés, et d'autre part, nous poursuivons la conception système pour intégrer les exigences techniques et aboutir à une description détaillée de la solution physique formellement vérifiée. La méthodologie proposée s'inscrit notamment dans un contexte d'aide à la décision du concepteur dans le but d'aboutir, à terme, à un processus semi-automatisé de la conception du

produit tel que définis par l'EIA-632. Nous appuyons notre démarche sur les acquis modernes des processus de développements logiciel construits sur UML tels que les processus MDA, UP (« Unified Process »), AOP (« Aspect Oriented Programming ») et 2TUP (« 2 Track Unified Process »).

La méthodologie s'appuie ainsi sur une succession de diagrammes proposés dans les standards UML2 [Uml07] et SYSML [Sysml06] jusqu'à aboutir aux diagrammes d'activités du système proposant une architecture système et une première représentation logique de son fonctionnement.

Nous transformons ensuite automatiquement les diagrammes d'activités, décrits en SYSML, en une représentation basée sur le formalisme HiLes, développé par ailleurs au LAAS-CNRS [Hiles]. Ce formalisme présente :

- Une représentation de la commande en réseaux de Petri, et donc une vérification fonctionnelle de cette commande par un outil de vérification associé à HiLes : TINA [TINA].
- Une représentation simulable des caractéristiques logico-temporelles du système car à chaque fonction est associée un délai de réalisation qui anticipe les performances du système réel.
- La possibilité d'une traduction semi-automatique en VHDL-AMS de cette représentation logico-temporelle, prête à s'enrichir des choix technologiques pour aboutir « sans faute » à la solution terminale physique.

La procédure méthodologique part de la lecture du cahier des charges et applique des représentations successives, respectant les règles de cohérences définies dans [Malg05], selon les étapes suivantes :

- l'établissement du « diagramme de contexte »,
- l'inventaire des « cas d'utilisation »,
- l'écriture, pour chaque cas d'utilisation, des « diagrammes de séquences »,
- la synthèse des séquences sous la forme d'un « diagramme d'activités »,
- la transformation semi-automatisée vers le formalisme HiLes (« HiLes Design ») pour vérifier les propriétés du modèle logique de commande,
- la définition des données par un diagramme blocs,
- l'intégration du modèle d'informations dans les diagrammes d'activités,
- la vérification formelle de la solution logique sous HiLes.

Nous allons présenter cette démarche pas à pas, à travers la conception du système ERGDOM II, qui a fait l'objet d'un travail de spécifications préalable réalisé par EDF-R&D [Edf06a][Edf06b]. Ce document sert de base à l'établissement du modèle logique.

II.3.1 Le modèle de contexte

Dans un premier temps, le système est représenté au sein de son environnement par un diagramme de contexte. Le diagramme de contexte de ERGDOM II (figure 17) met en évidence :

- la fonction principale du système.
- le rôle des acteurs qui peuvent être des entités ou personnes interagissant avec le système ou d'autres systèmes. L'acteur est une entité qui bénéficie, de ma-

nière observable, de l'utilisation du système et qui possède une autonomie de décision. Ainsi, tout dispositif « physique » passif est à exclure.

- les interactions (émission/réception de messages) entre les acteurs et le système.

Pour élaborer le diagramme de contexte du système, il est nécessaire de définir les fonctions techniques, d'élaborer un pré-inventaire des fonctions et d'énumérer toutes les fonctions du système interagissant avec d'autres systèmes ou personnes spécifiés dans le cahier des charges.

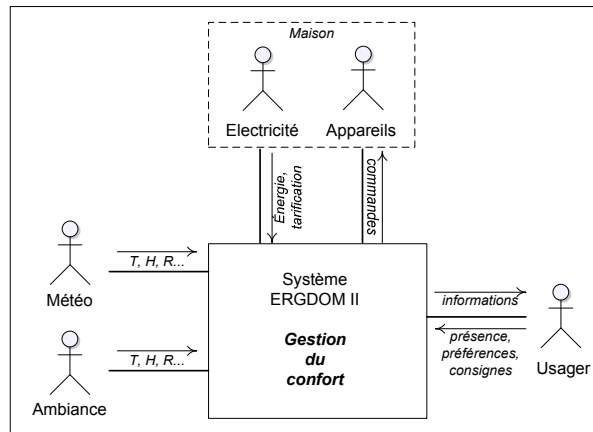


Figure 17 : Diagramme de contexte dynamique du système ERGDOM II.

II.3.1.a Les fonctions techniques dans le système ERGDOM II

Les fonctions voulues pour le maître d'œuvre sont consignées dans le cahier des charges et définissent les besoins que le concepteur doit satisfaire. En l'occurrence, la fonction principale est la gestion du confort. Mais on trouve d'autres exigences :

- gérer le confort (C_i) des occupants sur la base d'un critère économe (C), en utilisant :
 - l'énergie fournie à l'habitat (flux énergétique - F_E),
 - la ventilation de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de l'habitat (Flux ventilé - F_V),
 - les volets contrôlant l'énergie du rayonnement solaire placés sur les fenêtres (Flux solaire - F_S),
- mesurer la température et l'humidité dans chaque pièce de l'habitat (T_i, H_i - AVIS),
- mesurer la luminosité dans chaque pièce de l'habitat (E_i - AVIS),
- mesurer la température et le rayonnement extérieur (T_{ext}, R_{ext} - Sonde météo)
- mesurer la qualité de l'air dans certaines pièces de l'habitat (A_i - AVIS),
- mesurer la présence (P_i) d'un occupant dans chaque pièce,
- collecter les consignes de l'occupant de chaque pièce dans l'habitat (AVIS),
- comporter une fonction de surveillance sécuritaire (S) : température, fumée, pollution de l'air.
- appliquer (ou pas) les normes et contraintes prescrites (NC).

Les exigences envisagées peuvent être allégées en raison de la réalité économique (coût des capteurs, moyens de communication, ...).

II.3.1.b Pré-inventaire des fonctions

Le diagramme de contexte de ERGDOM II, donne la vue schématique standardisée du système et de son environnement. C'est un système de gestion réparti entre toutes les pièces de l'habitation qui conduit, pour des raisons de facilité de lecture, aux abréviations listées dans le tableau 5.

| <i>Fonctions</i> <i>capteurs Ca, actionneurs Ac, signal Si</i> | <i>Acteurs concernés</i> | <i>Répartis</i> | <i>Partagés</i> |
|---|--------------------------|-----------------|-----------------|
| GEST (Si) | Système, Usager | ? | ☑ |
| AVIS (Ca) | Système, Usager | ☑ | |
| Ti (Ca) | Système | ☑ | |
| Ei (Ca) | Système | ☑ | |
| Ai (Ca) | Système | ? | ☑ |
| P (Ca) | Système | ☑ | |
| Fe (Ca) | Système | ☑ | |
| Fv (Ca) | Système | ☑ | ? |
| Fs (Ca) | Système | ☑ | ? |
| S (Ca) | Système | ☑ | ? |
| IHM (Ca) | Usager | | |
| Te (Ca) | Météo | | ☑ |
| Ec (Ca) | Météo | | ☑ |
| H (Ca) | Système | | ☑ |
| E (Ac) | Energie | | |
| AL (Ac) | Maintenance | | ☑ |
| R (Si) | Maintenance | | ☑ |
| M (Ac) | Maintenance | | ☑ |

Tableau 5 : Abréviations utilisées pour la spécification des fonctions.

II.3.1.c Les fonctions du système ERGDOM II interagissant avec d'autres systèmes, entités ou personnes spécifiées dans le cahier des charges

Les acteurs retenus interagissent tous avec d'autres entités du système :

- L'utilisateur qui interagit en :
 - utilisant les interfaces Homme-Machine (IHM) du système :
 - le bloc central (IHM),
 - les bornes (AVIS), placés dans chaque pièce,
 - mettant en route le système,
 - arrêtant le système,
 - faisant appel aux équipes externes de maintenance (non traité car non spécifié).
- La météo interagit avec le système en :
 - fixant la température externe (T_e),
 - fixant les conditions d'ensoleillement (E_e),
 - fixant l'humidité extérieure (H_e),
 - fixant le niveau de CO_2 extérieur (CO_{2e} , NO_{2e} ?).
- L'ambiance intérieure interagit en :
 - fixant la température intérieure (T_i),

- fixant l'humidité intérieure (H_i),
- fixant la luminosité intérieure (L_i),
- fixant le niveau de CO_2 intérieur (CO_{2i}).
- Les appareils interagissent en :
 - Exécutant les commandes reçues (C_{app}) visant à modifier l'ambiance de l'habitat, selon une stratégie qui met en œuvre différents actionneurs nommés dans le cahier des charges.
- L'énergie interagit en :
 - apportant l'énergie extérieure nécessaire à la gestion du confort (E),
 - apportant la tarification horaire de l'énergie électrique (C_{tarif}).

II.3.1.d Le diagramme de contexte

Le diagramme de contexte (figure 17) que nous retenons fait apparaître 5 acteurs : l'utilisateur, les appareils de gestion du confort (climatisation, ventilation, occultant et convecteur), la météo, extérieure, l'ambiance intérieure et l'électricité. La fonction centrale est identifiée sous le terme gestion du confort, ayant conscience que ERG-DOM II est multifonctionnel. Les messages échangés entre les acteurs et le système sont ensuite étayés dans l'étape suivante traitant des cas d'utilisation.

II.3.2 L'identification des services

Les cas d'utilisation ont pour rôle de décrire l'utilisation qui est faite du système par ses acteurs pour atteindre un but.

Comme dans une large diversité de systèmes embarqués, les cas d'utilisation typiques sont :

- des mises en route,
- des procédures d'arrêts,
- des arrêts d'urgence sécuritaires,
- des régulations et mises en œuvre de commande, d'automatisme, etc.

ERGDOM est original en ce qu'il doit utiliser des techniques d'apprentissage dont les résultats sont exploités par des modèles prédictifs, le tout exécuté en réel :

- on doit établir et utiliser un modèle de présence donnant à chaque instant la probabilité d'occupation par pièce : la pièce est occupée, sera occupée probablement dans un délai donné ou ne sera pas occupée,
- on doit établir et utiliser un modèle de comportement thermique pièce par pièce, pour fixer le moment où, dans la perspective d'une occupation prochaine, il faut anticiper les commandes,
- on doit établir un modèle des préférences de thermiques des usagers pour réguler le confort de manière personnalisée.

ERGDOM II est également original en ce qu'il doit gérer le confort toutes saisons en combinant toutes les possibilités d'actionnement : chauffage, climatisation, volets, ventilation, ensoleillement, selon une politique d'économie d'énergie gérée par une « logique décisionnelle » adaptée.

Les modèles de présence (MP), modèle thermique (MT), modèle de confort (MC), logique décisionnelle (LD) sont des fonctions constituantes du gestionnaire ERGDOM II. Ce sont des fonctions secondaires par rapport à la fonction principale de gestion du confort.

II.3.2.a Réalisation du diagramme

L'ensemble des services exigés par le cahier des charges de ERGDOM II est présenté dans le diagramme des cas d'utilisation de la figure 18. Pour des raisons de facilité de lecture, nous avons distingué un module de gestion du confort et un module de gestion du système.

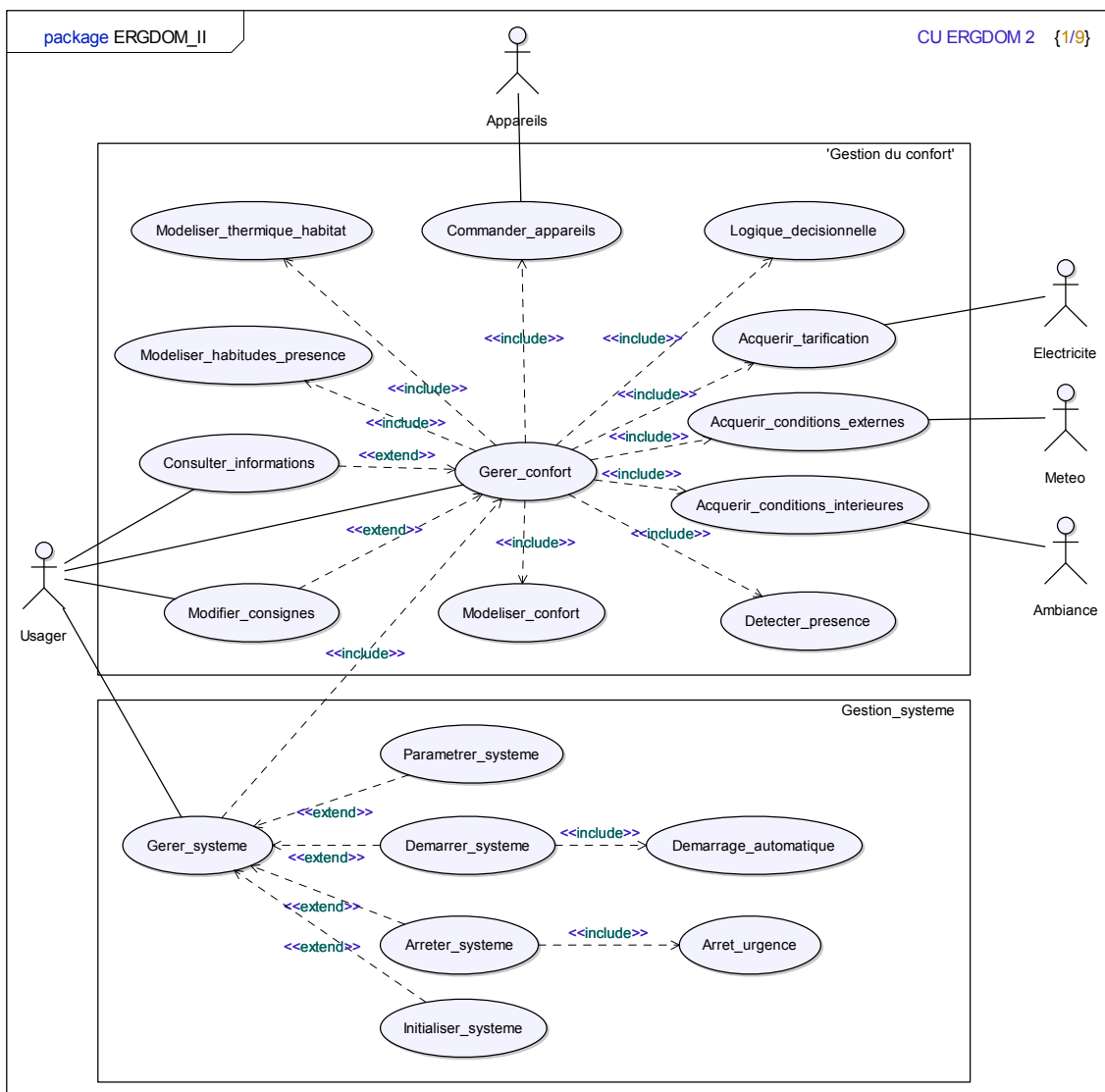


Figure 18 : Cas d'utilisation du système ERGDOM II.

Le diagramme des cas d'utilisation sert à compléter et à classifier les fonctionnalités déjà perçues dans le diagramme de contexte. Toutes les fonctionnalités du cahier des charges doivent être représentées et ce, à partir des exigences fonctionnelles.

Les cas d'utilisation constituent un élément essentiel de la modélisation orientée objet car ils permettent de construire un système adapté aux besoins des utilisateurs.

Leur rôle est essentiel puisqu'ils interviennent dans les phases d'analyse, de conception, d'implémentation, de tests et de déploiement. Ils identifient les besoins de l'utilisateur, notamment ceux qui sont réellement critiques pour la réussite du projet, et aident à clarifier les circonstances d'utilisation du produit.

Les relations entre cas d'utilisation sont :

- les relations « include », signifiant qu'un cas d'utilisation incorpore le comportement d'un autre cas d'utilisation en un point d'insertion bien déterminé,
- les relations « extend », signifiant qu'un cas d'utilisation de base englobe implicitement le comportement d'un autre cas d'utilisation en un point spécifié indirectement par le cas d'utilisation et qui étend le cas d'utilisation de base. Cela permet notamment de modéliser la partie des cas d'utilisation considérés par l'utilisateur comme facultative,
- Une relation entre un acteur et un cas d'utilisation suppose une interface de communication et d'échange d'informations entre l'acteur et le système.

Leur rôle est référent et leur portée couvre la quasi-totalité du cycle de développement. Afin de renforcer l'efficacité des principes préconisés par les processus unifiés (UP) et fiabiliser la cohérence des représentations UML successives, nous avons choisi de faire apparaître, au-delà des services, les principales exigences conceptuelles du système présentes dans le cahier des charges. L'intérêt majeur est de s'assurer au plus au niveau de la conception qu'ils seront pris en compte à chaque étape du cycle de développement puisque les UP centrés sur l'architecture sont conduits par les cas d'utilisation et pilotés par les risques. Il y a ainsi une large latitude de choix laissés au concepteur, dans l'organisation du système mais il faut, pour les cas d'utilisation principaux, « couvrir » exactement le cahier des charges.

Le diagramme des cas d'utilisation est accompagné d'un inventaire des messages échangés entre les acteurs principaux, les acteurs secondaires et les cas d'utilisation associés. Cet inventaire est présenté dans le tableau 6.

| <i>Cas d'utilisation</i> | <i>Acteur principal, acteur secondaire</i> | <i>Message(s) émis / reçus par les acteurs</i> |
|----------------------------------|--|--|
| Gérer système | Usager | <i>Reçoit</i> : messages textuels <i>Emet</i> : commandes système (démarrer/initialiser/ arrêter système, démarrer/arrêter gestion confort) |
| Gérer le confort automatiquement | Usager | <i>Emet</i> : occupation, dérogation |
| Modéliser habitudes présence | | <i>Emet</i> : probabilité d'occupation d'une pièce, <i>Reçoit</i> : historique de données d'occupation d'une pièce |
| Modéliser thermique habitat | | <i>Emet</i> : ambiance thermique estimée <i>Reçoit</i> : ambiance thermique, conditions météorologiques, commandes. |
| Modéliser confort | | <i>Emet</i> : paramètres d'ambiances confortables et inconfortables |
| Détecter présence | | <i>Emet</i> : détection de présence |
| Consulter informations | Usager | <i>Reçoit</i> : message de conseil pour la gestion des occupants |
| Modifier consignes | Usager | <i>Emet</i> : message (+3/-3 caractérisant l'inconfort), <i>Reçoit</i> : message d'acquiescement |
| Commander appareils | Appareils (climatisation, volets roulants, ventilation, convecteurs) | <i>Reçoit</i> : commandes |
| | Electricité | <i>Emet</i> : énergie, tarification |
| Logique décisionnelle | | <i>Reçoit</i> : consignes, occupation <i>Emet</i> : commandes |
| Acquérir conditions externes | Météo | <i>Emet</i> : T_{ext} , H_{ext} , R_{ext} , CO_{2ext} (vent ? pression ? selon les coûts économiques) <i>Reçoit</i> : requête |
| Acquérir ambiance | Ambiance | <i>Emet</i> : T_{int} , H_{int} , L_{int} , CO_{2int} <i>Reçoit</i> : requête |
| Acquérir tarification | Electricité | <i>Emet</i> : tarification EDF |
| Initialiser système | | <i>Reçoit</i> : commande (initialiser système) |
| Démarrer système | | <i>Reçoit</i> : commande (démarrer système) |
| Démarrage automatique | | <i>Reçoit</i> : commande (démarrer automatique) <i>Emet</i> : commande système (démarrer système) |
| Paramétrer système | | <i>Reçoit</i> : configuration matérielle |
| Arrêter système | | <i>Reçoit</i> : commande (arrêter système) |
| Arrêt d'urgence | | <i>Reçoit</i> : commande (arrêt urgence système) |

Tableau 6 : Liste des messages échangés entre acteurs et cas d'utilisation.

De cette description des cas d'utilisation, nous pouvons déduire une première architecture fonctionnelle détaillée et donnée dans la figure 19.

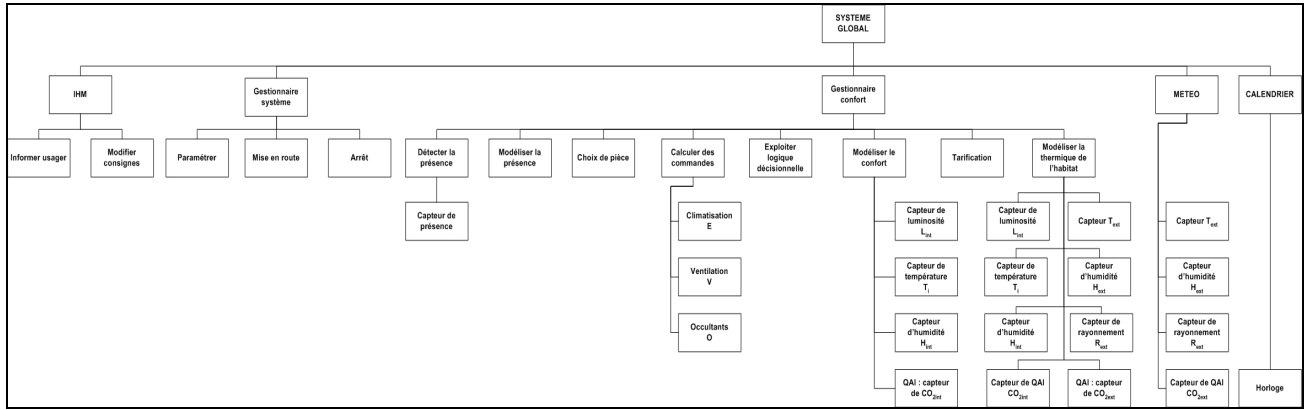


Figure 19 : Hiérarchisation des fonctions.

De plus, une description textuelle des enchaînements de chaque cas d'utilisation est élaborée sous forme d'une fiche textuelle décrivant les différents enchaînements et actions. Ces fiches de description sont présentées en annexe B. Le cahier des charges doit permettre la rédaction des fiches descriptives qui peuvent être complétées partiellement par le concepteur.

La synthèse générale des cas d'utilisation, détaillés en annexe B, est la suivante :

- Cas d'utilisation principaux :

- Gérer le confort

La gestion du confort, qui dans notre étude exploite le concept ERG-DOM, se base sur l'identification des préférences de l'utilisateur (modèle de confort), l'anticipation de la réaction thermique de l'habitat (modèle thermique) et la prise en compte de la présence de l'utilisateur dans les pièces (modèle de présence), pour calculer les commandes des appareils de régulation. Le calcul des commandes exploite un élément nouveau : un modèle de logique décisionnelle destiné principalement à réduire la consommation d'énergie en favorisant l'utilisation de certains appareils en fonction des conditions météorologiques observées.

- Gérer le système

L'utilisateur peut démarrer, initialiser et arrêter le système.

- Cas d'utilisation secondaires :

- Consulter les informations

L'utilisateur peut lire les informations transmises par le système : la température extérieure, la température intérieure et les messages d'aide à la conduite des occultants (lorsque le système ne peut piloter directement les occultants). Concernant la gestion des occultants, l'utilisateur lit la manœuvre à effectuer sur les ouvrants puis procède manuellement à l'ouverture ou la fermeture.

- Modifier les consignes

L'utilisateur, lorsqu'il a trop chaud ou trop froid, commande le système afin d'augmenter ou diminuer la température.

- Modéliser le confort
Les conditions de confort et d'inconfort ressenties par l'utilisateur sont identifiées de manière automatique à partir d'un historique de données mettant en évidence les habitudes de l'utilisateur.
 - Modéliser le comportement thermique de l'habitat
La modélisation thermique de l'habitat permet au système de prédire l'ambiance intérieure en fonction de la météo et des commandes appliquées aux appareils.
 - Modéliser les habitudes de présence
La modélisation des habitudes de présence de l'utilisateur dans chacune des pièces de l'habitat permet au système d'anticiper l'arrivée de l'utilisateur dans une pièce. Le système peut dès lors gérer l'ambiance pour que l'utilisateur ressente une sensation de confort dès son arrivée dans la pièce considérée.
 - Exploiter une logique décisionnelle
Une logique décisionnelle permet au système de calculer les commandes en fonction des consignes, de la présence et de la météo.
 - Arrêt d'urgence
On s'impose une procédure « arrêt d'urgence », précédée d'une alarme (AL), déclenchée lorsque les caractéristiques du système sortent de la norme (à définir) ou correspondent à certaines situations définies par le cahier des charges.
 - Démarrage automatique
On souhaite équiper le système d'une mise en route automatique, sous surveillance de l'utilisateur, pour arbitrer des interventions extérieures.
- Fonctions élémentaires :
 - Acquérir les conditions extérieures
Le système accède aux conditions météorologiques extérieures : température, humidité, rayonnement.
 - Acquérir l'ambiance intérieure
Le système gère les capteurs de température, d'humidité et de luminosité placés dans chaque pièce pour percevoir les conditions intérieures de confort.
 - Acquérir tarification
Le système interroge et reçoit, par l'intermédiaire d'un dispositif dédié, la tarification EDF d'une période donnée.
 - Paramétrer système
Le système est paramétré en fonction de la configuration du logement et de la configuration matérielle installée dans chaque pièce.

- Détecter présence

Le système gère les détecteurs de présence pour pouvoir percevoir l'occupation d'une pièce par l'utilisateur.

II.3.3 La définition des séquences

Les diagrammes de séquences précisent la logique séquentielle du système et les relations interfonctionnelles. Il y a à construire un, ou plusieurs, diagrammes de séquences par cas d'utilisation. 19 cas d'utilisation ont été identifiés (voir section II.3.2). Un diagramme de séquence a un début bien déterminé et une fin. La séquence fait apparaître les interactions entre les éléments sous forme d'échanges observables. Les messages échangés dans le diagramme de séquences entre les instances de modèle peuvent prendre la forme de : génération de signal (synchrone ou asynchrone), invocation d'opération (synchrone ou asynchrone) et création/destruction d'instances.

La construction des diagrammes de séquences suppose au préalable de définir les blocs, ou classes, qui vont interagir.

Dans les démarches classiques de conception, les blocs sont définis :

- Après avoir organisé les cas d'utilisation (*package de spécification fonctionnelle*) et identifier les classes candidates (*diagramme des classes participantes*), dans le cadre de la capture des besoins fonctionnels,
- Après avoir affiné les classes candidates (*diagrammes de classes complétés* par les associations, les attributs et les opérations et *diagrammes de collaboration*), dans le cadre de la conception du modèle statique.

Dans notre approche, nous cherchons à concevoir, avant tout, la logique de commande du système. La définition des blocs s'appuie ainsi sur le diagramme des cas d'utilisation qui, dans notre démarche, contient déjà les principaux aspects conceptuels du produit. Nous considérons ainsi un bloc (au minimum) par cas d'utilisation.

Pour élaborer le modèle dynamique, la plupart des démarches de conception identifient et formalisent des scénarios (à partir des *cas d'utilisation* et des *diagrammes des classes regroupées par catégorie*), élaborent les *diagrammes de séquence*, construisent les *diagrammes d'états* puis confrontent les modèles statiques et dynamiques et obtiennent les *diagrammes de classes complétés*. La finalité de cette méthode est un point fort puisque l'on obtient une description pertinente des blocs (attributs, opérations, associations, états, etc.). En revanche, de nombreuses itérations sont souvent nécessaires pour valider, d'une part, les *diagrammes de séquences* en fonction des *diagrammes d'états*, et pour confronter, d'autre part, les modèles statique et dynamique fortement couplés puisque l'un complète l'autre.

L'élaboration des diagrammes de séquences se base, dans notre approche, sur les cas d'utilisation (diagramme, fiche de description, etc.). Nous verrons par la suite qu'il est possible, une fois la logique de commande validée, de déduire en une seule itération les diagrammes d'états et la description détaillée des blocs.

Dans notre étude, le diagramme maître est évidemment celui du gestionnaire de confort.

Pour décrire le cas d'utilisation de la gestion du confort, nous partons d'un système mis en route et initialisé.

Considérons une pièce :

- 1 Le système interroge le module d'occupation des pièces : la pièce est vide, la pièce est occupée, la pièce va être occupée dans un prochain délai ou la pièce va être vide dans un prochain délai.
- 2 Le système va lire la température T_i et l'humidité H_i
- 3 La pièce est vide et restera vide : le système vérifie que la température T_i et l'humidité H_i correspondent aux consignes du programme et de ses contraintes sécuritaires par interrogation de la grille de décision (GLV),
- 4 La pièce est occupée, le système applique selon T_i , les consignes de la grille de décision (GLO) : chauffer ou refroidir.
- 5 Chacun de ces choix implique un arbitrage des actionneurs disponibles selon les consignes de la grille de décision (GLAC).
- 6 La pièce va être occupée dans un délai estimé à Δt : le système va choisir entre les solutions 3 et 4 selon un critère de comparaison de Δt avec les données du modèle thermique (GLP)

Le système fonctionne de manière cyclique, toutes les 15 minutes.

On voit que les séquences du système pièce par pièce sont relativement simples : (P) présence, (T_i) température interne, (T_e) température externe et consignes (AVIS), (GL) grille logique, (AC) actionneurs. L'intelligence du système se trouve dans les modèles :

- Modèles de présence :

Grâce aux capteurs de présence placés dans chaque pièce, on peut tenir compte du tableau d'occupation par cycle (15 min) [Edf06b]. ERGDOM doit construire ce tableau, en différenciant chaque jour de la semaine, cycle après cycle. L'idée originale est surtout de mettre sur cette construction une procédure d'apprentissage permettant d'estimer la probabilité de présence, lorsque la présence effective n'est pas mesurée et anticiper l'arrivée de l'occupant dans un environnement confortable. Les capacités de prédiction peuvent être, bien sûr, améliorées et porter sur des périodes de vacances si elles sont répétitives.

- Modèle thermique :

Le modèle thermique est là pour :

- donner un modèle thermique de la pièce permettant d'anticiper les réponses temporelles aux actionnements : énergétique, ensoleillement, ventilation et climatisation.

- Modèle de confort :

Le modèle de confort a pour rôle de :

- donner un modèle personnalisé du confort humain. Ce modèle résulte d'une analyse historique des réactions de l'occupant (AVIS), dans un environnement connu (horaire, météo) prenant en compte la température, l'humidité et la ventilation : l'originalité de ERGDOM est ici d'apprendre de l'occupant ses habitudes de confort thermique et de la

programmer par défaut en exploitant l'abaque 'Humidex' [Humi04]. Les habitudes de confort qui sont considérées concernent : les pièces occupées par l'utilisateur (mode 'confort'), et les pièces temporairement inoccupées lorsque l'utilisateur est dans l'appartement (mode 'réduit').

- donner une consigne pour la régulation de confort : c'est une température et une humidité $\{T_c, H_c\}$ qui fixe l'ambiance intérieure à atteindre.

- Logique décisionnelle : la logique décisionnelle est le cœur du système ERG-DOM II dédié au choix des actionneurs et au calcul des commandes de chaque appareil en fonction d'une politique économe en énergie.

II.3.3.a Les diagrammes de séquences rapportés aux cas d'utilisation

Les diagrammes de séquences des figure 20 et figure 21 présentent les interactions entre les différents éléments du système, chaque échange et les différents traitements pour assurer la « Gestion du confort ». Sont ainsi présentés dans cette section les séquences essentielles au fonctionnement de ERGDOM II. Les diagrammes de séquences correspondant aux autres cas d'utilisation sont présentés en annexe B.

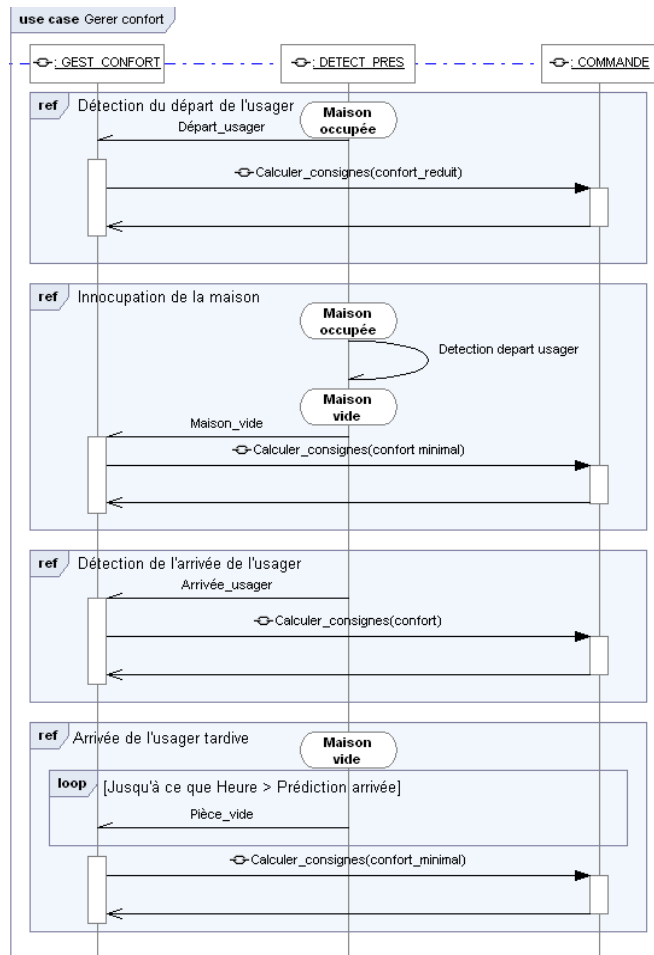


Figure 20 : Séquences : événements asynchrones liés à la présence de l'utilisateur.

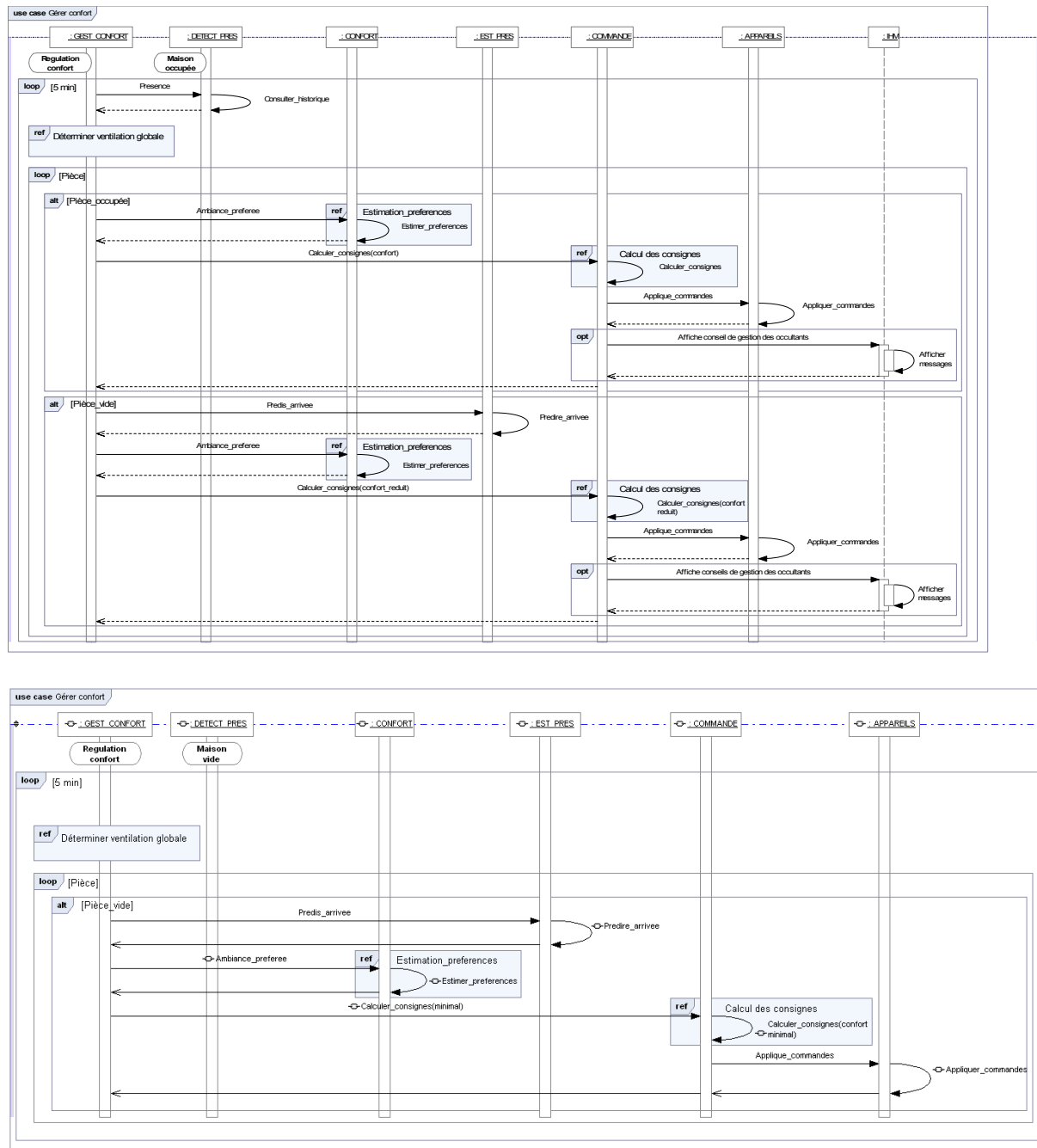


Figure 21 : Séquences : boucle principale de régulation.

La figure 21 détaille les principaux éléments interagissant dans la boucle principale de gestion du confort. Dans cette figure, deux cas sont représentés pour calculer les commandes en fonction de la présence de l'occupant dans la maison. Lorsqu'il est présent, le modèle de confort est interrogé avant d'effectuer le calcul des commandes. Lorsqu'il est absent, l'estimateur de présence et le modèle de confort sont interrogés successivement dans un objectif d'anticipation de l'arrivée de la personne avant de procéder au calcul des commandes. Ainsi, les tâches attribuées à chaque élément du système sont clairement identifiées. Les diagrammes de séquences explicitent naturellement les enchaînements des actions et commandes, et peuvent constituer la base d'une première validation des principes de la solution logique par les acquéreurs et autres parties prenantes.

II.3.4 La modélisation de la logique de commande

Le diagramme d'activités synthétise les actions successives effectuées par le système. Comme cité section II.3.2.a , le diagramme d'activités consolide la spécification des cas d'utilisation. Ne sont ainsi conservés dans les diagrammes d'activités que les aspects « logique de commande ».

Chaque cas d'utilisation est représenté par une 'activité' SYSML. Une activité est un comportement paramétré dont les séquencements sont organisés sur la base d'unités subordonnées dont le nœud final est l'action. Les activités peuvent former une hiérarchie fonctionnelle par invocation des sous-activités. Nous élaborons les diagrammes d'activités sur la base des diagrammes de séquences correspondant. La figure 22 montre le diagramme d'activité correspondant aux cas d'utilisation « Gestion du confort ». On y distingue la gestion des états de la régulation, les processus asynchrones déclenchant la régulation (en fonction des nouvelles consignes, des déplacements de l'occupant, d'un timer) et la boucle de régulation interagissant avec les différents modules du système.

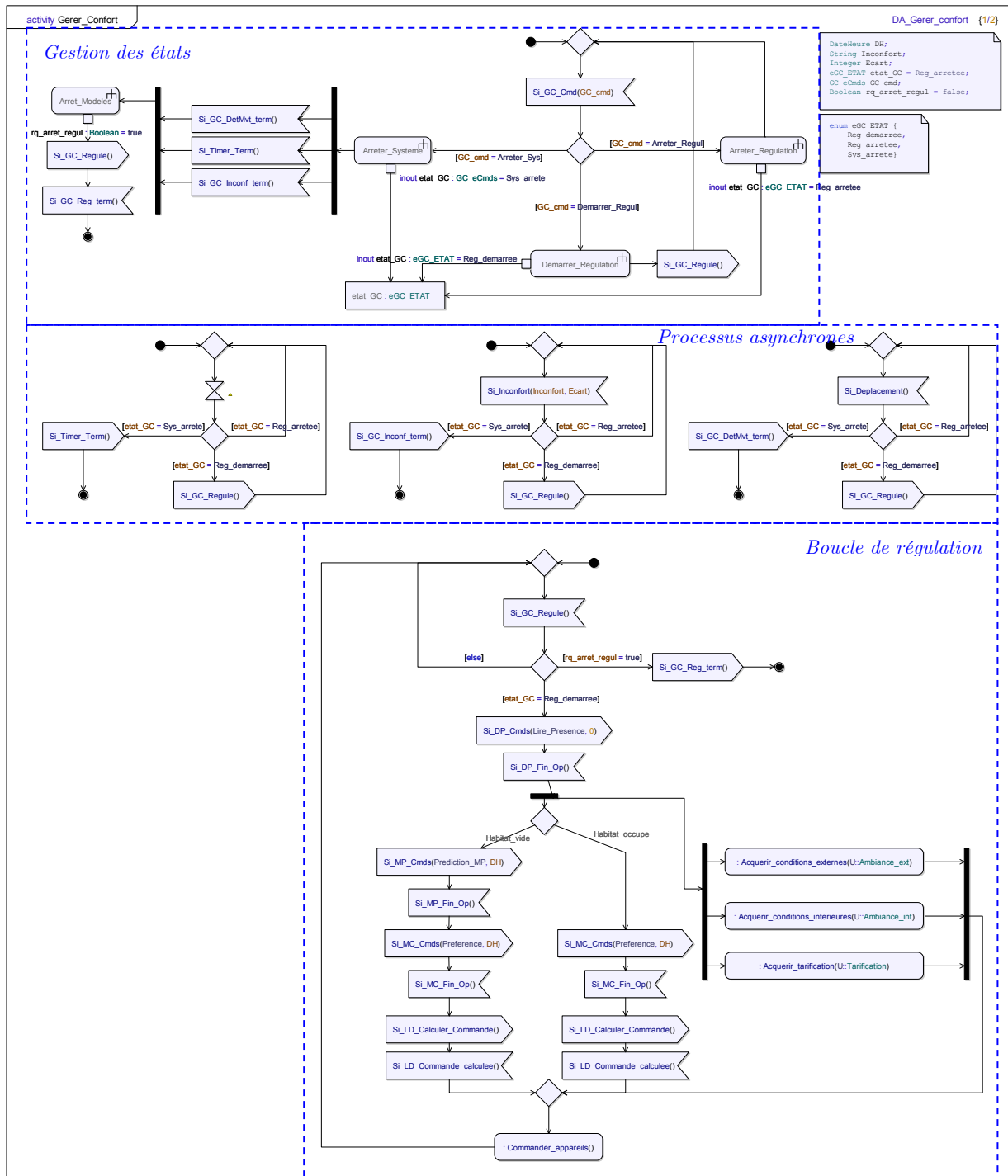


Figure 22 : Activité : « Gérer confort ».

II.3.5 La transformation du modèle SYSML au modèle HiLes

La solution logique est la représentation d'une solution fonctionnelle vérifiable. Elle permet de simuler :

- la logique de fonctionnement,
- la temporisation du système.

Elle laisse ouvert :

- les actionnements en sous-ensembles « physiques »,
- les technologies des constituants, des assemblages et du conditionnement général,
- l'organisation du réseau de données au sens où les interactions ont été identifiées mais sur la gestion proprement dite des données, aucune décision n'est prise.

II.3.5.a Le formalisme HiLes

Le processus de conception, qui conduit à définir successivement l'ensemble des différentes fonctions à réaliser et les comportements de différentes activités, se base dans cette étude sur l'extension des Réseaux de Petri (RdP) manipulant le paramètre temps : les Réseaux de Petri temporels (RdPT). Les RdPT sont une extension des Réseaux de Petri qui associent à chaque transition, deux dates *min* et *max*, précisant l'intervalle temporel de sensibilisation. Le principe est que si par exemple une transition *t* est devenue sensibilisée pour la dernière fois à la date *d*, *t* sera à nouveau tiré dans un intervalle de temps appartenant à $[d+min, d+max]$.

Un Réseau de Petri est un graphe orienté composé d'un ensemble fini :

- de places, qui modélisent les conditions : ressources et états des ressources,
- de transitions, qui caractérisent l'occurrence d'événements externes et internes au système,
- d'un marquage initial, précisant un certain nombre de jetons dans des places choisies du réseau afin de fixer les conditions initiales.

Les caractéristiques d'une fonction reprise par le formalisme HiLes font apparaître :

- La commande du bloc par réseau de Petri,
- Un délai temporel Δ_t sensé représenter le temps consacré à réaliser la fonction.
- La branche du Réseau de Petri déclenche les algorithmes de calculs avec un délai caractéristiques du réseau de communication (protocole) et de la fonction à réaliser :
 - temps moyen d'accès à l'information $\Delta_{t_{acc}}$
 - temps moyen d'exécution du pas de calcul $\Delta_{t_{cal}}$
 - temps moyen de diffusion des résultats $\Delta_{t_{diff}}$
 - temps moyen de démarrage et d'arrêt de l'action $\Delta_{t_{top/stop}}$

Le délai total va donc être : $\Delta_t = \Delta_{t_{acc}} + \Delta_{t_{cal}} + \Delta_{t_{diff}} + \Delta_{t_{top/stop}}$

- L'algorithme de calcul est différencié de la logique de commande : cette propriété exploitée permet de faire de la modélisation hétérogène multidisciplinaire.

Dans notre procédure, seule la logique de commande peut et doit être vérifiée (par l'outil approprié TINA à l'analyse des Réseaux de Petri) :

- propriétés générales du système et du Réseau de Petri conçu,
- propriétés logiques caractéristiques de bon fonctionnement du réseau (questions/réponses).

II.3.5.b La transformation des activités SYSML au modèle HiLes

Dans cette phase de notre démarche, nous transformons les diagrammes d'activités définis selon le formalisme SYSML, en un modèle hiérarchique HiLes à partir de règles conservatives des propriétés de ces deux formalismes. Le formalisme HiLes [Hiles] et l'outil associé apportent leur représentation possible dans la solution logique, par les transformations suivantes :

- Chaque fonction devient un bloc fonctionnel, avec des ports d'entrées et des ports de sorties.
- Chaque activité devient un bloc structurel dont la logique est représentée par un Réseau de Petri qui commande notamment :
 - sa mise en route,
 - sa durée de réalisation dans la fonction,
 - son signal de fin.

i) Le méta-modèle HiLes

Les modèles HiLes sont composés de blocs structurels et de blocs fonctionnels reliés entre eux par des canaux de communication permettant d'échanger trois types d'informations : données continues, données discrètes et signaux de synchronisation.

Les particularités sont :

- Un bloc structurel peut être composé de blocs structurels, de blocs fonctionnels et d'un réseau de Petri,
- Un bloc fonctionnel est un nœud terminal dans lequel se trouve le code de la fonction : le langage de programmation associé reste ouvert (C, C++, Basic, Java, etc.) même si l'implémentation actuelle supporte le VHDL-AMS pour des objectifs de simulations déjà expérimentés [Guil07],
- La hiérarchie du modèle, correspondant à la composition des blocs structurels est organisée en niveaux et permet au concepteur de travailler sur différents niveaux d'abstraction du modèle.

Pour permettre la transformation exogène du modèle SYSML vers le modèle HiLes, nous devons travailler sur leurs méta-modèles. Le méta-modèle HiLes présenté figure 23 est basé sur la première définition donnée par [Guil07] mais introduit en plus les notions de port de communication et de signal de commande (qui peuvent être des données ou des commandes par réseau de Petri).

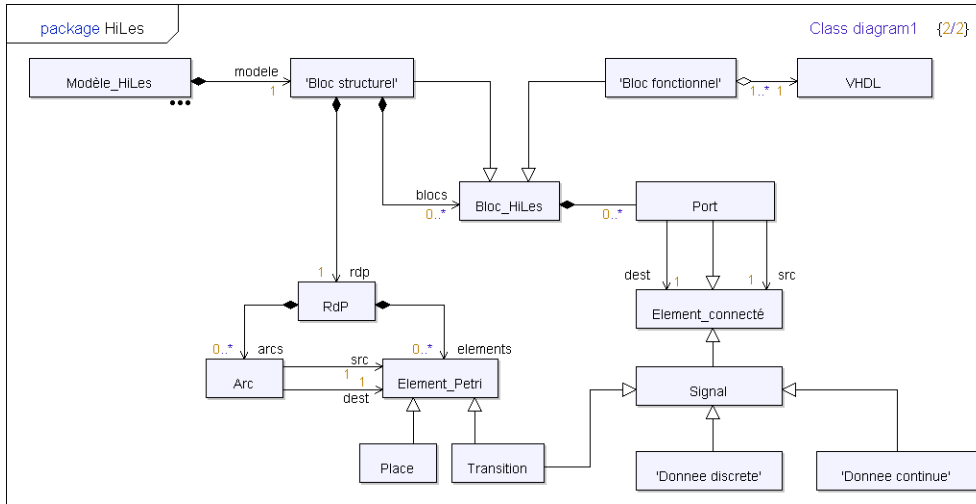


Figure 23 : Méta-modèle HiLes.

Nous retrouvons donc les quatre principes du formalisme HiLes :

- Un modèle HiLes est un bloc structurel,
- Un bloc structurel est composé : de blocs structurels, de blocs fonctionnels et d'un réseau de Petri,
- Les blocs structurels et fonctionnels peuvent échanger des signaux par l'intermédiaire de port de communication,
- Les signaux d'entrée/sorties sont des données discrètes, des données continues et des signaux de commandes.

Ce méta-modèle sert de support à l'établissement des règles de transformation exogène des diagrammes d'activités au modèle HiLes.

ii) Règles de transformations exogènes

Des nœuds d'activités au réseau de Petri

Selon le formalisme SYSML, l'activité permet de représenter un comportement défini par plusieurs actions successives, sous forme de séquences et sous forme parallèle. Trois types de nœuds, reliés entre eux par des arcs, sont à considérer : les nœuds de contrôle, les nœuds d'exécution et les nœuds objets. L'exécution d'un nœud est conditionnée par l'exécution des nœuds précédents selon le principe de flot de jetons.

La transformation des activités en Réseau de Petri se base sur des règles simples, décrites dans le tableau 7, qui ont été élaborées de manière à conserver le principe de flot de jetons. Rappelons que les nœuds à considérer en UML sont les nœuds : initial, fin d'activité, action, interclassement, décision, bifurcation, union, temporisation, transmission de message et réception de message.

| Nœud | Description en UML | Transformation en RdP |
|-------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Etat initial | | |
| Etat final | | |
| Action | | |
| Interclassement | | |
| Bifurcation | | |
| Union | | |
| Emission de signal | | |
| Réception de signal | | |
| Temporisation | | |
| Décision | | |
| Lecture d'une variable énumérative | | |
| Ecriture d'une variable énumérative | | |

Tableau 7 : Règles de transformation des activités aux Réseaux de Petri.

Des activités à la hiérarchie des blocs structurels et fonctionnels

L'exploitation des règles de transformation permet de transcrire automatiquement un diagramme d'activité en un Réseau de Petri temporisé. Dans le formalisme HiLes, nous avons vu section II.3.5 qu'une activité devient un bloc structurel. La hiérarchie structurelle résultante des blocs se déduit automatiquement (tableau 8) des informations échangées entre activités (signaux et appels de procédure) à partir des règles suivantes :

- Pour les sous-activités : l'arc dirigé vers la sous-activité, en SYSML est, dans le RdP, connecté vers le nœud 'initial' de la sous-activité. De la même façon, le nœud 'final' de la sous-activité est relié à la transition connectée au nœud successeur,
- Pour les messages : une place intermédiaire par récepteur ainsi que 2 arcs associés sont créés de manière à coupler l'émetteur et le récepteur du message.

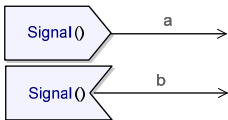
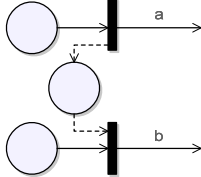

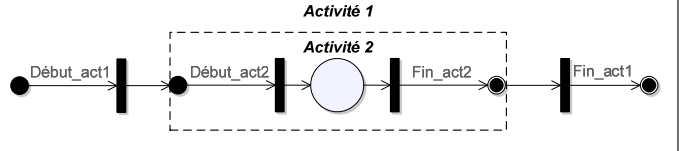
| Type de relation | Description en UML | Transformation en RdP |
|-------------------|---|--|
| Messages |  |  |
| Appel d'activités |  |  |

Tableau 8 : Règles de connexion entre les blocs structurels HiLes.

II.3.5.c Le modèle HiLes de la solution logique de ERGDOM II

La transformation des activités SYSML sous HiLes montre que les diagrammes d'activités deviennent des blocs structurels HiLes. La hiérarchie structurelle du modèle de Ergdom II est conforme à la description fonctionnelle présentée figure 19 et montre une architecture décomposée en 4 niveaux. Dans cette section, les blocs structurels sont présentés conformément à la hiérarchie HiLes (figure 24), en partant du niveau le plus amont jusqu'au niveau le plus bas. Les abréviations utilisées sont présentées annexes. Notons qu'au niveau 0, le système Ergdom II est en relation avec le bloc 'Environnement' dédié à la gestion des commandes système.

i) Diagramme hiérarchique du modèle HiLes

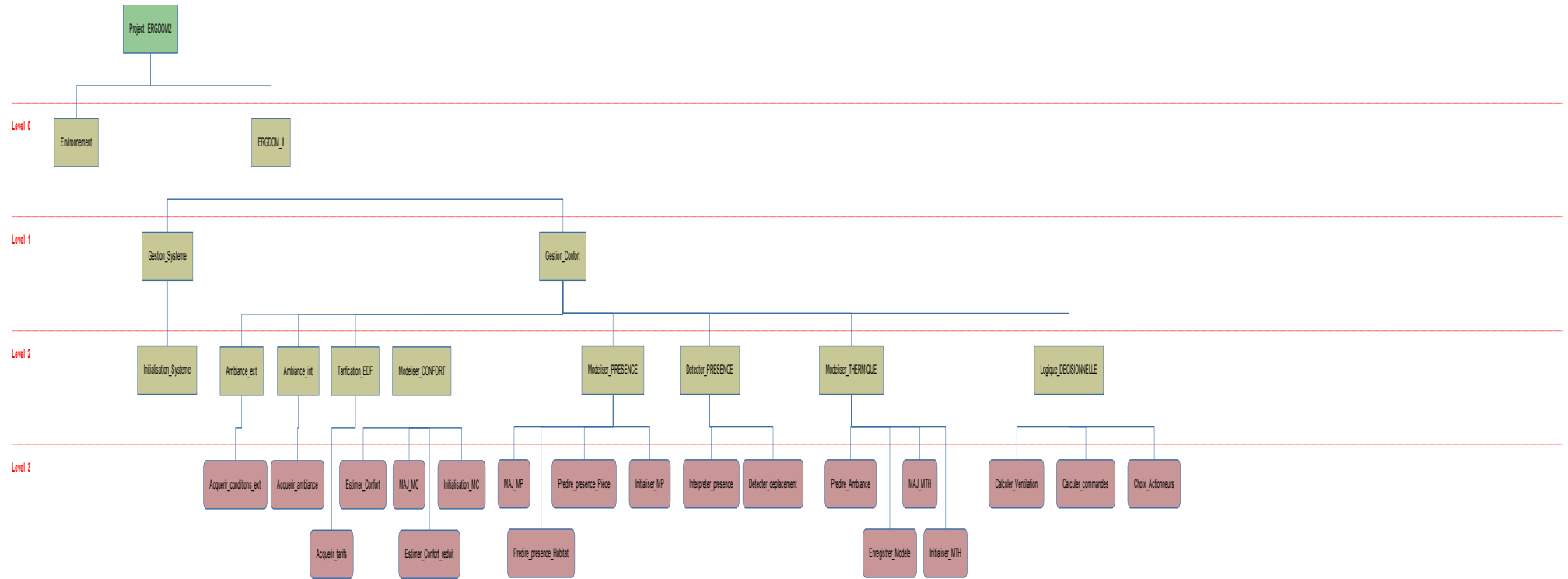


Figure 24 : Diagramme hiérarchique du modèle HiLes.

ii) Niveau 0

La représentation amont du système ERGDOM II du modèle HiLes représente le système et son environnement (illustré figure 25).

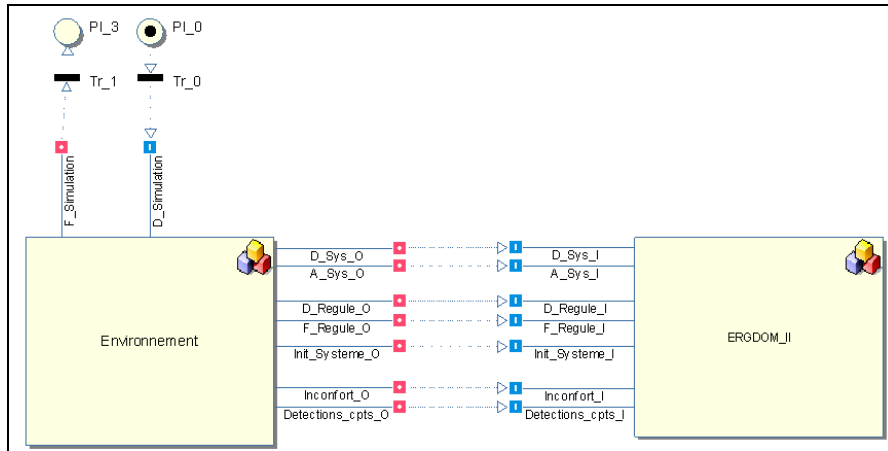


Figure 25 : Niveau 0 du « modèle ERGDOM II ».

iii) Niveau 1

Le premier niveau du système ERGDOM II, conformément à la hiérarchie des diagrammes d'activités, représente les interactions entre le « gestionnaire de confort » et le « gestionnaire du système » tels que illustré figure 26.

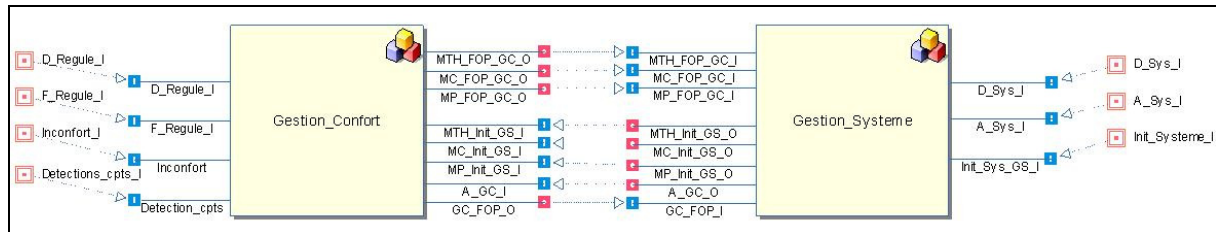
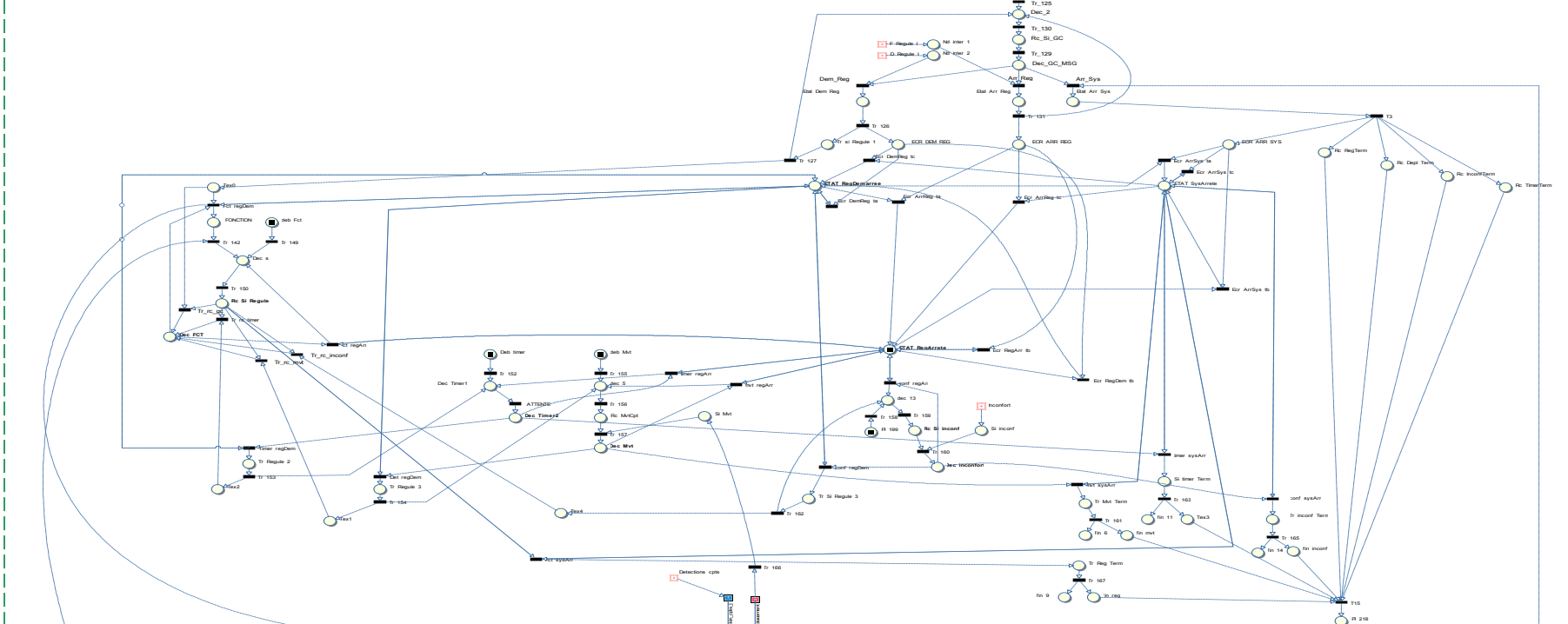


Figure 26 : Bloc « ERGDOM II ».

iv) Niveau 2

Le niveau présente les différents blocs structurels des composants « Gestion confort » et « Gestion système ». L'ensemble de la hiérarchie est détaillé annexe C.3. Nous présentons le bloc « Gestion Confort » dans la figure 27 où l'on distingue bien la boucle de régulation, de la partie commande. Nous pouvons également remarquer que l'exploitation de variables d'états augmente la complexité du Réseau de Petri associé.

Gestion des commandes (états et signaux asynchrones)



Boucle de régulation

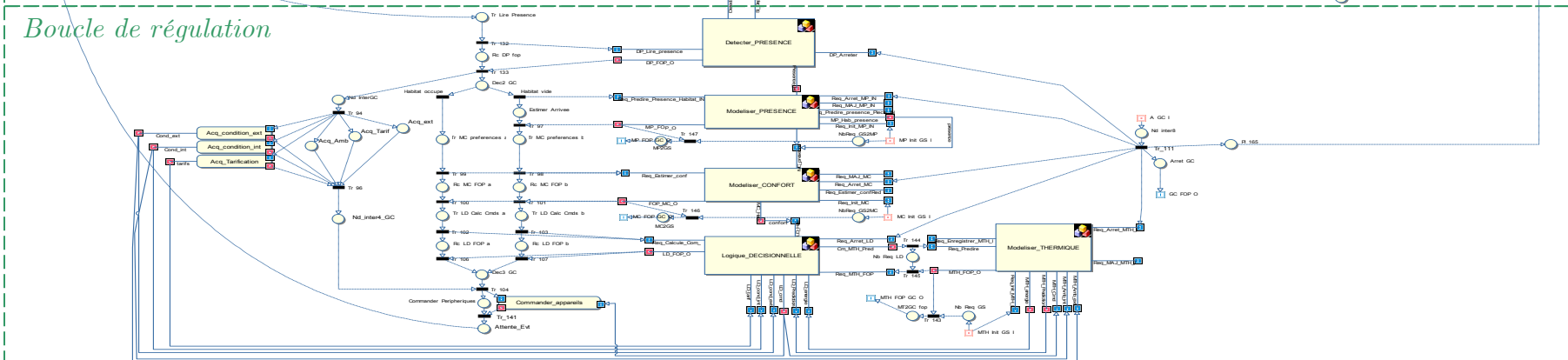


Figure 27 : Bloc « Gestion confort ».

II.3.6 La vérification formelle de la logique de commande par TINA

L'outil TINA [TINA] offre plusieurs alternatives de vérification formelle des propriétés des RdP selon deux types de vérifications : l'analyse structurelle et l'analyse comportementale. L'étude se focalise principalement sur l'aspect dynamique du RdP qui, appliqué à la logique système va permettre de valider la stabilité du système ainsi que certaines propriétés issues du cahier des charges.

II.3.6.a Les critères d'analyse

Cette section a pour but de définir et d'expliciter les critères que nous avons retenus pour l'analyse des RdP modélisant les systèmes complexes. Nous distinguons les critères permettant l'analyse de tout type de systèmes technologiques complexes, des critères spécifiques, tirés du cahier des charges de ERGDOM II, précisant le comportement attendu.

Chacune des structures du Réseau de Petri doit satisfaire certaines propriétés. Nous nous intéressons principalement aux critères : borné, vivant, bloqué :

- Par définition, une place est dite bornée pour un marquage initial M_0 , si pour tout marquage accessible à partir de M_0 , le nombre de jeton reste borné. Le caractère non borné d'un Réseau de Petri esquivant à une instabilité dans une logique de commande. Ainsi et quelque soit les notions modélisées (synchronisation, partage de ressource, capacité limitée, mémorisation, parallélisme, etc.), tous les blocs structurels doivent être bornés.
- Un Réseau de Petri est vivant si pour tout marquage accessible M , et pour toute transition t , il existe une séquence de franchissements partant de M et contenant t . Le réseau est quasi-vivant si quelques transitions restent franchissables. Le critère vivant, ou quasi-vivant, met en évidence l'aptitude d'un composant ou d'un système à être disponible ou opérationnel. Pour les composants dont la tâche consiste à assurer un service (Modèles thermiques, confort, etc.), il prouve leurs capacités à être actifs pendant le fonctionnement nominal du système.
- Un blocage se dit d'un marquage à partir duquel aucune transition ne peut être franchie. Le critère bloqué met en évidence les états terminaux du cycle de fonctionnement du système. Plus précisément, lorsque l'on applique ce critère à l'analyse du comportement général d'un système technologique, le ou les états bloqués doivent succéder à la commande 'arrêt du système'. Les états bloqués doivent être volontairement modélisés par le concepteur en fonction des exigences.

Concernant les structures sans blocage, où une infinité de transitions sont possibles, nous sommes amenés à étudier des propriétés sur les séquences de transitions et les marquages accessibles : le conservatisme et la répétitivité.

- Un Réseau de Petri est conservatif si pour un ensemble de places P' incluses dans P (l'ensemble des places), la somme des jetons du marquage est constante. Le critère conservatif est utile dans des cas particuliers où l'on souhaite vérifier qu'un RdP ne contient ni fuite, ni trappe. Par exemple, la boucle de régulation de ERGDOM II, déclenche une succession de fonctionnalités par

propagation d'un unique jeton qu'il est capital de conserver pour assurer la stabilité de la séquence.

- La répétitivité se dit d'une séquence qui est répétitive. Par exemple, la boucle de régulation doit pouvoir être exécutée à tout instant pendant le fonctionnement nominal du système.

L'exploitation de ces critères pour l'analyse des différents types de blocs structuraux HiLes est détaillée section II.2.

II.3.6.b La méthodologie de validation

L'analyse des propriétés du système s'effectue par étapes successives en validant progressivement les blocs HiLes du niveau le plus bas de la hiérarchie HiLes (figure 24) au niveau le plus haut. L'étude des résultats consiste à étudier le graphe de couverture du RdP.

i) Les propriétés générales

La procédure de validation de chaque bloc structurel se compose en deux phases afin de valider d'une part, le fonctionnement nominal de la structure, et d'autre part, le cycle général de fonctionnement :

- Pour le fonctionnement nominal, un jeton est placé dans chaque place correspondant à une commande (mise à part la commande « Arrêt »). Les résultats doivent aboutir à un Réseau de Petri toujours borné et quasi-vivant pour les blocs correspondant aux différents modèles certifiant ainsi la disponibilité des composants.
- Pour le cycle général de fonctionnement, un jeton est placé de manière à déclencher la commande « Arrêt ». Les résultats obtenus doivent certifier un Réseau de Petri bloqué dans les places associées aux états finaux.

Le comportement global du système est analysé en fonction des commandes envoyées par le bloc « Environnement ». Deux scénarios sont étudiés :

- Scénario 1 : Démarrer système – Initialiser - Démarrer régulation – Arrêter régulation – Arrêter système.
- Scénario 2 : Commandes aléatoires (équivalent à un « crash test »).

Les résultats doivent aboutir à un RdP borné et bloqué. Notons qu'au plus haut niveau, plusieurs scénarios de commande peuvent être étudiés en paramétrant le bloc structurel 'Environnement'.

ii) Les propriétés spécifiques du cahier des charges

A partir du cahier des charges, plusieurs exigences relatives aux contraintes temporelles et exigences comportementales peuvent être vérifiées par l'intermédiaire des réseaux de Petri. Dans notre étude, le cahier des charges ne mentionne qu'une seule exigence relative au comportement du système :

- La régulation doit s'effectuer au maximum toutes les 15 minutes.

Cette propriété est vérifiée par analyse temporelle détaillée de la séquence temporelle de la boucle de régulation.

II.3.6.c La vérification formelle

i) Principe

L'outil TINA est paramétré de manière à obtenir le graphe de couverture (voir figure 28). Les résultats sont enregistrés dans un fichier caractérisant toutes les propriétés du RdP analysé et il y a autant de vérifications, selon les deux types de scénarios explicités section II.3.6.b , à faire que de blocs structurels.

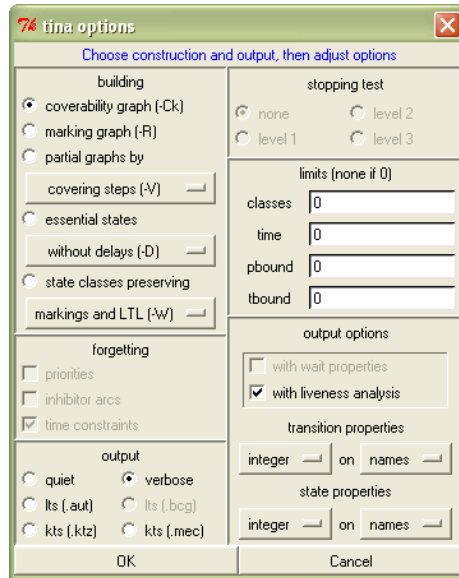


Figure 28 : Paramétrage de l'outil TINA.

ii) Synthèse

Les résultats des analyses des blocs structurels sont synthétisés dans le tableau 9 et le tableau 10. Le premier correspond à un marquage initial dédié à l'analyse du fonctionnement nominal par saturation des commandes. Le second tableau correspond à l'analyse du cycle de fonctionnement général en déclenchant la commande « Arrêt ».

| Niveau | Blocs structurels | Critères | | | | | Validation |
|--------|-------------------|----------|--------------|--------|-------------|-----------|------------|
| | | Borné | Quasi-vivant | Bloqué | Conservatif | Répétitif | |
| 2 | IS | ☑ | | | | | ☑ |
| 2 | AE | ☑ | | | | | ☑ |
| 2 | AI | ☑ | | | | | ☑ |
| 2 | TE | ☑ | | | | | ☑ |
| 2 | MC | ☑ | ☑ | | | | ☑ |
| 2 | MP | ☑ | ☑ | | | | ☑ |
| 2 | MT | ☑ | ☑ | | | | ☑ |
| 2 | DP | ☑ | ☑ | | | | ☑ |
| 2 | LD | ☑ | | | | | ☑ |
| 1 | GS | ☑ | ☑ | | | | ☑ |
| 1 | GC | ☑ | ☑ | | ☑ | ☑ | ☑ |
| 0 | ERGDOM II | ☑ | ☑ | | ☑ | ☑ | ☑ |

Tableau 9 : Propriétés des blocs HiLes : fonctionnement nominal.

| Niveau | Blocs structurels | Critères | | | | | Validation |
|--------|-------------------|----------|--------------|--------|-------------|-----------|------------|
| | | Borné | Quasi-vivant | Bloqué | Conservatif | Répétitif | |
| 2 | IS | ☑ | | | | | ☑ |
| 2 | AE | ☑ | | | | | ☑ |
| 2 | AI | ☑ | | | | | ☑ |
| 2 | TE | ☑ | | | | | ☑ |
| 2 | MC | ☑ | | ☑ | | | ☑ |
| 2 | MP | ☑ | | ☑ | | | ☑ |
| 2 | MT | ☑ | | ☑ | | | ☑ |
| 2 | DP | ☑ | | ☑ | | | ☑ |
| 2 | LD | ☑ | | | | | ☑ |
| 1 | GS | ☑ | | ☑ | | | ☑ |
| 1 | GC | ☑ | | ☑ | | | ☑ |
| 0 | ERGDOM II | ☑ | | ☑ | | | ☑ |

Tableau 10 : Propriétés des blocs HiLes : cycle général de fonctionnement.

II.3.7 L'intégration de la gestion des données

La modélisation HiLes, fixe déjà point à point la nature des échanges informationnels entre blocs. Le concepteur va pouvoir optimiser cela :

- par la mise en œuvre si nécessaire de liaisons continues, ou discrètes, entre certains blocs,
- par le choix d'un BUS et d'un protocole d'échange,
- par la structuration des données, dans une base de données.

II.3.7.a La description des données

Dans le diagramme des classes présenté figure 29, tous les types et les structures de données sont définis. Les structures de données (représentées par des blocs) sont reliées entre elles par des associations (les flèches) ainsi que des éléments de composition (les losanges).

Le diagramme des classes constitue un patron structuré des données dont les valeurs et les instanciations sont paramétrés dynamiquement en fonction : de la configuration de l'appartement considéré et des dispositifs matériels exploités par le système.

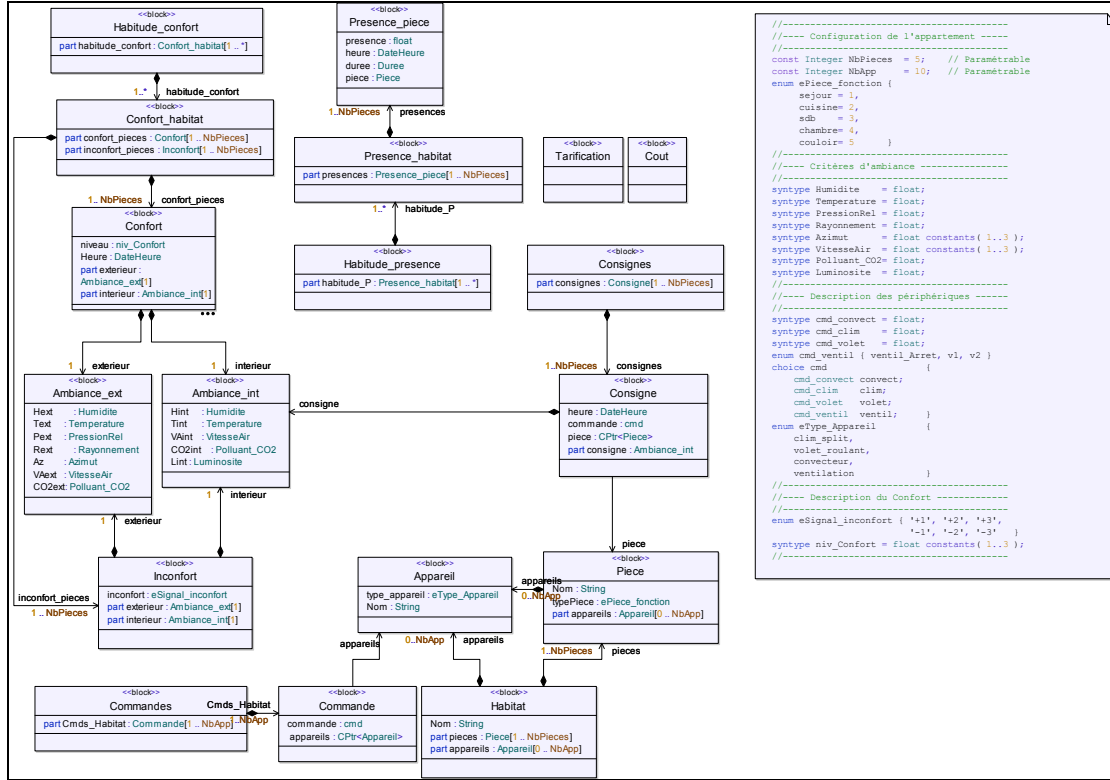


Figure 29 : Description des données.

Toutes les notions informationnelles du cahier des charges relatives aux données sont représentées. Notons que les diagrammes des classes permettent d'exprimer de nombreux concepts, notamment par la notion d'héritage, qui ne sont pas nécessaires dans la description des données structurées. Précisons toutefois les classes essentielles :

- Confort_habitat : Notion de confort pour toutes les pièces de l'habitat,
- Presence_habitat : Notion de présence pour toutes les pièces de l'habitat,
- Consignes : Ensemble des consignes pour toutes les pièces de l'habitat,
- Commandes : Ensemble des consignes pour tous les dispositifs de l'habitat.

II.3.7.b L'intégration des données dans les activités

Les données sont insérées dans les diagrammes d'activités de la manière suivante :

- à chaque action, ou activité, produisant une donnée, un port sortant est ajouté,
- à chaque action, ou activité, consommant une donnée, un port entrant est ajouté.

Les activités génératrices et consommatrices d'un même type de données sont reliées par un arc orienté du producteur vers le consommateur. En cas de choix multi-

ples, le concepteur définit les connexions. Ainsi, les diagrammes d'activités définis sections C.2, sont complétés par les nœuds objets.

Les fonctions consommatrices et productrices de données sont munies de ports d'entrée ou sortie. Les échanges de données inter-activités sont effectués au travers de ports placés en bordure des diagrammes d'activités et connectés aux fonctions correspondantes tel que illustré figure 30.

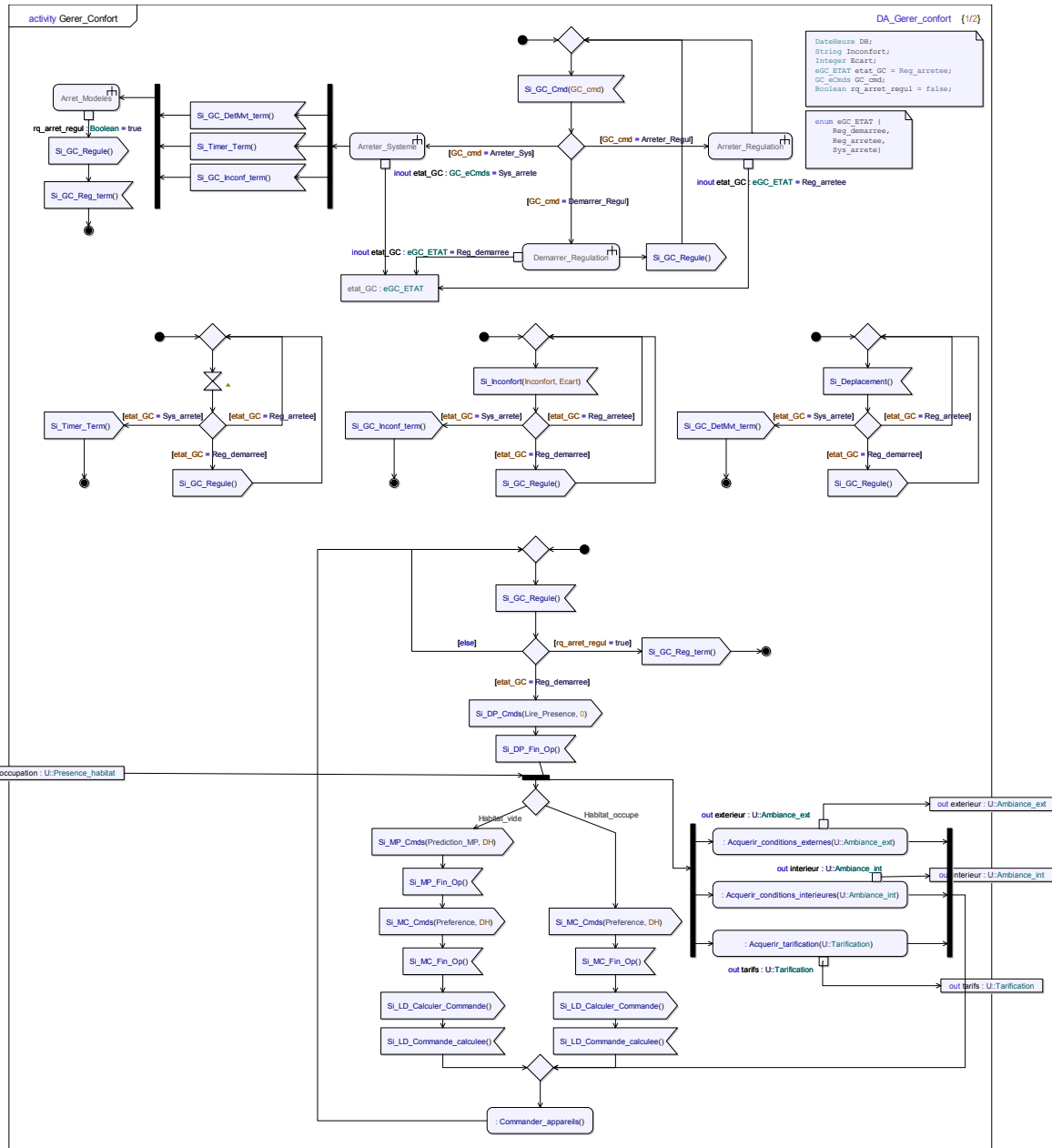


Figure 30 : Activité : « Gérer confort ».

II.3.7.c Le modèle HiLes de la solution logique

Suite à la vérification de la logique du système, la transformation des diagrammes d'activités intégrant les données devient aisée. En effet, sur la base des diagrammes d'activités présentés section II.3.7.b , les blocs structurels sont modifiés par l'ajout

d'un port de communication sur chacun des blocs s'ils produisent ou consomment une donnée. Les ports sont configurés en mode 'entrée' ou 'sortie' selon que le bloc structurel, ou fonctionnel, produit ou consomme la donnée. Les données échangées entre les différents éléments du système sont discrètes et conformes au diagramme des classes présenté figure 29. Tout port (entrée ou sortie d'une donnée) doit ainsi être connecté à un, ou plusieurs, ports correspondant à la transmission et la réception de la donnée. Cette étape met en évidence la complémentarité des blocs par l'échange des informations. Les blocs structurels du modèle HiLes manipulant des données sont présentés annexe C.3

II.4 L'établissement du modèle physique selon les recommandations de l'EIA-632

La solution physique, une fois vérifiée, est référente :

- elle sert de base à l'écriture des spécifications de chacune des fournitures,
- elle sert de base à l'écriture des tests pour chacune de ces fournitures.

Les exigences techniques, issues du cahier des charges et des choix stratégiques de développement, induisent une configuration matérielle et logique du produit final. De nature géographiques, organisationnelles et technico-économique, elles définissent et traitent des aspects : performances, sécurité, interopérabilité, volumétrie, intégration, etc. et doivent pouvoir être représentées tout au long du processus de conception. C'est donc sur la base du modèle logique vérifié et des exigences techniques validées, que l'on procède à l'établissement du modèle physique où à ce stade de la démarche de conception s'effectue le mariage des exigences techniques et des exigences fonctionnelles.

L'établissement de la solution physique selon les recommandations de l'EIA-632 consiste à représenter le produit final en intégrant : la solution logique, les exigences du système technique, les exigences techniques dérivées et les exigences issues du processus de définition des solutions (figure 31).

A l'issue de cette phase, une description détaillée de la solution physique est accompagnée de tous les éléments essentiels au processus de réalisation du produit final : architecture logique, architecture matérielle, composants, interfaces, patrons de fonctions, structures de données, etc.

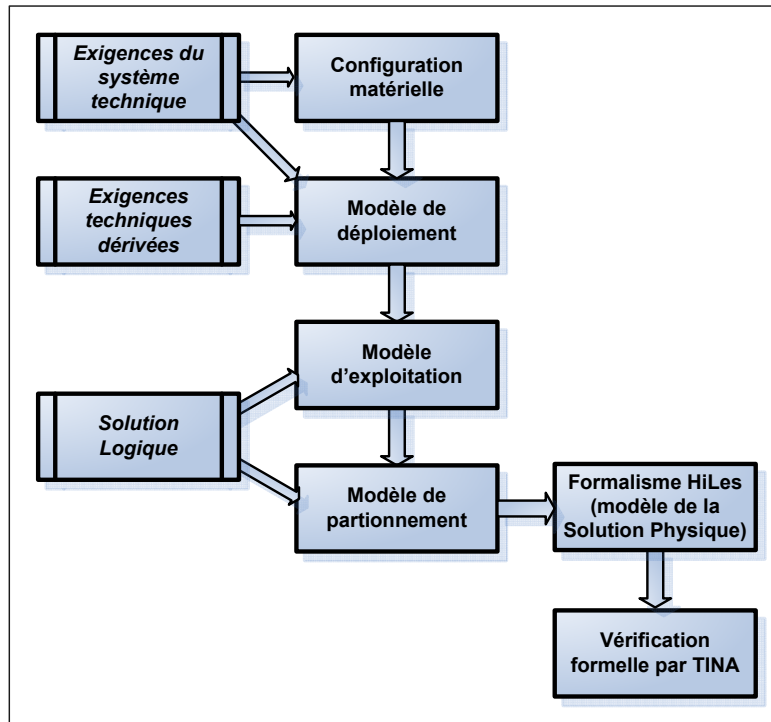


Figure 31 : Démarche globale de la conception de la solution physique.

II.4.1 Le modèle de configuration matérielle

Le premier niveau de conception du système physique est sa configuration matérielle qui résulte des exigences techniques et des fournitures spécifiées dans le cahier des charges, validées préalablement durant le processus de validation des exigences.

L'élaboration du modèle de configuration matérielle nécessite dans un premier temps de recenser toutes les fournitures.

Pour ERGDOM, un réseau de capteurs de présence, répartis dans l'habitat, permet au système de connaître les habitudes des personnes (présence dans l'appartement). Une borne AVIS (interface de commande du système), placée dans une pièce, permet à l'occupant de signaler ses préférences en matière de confort thermique. ERGDOM peut alors réguler la température de l'habitat par commande de convecteurs et satisfaire au mieux les préférences de l'occupant. Rappelons que ERGDOM II bénéficie des choix technologiques de ERGDOM I sur lesquels il n'a pas été nécessaire de revenir (figure 32) :

- Le partitionnement matériel-logiciel est déjà choisi : une unité centrale de traitements regroupe toutes les commandes que nous venons de détailler.
- Les détecteurs de présence restent ceux développés par la société DELTA-DORE.
- La borne « AVIS », qui doit être toutefois repensée, car outre la mesure des températures et l'interface tactile usager, elle doit permettre :
 - l'intégration d'une interface plus complexe avec affichage numérique,
 - des capteurs d'humidité, de CO₂ et d'ensoleillement.

- L'adressage des commandes des différents appareils contrôlés (appareils, borne, compteur, etc.) peut éventuellement être réorganisé dans une architecture « sans fil » ou à « courant porteur »...

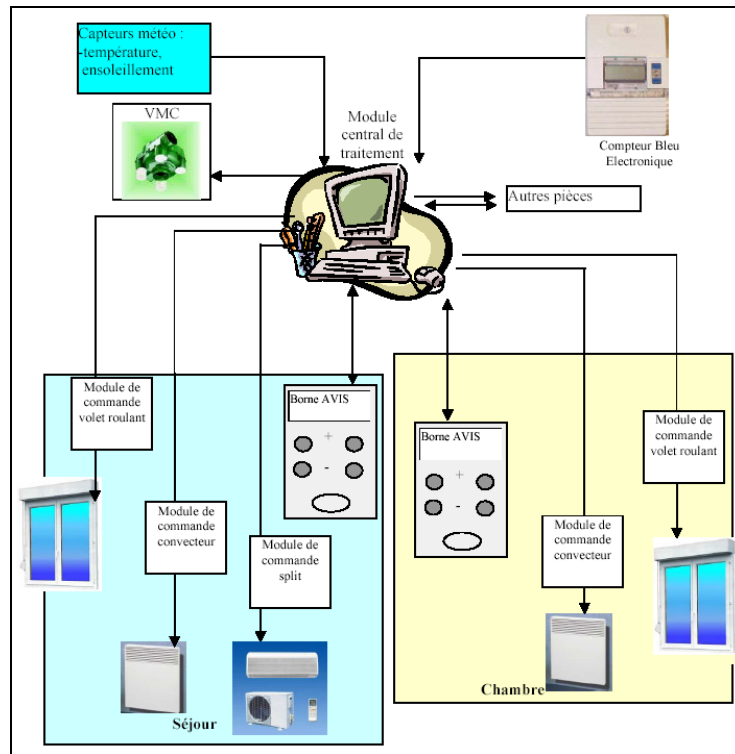


Figure 32 : Fournitures spécifiées par le cahier des charges.

L'ensemble des fournitures est représenté au travers d'un diagramme de blocs faisant apparaître : le système global, ERGDOM II tel que défini dans le diagramme de contexte, et tous les éléments physiques intégrant le système.

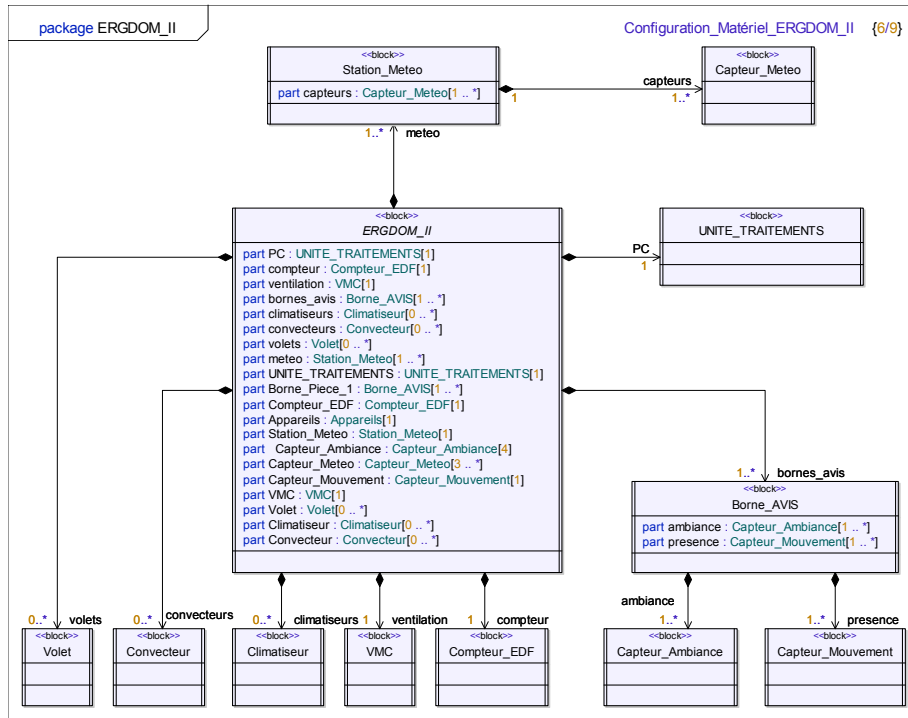


Figure 33 : Modèle de configuration matérielle du système ERGDOM II.

Tous les dispositifs matériels, actifs et passifs, doivent être présents. Les relations de compositions dégagent une première hiérarchie structurelle des dispositifs intégrés (tels que les capteurs intégrés dans la borne AVIS, etc.) et précisent le nombre maximal possible de chaque type d'éléments. La figure 33 présente ainsi le modèle de configuration matérielle par un diagramme des blocs qui recense l'ensemble du matériel du produit final : convecteurs, climatiseurs, volets, ventilation mécanique, borne AVIS, etc.

Le modèle de configuration matérielle proposé est générique car à ce stade de la conception, la solution physique doit pouvoir s'adapter à tout type de configuration d'appartements.

II.4.2 Le modèle de déploiement

L'étape de déploiement permet principalement de concevoir et de justifier tous les choix d'organisation physique en fonction des spécificités techniques des fournitures retenues. Les exigences techniques amènent, en effet, à diversifier le nombre et le type d'élément physique pour des raisons de performances, de sécurité, de coût, d'interopérabilité, de compatibilité, de disponibilité, etc.

Ce modèle de déploiement est basé sur le style d'architecture en niveaux qui spécifie le nombre de niveaux géographiques et organisationnels où vont se situer les environnements d'exécution du système.

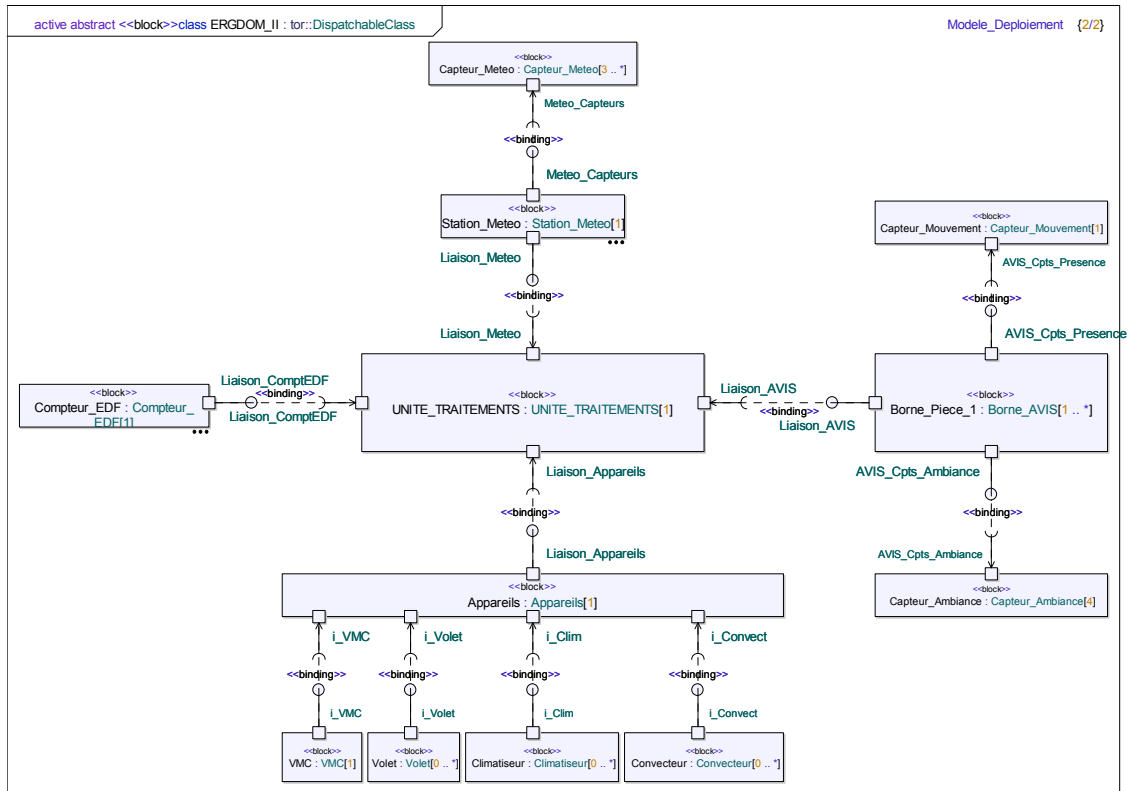


Figure 34 : Le modèle de déploiement.

Le modèle de déploiement du système global est représenté figure 34 par un diagramme interne du bloc ERGDOM II. Nous retrouvons tous les types d'éléments physiques du système déjà présentés dans le modèle de configuration matériel à la différence que toutes les instances de matériel doivent être représentées.

Les nœuds représentent tous les dispositifs matériels spécifiés : machines, capteurs, appareils de régulation de confort, etc. et les interconnexions représentent les interfaces matérielles, entre les unités physiques, qu'il est nécessaire de mettre en œuvre (support de communication numérique, électronique, coursier, etc.).

Dans notre étude et à ce stade de la conception, la configuration matérielle et géographique des maisons n'est pas connue, les blocs « Borne_AVIS », « Volets », « Climatisation » et « Convecteurs » sont marqués par une multiplicité non bornée car le modèle de déploiement de ERGDOM II doit être adaptable aux différentes configurations de maisons.

Le diagramme met en évidence :

- chaque environnement et élément physique du système,
- les interfaces d'échanges entre les différents environnements, dont les liaisons physiques et les protocoles de communication peuvent être précisés.

Certaines précisions peuvent également être ajoutées pour différencier les dispositifs de même type : cas des « Bornes AVIS » placés dans différentes pièces de la maison.

II.4.3 Le modèle d'exploitation

Le modèle d'exploitation exprime la répartition physique des différents services du système et permet notamment de localiser physiquement les fonctionnalités. Les spécifications liées à l'exploitation technique des différents éléments matériels ont une relation directe avec : un lien de communication ou un élément physique du modèle de déploiement. Ces éléments physiques imposent des contraintes liées à la communication, la bande passante, etc.

Il y a à attribuer chaque cas d'utilisation à un ou plusieurs éléments physiques selon deux cas à considérer :

- un cas d'utilisation est attribué à un unique élément physique : résulte souvent d'un choix d'ergonomie ou, lorsque le cas d'utilisation concerne un seul acteur.
- un cas d'utilisation est réparti vers plusieurs éléments physiques : principalement rencontré lorsque plusieurs acteurs participent simultanément, ou que plusieurs dispositifs répartis assurent la même fonctionnalité.

En répartissant les opérations du modèle logique et en respectant les relations acteurs-cas d'utilisation, les acteurs prennent physiquement place dans le modèle d'exploitation. Notons toutefois que l'affectation des fonctionnalités dans certains éléments physiques peut générer de nouvelles contraintes liées à l'environnement matériel, machines, etc., qu'il est possible de mentionner dans le diagramme par des relations de dépendance entre le bloc cible et la contrainte. Dans ce contexte, le modèle de déploiement aide à préciser certaines qualifications des fournitures (dispositifs, réseaux, sécurité, etc.) par rapport aux exigences fonctionnelles figure 36.

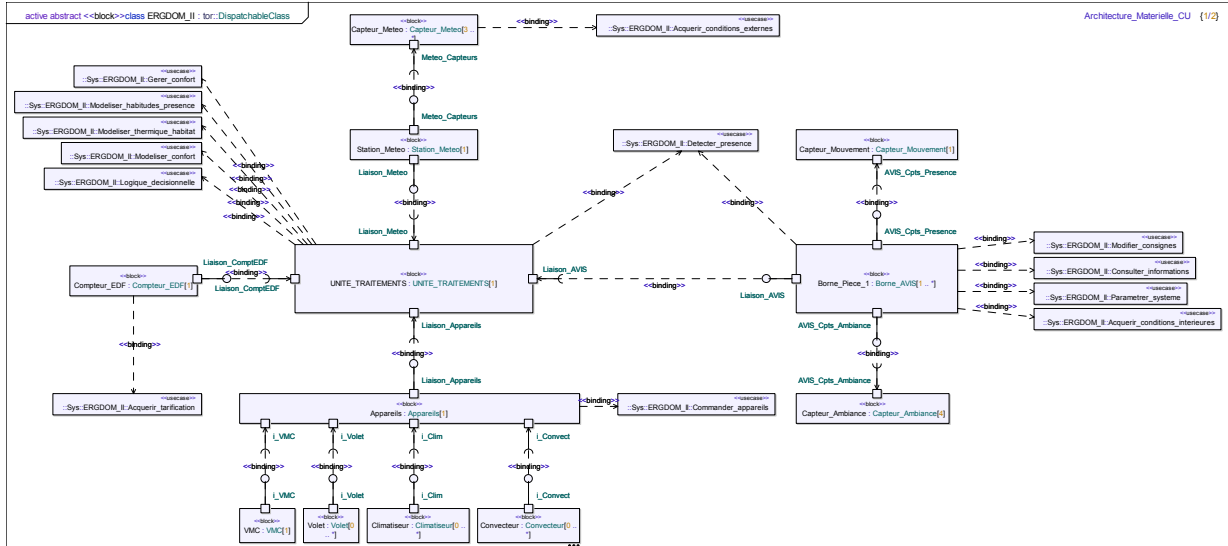


Figure 35 : Le modèle d'exploitation.

Pour ERGDOM II, les modèles de configuration matérielle, de déploiement et d'exploitation restent génériques dans la mesure où le système doit s'adapter à la configuration de la maison cible et au nombre de dispositifs installés dans chaque pièce. Le diagramme met en évidence les rôles affectés à chaque élément physique par une relation de dépendance entre le bloc physique et les cas d'utilisation. Notons qu'à ce niveau des précisions peuvent également être ajoutées pour distinguer les dispositifs de même type assurant des fonctionnalités différentes : ce cas n'étant pas présent

dans ERGDOM II, nous pouvons toutefois citer à titre d'exemple le cas de la répartition des postes de travail dans une entreprise.

II.4.4 Le partitionnement

Après avoir attribué les rôles à chaque élément physique et identifié les interfaces de communication, nous procédons au partitionnement sur la base d'un, ou plusieurs, diagrammes d'activités dans lesquels les éléments « partition » vont caractériser à la fois le matériel (partition verticale) et les services (partition horizontale). Il s'agit de projeter les activités du modèle logique dans les structures physiques conformément à la répartition des services spécifiées dans le modèle d'exploitation. Le choix d'effectuer le partitionnement par les activités est justifié par le besoin d'identifier automatiquement les éventuelles modifications que le concepteur devra apporter au modèle logique.

Dans l'esprit d'automatiser cette étape, nous commençons méthodologiquement par placer les éléments physiques sous la forme de partitions verticales en respectant la hiérarchie structurelle du modèle d'exploitation. Les activités de chaque cas d'utilisation sont ensuite placées, sans modification, au sein de chaque élément physique et distinguées par des partitions horizontales. La figure 36 présente le modèle de partitionnement obtenu pour ERGDOM II dont les interactions entre activités restent identiques à celles déjà définies dans le modèle logique. Le concepteur peut toutefois être amené à modifier certaines activités dans le cas particulier où un cas d'utilisation coordonne d'autres cas d'utilisation situés dans des environnements physiques différents : par exemple l'appel de procédure du cas d'utilisation « Commander appareils », est remplacé par une émission de signal. Ce type de modification justifie dès lors le besoin de vérifier formellement le modèle physique.

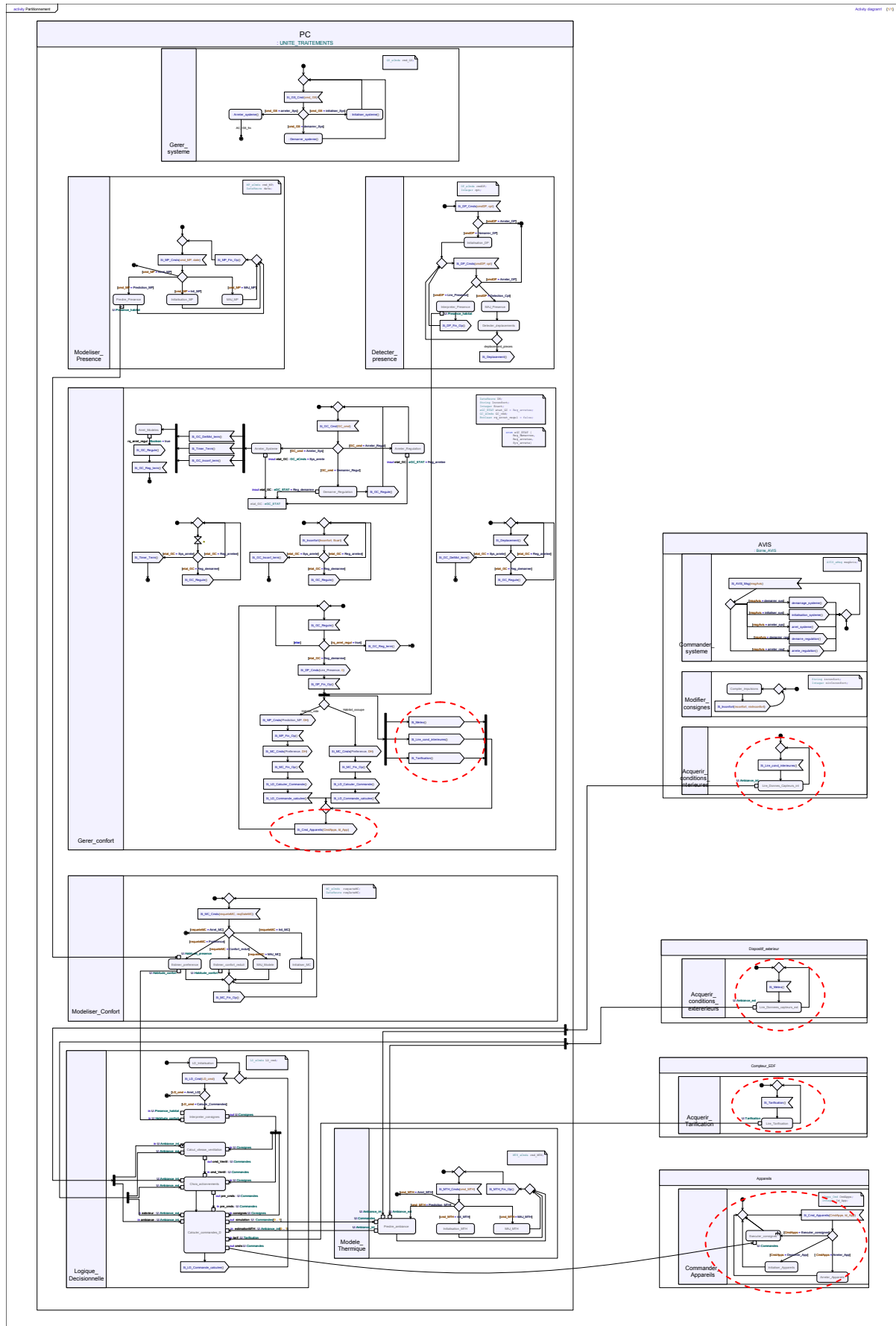


Figure 36 : Modèle de partitionnement.

Les éléments échangés entre les partitions ne doivent qu'être des données. Les modifications qui ont été effectuées pour respecter cette règle sont entourées en rouge dans la figure 36. Toutes les interfaces matérielles et logicielles, augmentées des signaux et des informations véhiculées, se déduisent automatiquement du diagramme d'activité de la solution physique par l'identification des messages et des données échangés aux frontières :

- des partitions horizontales pour les interfaces logiques,
- des partitions verticales pour les interfaces physiques.

Dans notre cas, où l'outil TauG2 utilisé ne fait pas apparaître les relations entre messages échangés de même type, le concepteur pourra définir manuellement les relations de dépendances entre l'émission et la réception du message. La nature des échanges, données et messages, définit ainsi le contenu des interfaces dont l'identification est basée sur le méta-modèle de la figure 37 : les interfaces matérielles font communiquer les dispositifs matériels et les interfaces logiques permettent l'interaction des blocs systèmes au sein d'un même environnement matériel.

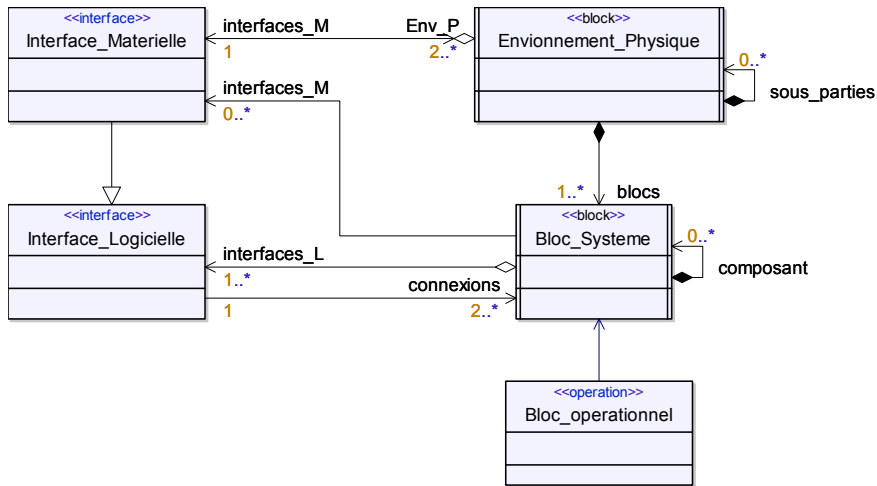


Figure 37 : Méta-modèle de définition des interfaces.

La méthode d'identification des interfaces, consiste dans un premier temps à identifier tous les messages échangés entre blocs physiques (partition horizontale) sur la base d'une interface réalisée (« realized ») par message ou donnée reçue, et d'une interface requise (« required ») pour chaque message ou donnée émis. La figure 38 présente l'ensemble des interfaces identifiées permettant l'échange d'informations entre les cas d'utilisation.

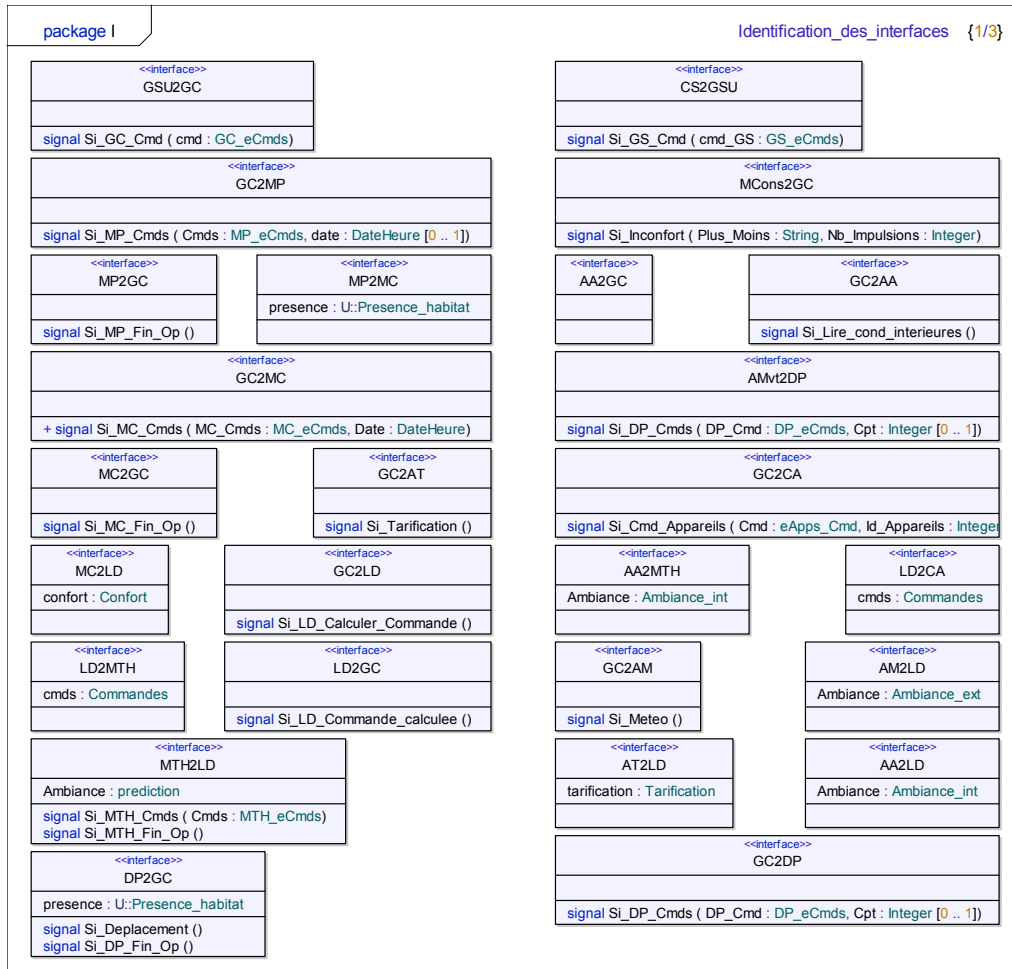


Figure 38 : Interfaces du modèle physique de ERGDOM II.

A partir des interfaces entre blocs logiques, il devient aisé de définir les interfaces matérielles. En effet, l'interface responsable de la communication entre deux environnements matériels distincts est composée de l'ensemble des interfaces logiques des deux environnements mises en relations. Pour modéliser ce concept, nous utilisons la notion d'héritage entre les interfaces : l'interface matérielle d'un bloc physique ou logique hérite de ses interfaces requises et réalisées.

La figure 39 illustre la manière de procéder ainsi que les interfaces physiques obtenues pour le système ERGDOM II. L'intérêt majeur de cette étape est d'obtenir, d'une part, l'ensemble des informations échangées entre les environnements matériels par une procédure simple et méthodique, et de fournir, d'autre part, les blocs correspondants aux liaisons physiques des différents dispositifs. Par exemple, l'exploitation d'un bus de communication entre l'unité de traitement et la borne AVIS (CAN, I2C, etc.), sera modélisé dans le bloc « interface UT_AVIS » dont le comportement et les performances intégrées au système pourront être vérifiées formellement sous HiLes.

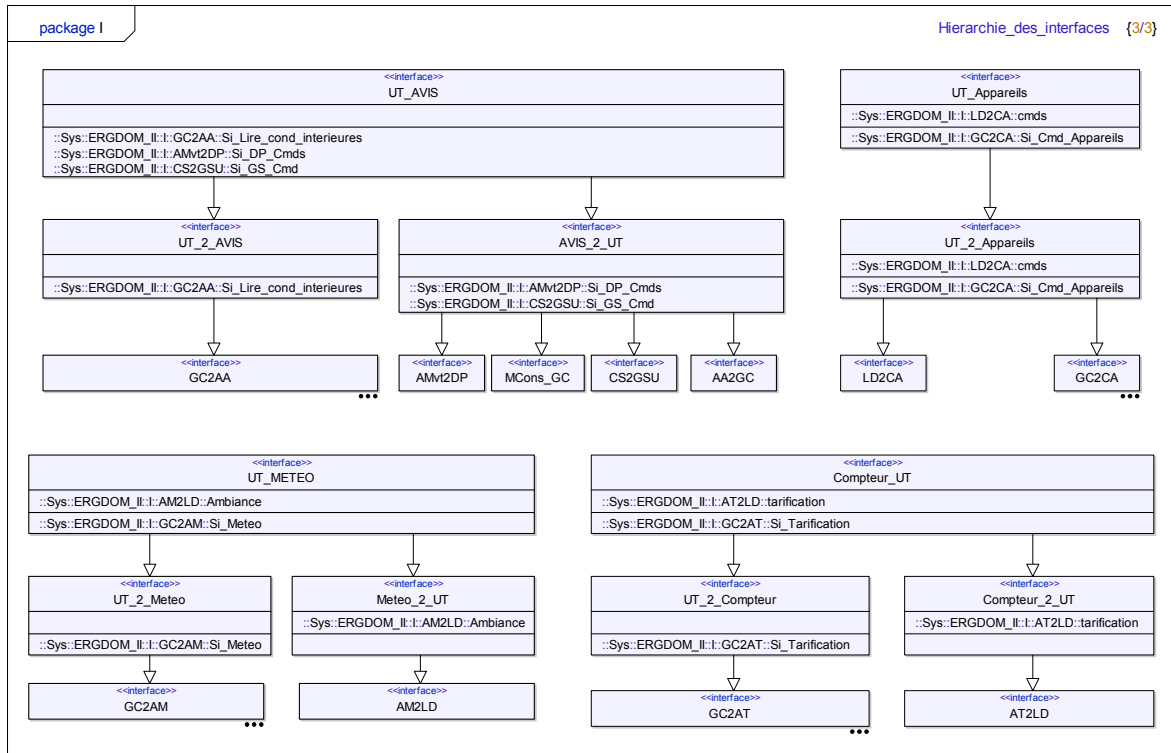


Figure 39 : Interfaces matérielles du système ERGDOM II.

Le partitionnement et les interfaces étant définis, nous représentons la solution logique par des diagrammes internes des blocs correspondant aux éléments physiques, dans lesquels chaque partition devient un composant augmenté de ses interfaces de communication. La figure 40 présente le diagramme interne du bloc « Unité de traitements » où l'on retrouve toutes les fonctionnalités affectées à cet élément dans le modèle d'exploitation et dont l'architecture interne correspond bien à la hiérarchie fonctionnelle de la solution logique.

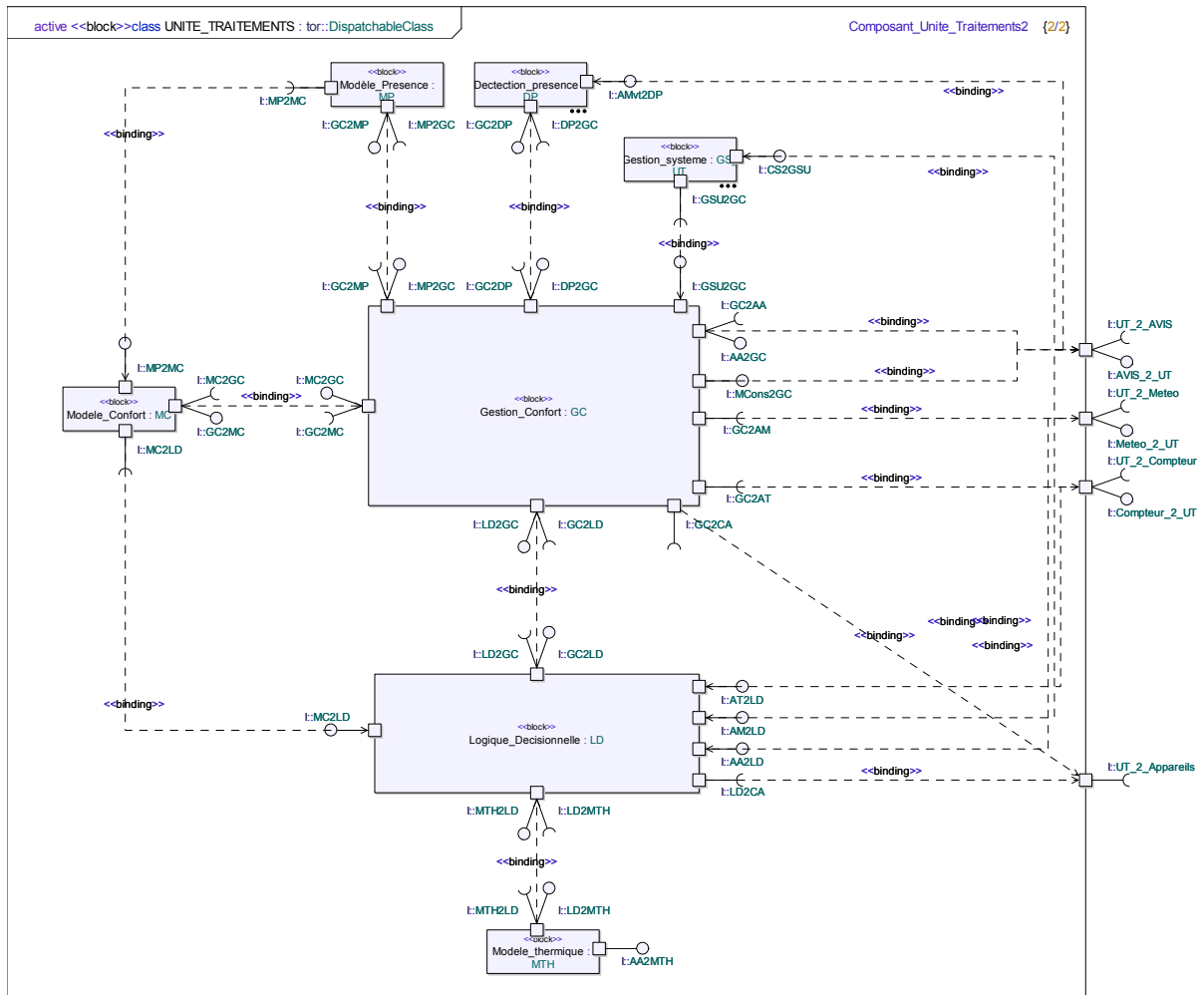


Figure 40 : Diagramme interne - Bloc « Unité de traitements ».

A ce stade, nous avons défini tous les éléments essentiels au processus de réalisation :

- tous les types et structures de données,
- les signatures des opérations,
- les interfaces de communication logicielles et physiques,
- l'architecture logico-physique des composants,
- le comportement de chaque composant.

Il est alors judicieux de transformer le diagramme d'activité du modèle partitionné en un modèle HiLes afin de vérifier formellement les propriétés de la solution physique selon la même démarche définie section II.3.6 . Notons également que cette étape de distribution des fonctionnalités fait apparaître un modèle du système dont les principes d'architectures orientés composants aboutissent à une organisation où les éléments de développement sont isolés. Cet aspect présente un avantage certain pour le développement de sous-projets en parallèle conformément à la définition de l'EIA-632.

II.5 Conclusion

Le chapitre II présente la méthodologie que nous proposons pour la conception d'un habitat intelligent centré ici sur un objectif de gestion du confort thermique. Cette méthodologie est conforme aux recommandations de l'Ingénierie des Systèmes exprimées par la norme EIA-632. Ces recommandations sont rendues opérationnelles avec notre proposition de plateforme HiLes.

La démarche de conception HiLes qui a été présentée démontre son intérêt pour :

- exprimer les exigences fonctionnelles issues du cahier des charges,
- définir l'architecture logique du système.

Quatre types de diagrammes SYSML (contexte, cas d'utilisation, séquence et activité) constituent les outils de contrôle de l'architecture du système et permettent de superviser la conception jusqu'à la validation de la logique du système.

Le processus de conception centré sur l'architecture fonctionnelle offre plusieurs avantages :

- l'organisation en modèles permet à terme une réutilisation,
- les découpages facilitent la validation et permettent la répartition du travail entre équipes,
- les cohérences entre les représentations renforcent la robustesse de l'architecture,
- la documentation apportée par les modèles facilite l'intégration et la validation du système.

Détaillant tous les éléments du système (interactions système-usager, régulation automatisée du confort, commande, etc.), l'architecture fonctionnelle de ERGDOM II a entièrement été définie à partir des formalismes SYSML et HiLes.

La validation formelle de la logique de commande, à travers l'analyse des réseaux de Petri, a été effectuée et l'ensemble des structures de données exploitées par toutes les fonctionnalités du système a été spécifié et intégré dans chaque activité du système.

Il reste au terme ce travail conceptuel à choisir les technologies : nous verrons un premier exemple dans le chapitre III exploitant les technologies conventionnelles. Pour notre part, nous considérons deux autres options à étudier :

- Le comptage de personnes à l'entrée d'une habitation [Bonh06],
- La mise en œuvre de nouveaux détecteurs, à base de capteurs thermopiles, capables de mesurer la présence à la fois par la température propre et par le mouvement des usagers [Bena04].

Ces options feront l'objet de développements dans un autre contexte que celui de la thèse.

Chapitre III Le confort dans l'habitat : le projet ERGDOM

| | |
|--|------------|
| III.1 INTRODUCTION..... | 101 |
| III.2 RAPPEL DES RESULTATS ANTERIEURS..... | 102 |
| III.2.1 Le concept de ERGDOM I..... | 102 |
| III.2.2 Résultats | 103 |
| III.3 NORMES ET STANDARDS UTILES A L'EXTENSION DE ERGDOM II | 105 |
| III.3.1 Le confort thermique..... | 105 |
| <i>III.3.1.a Approche physique</i> | <i>105</i> |
| <i>III.3.1.b Approche subjective.....</i> | <i>106</i> |
| <i>III.3.1.c Approche adaptative.....</i> | <i>106</i> |
| III.3.2 La qualité de l'air intérieur | 106 |
| III.4 PERCEPTION DU CONFORT DANS L'HABITAT..... | 107 |
| III.4.1 Les différentes dimensions du confort dans ERGDOM II..... | 108 |
| <i>III.4.1.a Le confort thermique.....</i> | <i>108</i> |
| <i>III.4.1.b Qualité de l'air intérieur.....</i> | <i>110</i> |
| III.4.2 Les indices mesurables du confort..... | 111 |
| <i>III.4.2.a Confort thermique.....</i> | <i>111</i> |
| <i>III.4.2.b QAI.....</i> | <i>112</i> |
| III.5 LA CONCEPTION SYSTEME..... | 112 |
| III.5.1 Architecture | 112 |
| <i>III.5.1.a Les aspects matériels.....</i> | <i>112</i> |
| <i>III.5.1.b Les aspects algorithmiques</i> | <i>113</i> |
| III.6 LES EXTENSIONS DE ERGDOM II | 113 |
| III.6.1 Approche Ergdom II pour la climatisation | 113 |
| III.6.2 Approche Ergdom II pour la gestion des occupants | 114 |
| III.6.3 Approche Ergdom II pour la ventilation..... | 114 |
| III.6.4 Approche Ergdom II pour la gestion de l'humidité..... | 115 |
| III.6.5 Problèmes posés par l'intégration des fonctionnalités..... | 115 |
| III.7 EVALUATION DES APPORTS NATURELS POUR LA GESTION DU CONFORT..... | 116 |
| III.7.1 Exigences et réglementation..... | 116 |
| III.7.2 Principe du « Free cooling » | 119 |
| <i>III.7.2.a Méthode de mesure des capacités de rafraîchissement.....</i> | <i>119</i> |
| <i>III.7.2.b Scénarios retenus.....</i> | <i>120</i> |
| <i>III.7.2.c Variables retenues.....</i> | <i>120</i> |
| <i>III.7.2.d Capacité de rafraîchissement.....</i> | <i>121</i> |
| III.7.3 La régulation du réchauffement par rayonnement solaire..... | 122 |
| III.7.4 Synthèse | 125 |
| III.8 DEFINITION D'UNE LOGIQUE DECISIONNELLE ERGDOM II | 127 |
| III.8.1 Principe | 127 |
| III.8.2 L'interprétation des consignes..... | 128 |
| III.8.3 Le calcul de la vitesse de ventilation..... | 130 |
| III.8.4 Le choix des actionneurs | 131 |
| <i>III.8.4.a Interprétation des consignes pour une pièce.....</i> | <i>132</i> |
| <i>III.8.4.b Description des règles expertes d'exploitation des actionneurs.....</i> | <i>132</i> |
| <i>III.8.4.c Le choix des actionneurs.....</i> | <i>133</i> |
| III.8.5 Le calcul des commandes | 134 |
| III.9 CONCLUSION..... | 135 |

III.1 Introduction

La conception d'un système « Domotique » relève d'une approche très construite qui s'inscrit dans l'ingénierie des systèmes. Les services Domotiques sont multiples : confort, sécurité, communication, suivi à domicile... et l'environnement complexe puisqu'il faut gérer des interactions avec de nombreux partenaires ; l'environnement socio-économique très largement et des acteurs extérieurs : l'énergie, l'eau, les médias, les déchets, etc.

Nous avons tenté dans le chapitre précédent d'initier une approche de conception conforme à cette vision globale de la Domotique en proposant une méthode de conception tirée du standard EIA-632 et des outils (plateforme HiLes) suffisamment génériques pour s'ouvrir sur des applications dérivées. Nous avons ainsi abouti à l'élaboration d'une « Solution Logique » vérifiée par rapport au cahier des charges (cf. annexe A) rédigé par EDF-R&D, qui nous a servi d'exemple.

En fait, ce cahier des charges propose une extension du projet ERGDOM I, présenté dans le chapitre I, vers une version toutes saisons, ERGDOM II, plus complète où sont introduits :

- La climatisation,
- La ventilation,
- L'éclairage et l'énergie solaire (volets roulants).

L'objectif est de mettre en œuvre cette méthodologie et de concevoir un nouvel algorithme répondant aux objectifs, en conservant les principes initiaux de surveillance par les habitudes des usagers.

Nous restons dans ce chapitre dans la logique de la méthodologie présentée au chapitre II. Pour donner de la cohérence à la présentation, nous reprendrons très brièvement l'historique de ERGDOM I et analyserons les incidences des différentes exigences nouvelles.

L'essentiel du chapitre est consacré à la logique décisionnelle c'est-à-dire à établir les relations d'interactions entre les différentes commandes des différents actionneurs mis en œuvre simultanément.

III.2 Rappel des résultats antérieurs

III.2.1 Le concept de ERGDOM I

Comme rappelé dans le chapitre I, section I.7.1 , ERGDOM est un gestionnaire d'énergie auto-configurable basé sur l'apprentissage des habitudes de présence et de confort des occupants pour la gestion automatisée du chauffage. Le concept s'appuie sur une approche adaptative identifiant les conditions de confort privilégiées des usagers grâce à des méthodes d'apprentissage de leurs présences et de leurs préférences thermiques. Une procédure, basée sur l'observation permanente du comportement des usagers dans l'habitat et des réglages apportés par l'occupant à une interface conçue spécifiquement, est appliquée automatiquement.

Ainsi, sur une base de probabilités d'occupation d'une pièce de l'habitat à un instant donné, le système élabore un modèle du comportement des usagers, qui est alors confronté à la situation courante. Lorsqu'un écart de température est détecté, une température de consigne est immédiatement calculée pour rétablir le niveau de confort habituel.

Les habitudes de l'utilisateur (présence, confort) sont les éléments de base permettant d'établir une planification des consignes, exploitée ensuite par un système de supervision du confort pilotant les convecteurs. L'ensemble s'opère sans intervention, ni programmation des occupants effectuant ainsi une gestion « intelligente » de l'énergie.

Les grandes fonctionnalités de ERGDOM sont extraites de l'analyse présentée chapitre II. Les cas d'utilisation sont ainsi :

- Prédire la présence de l'utilisateur
L'apprentissage de la présence des occupants dans les différentes zones du logement a pour but :
 - de réduire le niveau de chauffage lorsque le logement est inoccupé,
 - d'effectuer des anticipations sur la présence dans le logement afin d'obtenir le bon niveau de confort lorsqu'une zone est occupée.
- Estimer la température de confort
L'apprentissage des conditions de confort est la clé de la gestion personnalisée. Les choix de confort sont mémorisés puis, des probabilités sont élaborées sur les préférences futures de l'utilisateur.
- Commander les convecteurs
La commande automatique des convecteurs pour assurer le confort est le résultat de l'ensemble des traitements effectués par ERGDOM. L'utilisateur peut également augmenter ou diminuer manuellement la température désirée grâce à une borne de commande.
- Connaître les réactions thermiques de l'habitat
La réponse thermique d'une pièce en fonction des conditions externes (température, ensoleillement) permet de calculer la puissance que le convecteur doit fournir pour atteindre la température de consigne, et anticiper ainsi la relance du chauffage avant l'arrivée prévue de l'utilisateur.

L'architecture choisie, illustrée figure 7, pour la mise en œuvre comporte :

- Des choix matériels :
 - un ordinateur central regroupant les algorithmes d'acquisition et de traitement des données est connecté à des capteurs météorologiques (température extérieure et ensoleillement),
 - une borne spécifique (Borne AVIS [Bail97]) intégrant un détecteur de mouvement, une sonde de température ainsi qu'une interface utilisateur simple.

Différents modules constituent le cœur du système et sont représentés dans la figure 41. Il s'agit des modules d'apprentissage de la présence, de la température de confort et de la réponse thermique du logement ainsi que les modules de décision et de commande.

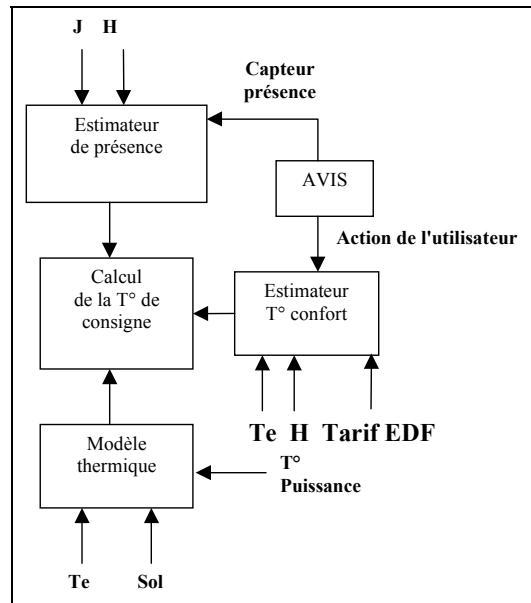


Figure 41 : Fonctionnement du gestionnaire ERGDOM.

III.2.2 Résultats

Les données de présence recueillies par ERGDOM ont été analysées durant deux saisons d'expérimentation dans l'optique de valider le concept et de valider l'exploitation des habitudes de présence pour réduire la consommation énergétique [Camp03a]. Pour cela et afin d'affiner la prise en compte des habitudes, les événements types d'une journée (lever, déjeuner, coucher, départ, arrivée) ont été définis, et les périodes de la journée (matin, déjeuner) et les zones (cuisine, salle de bains) pour lesquelles des habitudes de présence (ou d'absence) existent ont été identifiées. Les figures (a), (b), et (c) ci-après illustrent un exemple de comportement horaire d'une même famille suivant les trois activités : lever, déjeuner, coucher. A contrario, il a été montré que certaines zones (séjour, après-midi) dans certaines plages horaires ne permettaient pas de dégager de véritables habitudes d'occupation. Une analyse fine de la classification des habitudes de présence a été menée pour mettre en évidence l'influence d'une segmentation semaine/week-end ou d'un découpage en jours homo-

III.3 Normes et standards utiles à l'extension de ERGDOM II

Plusieurs normes et standards (ASHRAE, ISO) ont été élaborés pour modéliser les sensations de confort des individus et corrélérer l'utilisation des appareils de chauffage, de ventilation et de climatisation.

III.3.1 Le confort thermique

Les normes élaborées jusqu'à présent dans le domaine du confort thermique figurent dans le tableau 11.

| <i>Références</i> | <i>Domaine</i> | <i>Intitulé</i> |
|-------------------|------------------------------------|--|
| ISO 7243 (1989) | Ambiances chaudes | Estimation des la contrainte thermique de l'homme au travail, basée sur l'indice WBGT. |
| ISO 7726 (1985) | Ambiances thermiques | Appareils et méthodes de mesure des grandeurs physique. |
| ISO 7730 (1984) | Ambiances thermiques modérées | Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort thermique. |
| ISO 7933 (1989) | Ambiances thermiques chaudes | Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondée sur le calcul de la sudation. |
| ISO 8996 (1990) | Ergonomie | Détermination de la production de chaleur métabolique. |
| ISO 9920 (1992) | Ergonomie | Evaluation de l'astreinte thermique par mesures physiologiques. |
| ISO 11079 (1994) | Ergonomie des ambiances thermiques | Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire. |
| ISO 10551 (1995) | Ergonomie des ambiances thermiques | Evaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelle de jugements subjectifs. |
| ASHRAE 55 (1992) | Ambiances thermiques confortables | Conditions thermiques acceptables pour l'homme. |

Tableau 11 : Normes destinées à évaluer le confort thermique.

Trois types d'approches pouvaient permettre de modéliser le confort : une approche de modélisation thermique qui consiste à estimer tous les phénomènes physiques entrant en compte dans la perception du confort, l'approche subjective qui consiste à recueillir les jugements des personnes et l'approche adaptative (ERGDOM) qui consiste à « apprendre » les préférences des usagers.

III.3.1.a Approche physique

Les phénomènes ressentis par l'utilisateur sont décrits section III.4.1.a . L'approche consiste à calculer le bilan thermique résultant de ces phénomènes. Parmi eux, certains peuvent être calculés (à partir des formules issues de normes) ou estimés à l'aide

d'abaques (notamment pour l'estimation de l'isolement thermique des vêtements : le clot).

III.3.1.b Approche subjective

La norme NF EN ISO 10551 [Iso95] propose une méthode d'évaluation personnalisée des ambiances thermiques froides, modérées et chaudes grâce à l'utilisation d'échelles de jugements subjectifs. Le principe consiste à différencier les jugements portés par les personnes sur leurs propres sensations thermiques (informations pertinentes pour les ergonomes), des jugements portés sur l'ambiance thermique. Cinq échelles (perception personnelle de l'état thermique, échelle évaluative, préférence thermique, acceptabilité et tolérance définies en annexe E) sont construites pour permettre le recueillement des sensations et préférences d'un ou de plusieurs individus.

La méthode présente plusieurs avantages :

- Une distinction est effectuée entre la perception, l'évaluation affective et la préférence future de l'individu.
- La construction des échelles selon le type d'ambiance (plutôt chaude ou froide) et la précision nécessaire pour les traitements sous jacents est simple.
- L'individu exprime naturellement ses sensations thermiques.
- La méthode permet d'estimer non seulement les ambiances confortables mais également les ambiances inconfortables.
- Les jugements répétés permettent d'établir des calculs statistiques et prévisionnels sur les sensations de confort d'un ou de plusieurs individus.

En revanche, les phénomènes de lassitude sensorielle [Peti03] (lorsque les conditions de confort sans variation provoquent l'inconfort) et de variations thermiques ne sont pas pris en compte pour l'évaluation du confort.

L'approche subjective peut s'avérer très utile dans ERGDOM pour quantifier le degré de gêne ou de satisfaction de l'occupant.

III.3.1.c Approche adaptative

L'approche adaptative, concept de ERGDOM, consiste à apprendre les conditions de confort privilégiées grâce à une interface spécifique permettant à l'occupant d'indiquer au système ses préférences. Elle constitue en soit une méthode adaptée à la gestion du confort personnalisée dans l'habitat.

III.3.2 La qualité de l'air intérieur

La gestion de la qualité de l'air intérieur (QAI) n'est pas totalement pilotée par l'utilisateur, notamment pour des raisons sanitaires, car certaines contraintes fixées par des normes de sécurité doivent être respectées. Deux normes sont actuellement recensées pour le maintien de la QAI dans l'habitat comme indiqué dans le tableau 12.

| <i>Références</i> | <i>Domaine</i> | <i>Intitulé</i> |
|--------------------|----------------------------|---|
| ASHRAE 62.1 (2004) | Qualité de l'air intérieur | Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality |
| RT2005 | Réglementation thermique | Réglementation thermique 2005 |

Tableau 12 : Normes spécifiant la QAI dans l'habitat.

La norme ASHRAE fournit les concentrations 'dites' acceptables des contaminants dans les bâtiments. Or, dans un contexte de gestion individuelle du confort, les références fournies par la norme ne sont pas forcément adaptées aux préférences de chaque occupant puisqu'elles sont élaborées à partir de moyennes issues de sondages.

Selon le CRC-CNRC [Char03], certaines plages de valeurs ne reflètent pas le confort individuel mais doivent plutôt être considérées comme un minimum acceptable par l'occupant. En effet et notamment pour des raisons d'économie d'énergie, la norme AHSRAE spécifie un taux de $\text{CO}_2 < 1000$ ppm, et un taux d'apport d'air 8,5 l/s, alors que le CRC-CNRC évalue le confort individuel à un taux de $\text{CO}_2 < 650$ ppm et un taux d'apport d'air 10 l/s. Le confort individuel adéquat a ainsi tendance à dépasser les recommandations de l'ASHRAE pour la ventilation des locaux.

La RT2005, qui porte sur les bâtiments neufs résidentiels et tertiaires, impose quant à elle des exigences sur les entrées d'air et définit les méthodes de ventilation nocturne.

III.4 Perception du confort dans l'habitat

Par sa définition, la notion de confort correspond au bien-être matériel ainsi qu'à l'ensemble des commodités quotidiennes. L'agrément, associé au bien-être, procure une satisfaction du corps et de l'esprit. Plusieurs types de confort sont considérés : confort sensoriel, confort acoustique, confort moral, etc.

Parmi les paramètres du confort, il y a les paramètres mesurables grâce à des capteurs et les paramètres estimables à partir de calculs, abaques, etc. La perception du confort par l'individu, illustrée figure 43, dépend des conditions climatiques (température, humidité, qualité de l'air intérieur, etc.), des conditions d'environnement (lumière, bruit, etc.), de son activité physique et de sa tenue vestimentaire.

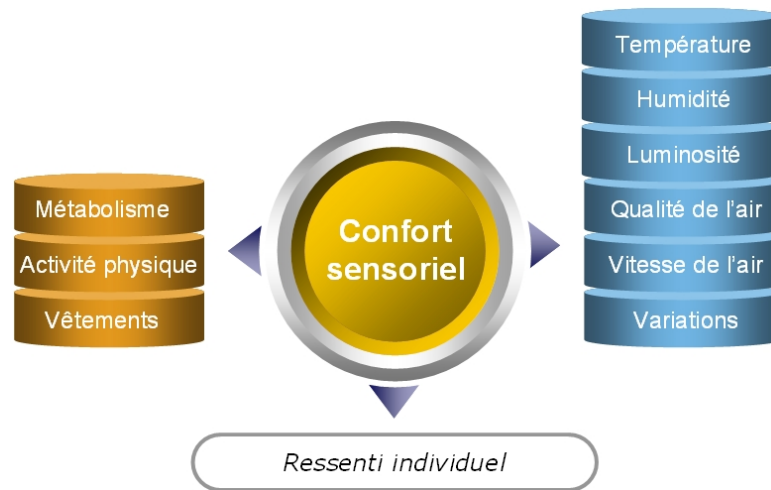


Figure 43 : Facteurs du confort sensoriel.

L'extension de ERGDOM à une gestion plus avancée du confort (gestion des occupants, ventilation et climatisation) introduit, au-delà du confort thermique, des éléments d'estimation plus complexes dont la qualité de l'air intérieur (QAI).

Cette partie présente les différents aspects du confort dans l'habitat, d'un point de vue sensoriel, que l'on souhaite gérer par ERGDOM II : confort thermique et QAI.

III.4.1 Les différentes dimensions du confort dans ERGDOM II

III.4.1.a Le confort thermique

L'ambiance thermique est un ensemble de facteurs jouant un rôle important sur le bien-être et la santé des personnes. Concernant aussi bien les situations de chaleur et de froid, le confort thermique allie plusieurs types de phénomènes dont les principales variables sont la température, la vitesse de l'air, l'humidité relative, la température de rayonnement, l'activité de l'occupant et l'isolement des vêtements.

Les différents effets thermiques à considérer pour évaluer le confort [Candas] figurent dans le tableau 13.

| Type de phénomène | Paramètres de calculs | Paramètres mesurables |
|----------------------|---|--|
| Conduction | Les températures de surface de la peau et les aspects conductifs sont négligés et inclus dans les échanges convectifs. | |
| Convection | $C = h_c \cdot (T_a - T_{sk}) \cdot A_c \cdot F_{cl}$ C : flux convectif global, h _c : coefficient d'échange par convection, T _a : température de l'air, T _{sk} : température moyenne de la peau, A _c : surface cutanée exposée, F _{cl} : facteur de prise en compte de l'effet lié à l'isolement vestimentaire. | T _a : Capteur de température de l'air ambiant. |
| Radiation | $R = h_r \cdot (T_r - T_{sk}) \cdot A_r \cdot F_{cl}$ R : flux radiatif échangé par le corps humain, h _r : coefficient d'échange par rayonnement, T _r : température moyenne de rayonnement En milieu environnant, A _r : surface cutanée rayonnante, T _{sk} , F _{cl} . | T _r : Capteur de type WBGT* ('Wet Bulb Globe Température'). |
| Humidité | $E = h_e \cdot (P_{aH_2O} - P_{skH_2O}) \cdot A_e \cdot F_{pcl}$ E : Flux évaporatoire, h _e : coefficient d'échange de chaleur d'évaporation, P _{aH₂O} : pression partielle de vapeur ambiante, P _{skH₂O} : pression saturante de vapeur d'eau à la température cutanée. A _e : surface d'évaporation F _{pcl} : facteur de modulation des échanges de chaleur sensible lié à l'isolement vestimentaire. | P _{aH₂O} : Capteur de pression |
| Métabolique | $M = M_b + M_p + M_a$ M : Activité métabolique M _b : métabolisme de base, M _p : métabolisme de posture, M _a : métabolisme d'activité. | |
| Vestimentaire | $I_{cl} = I_t - I_a$ I _{cl} : Isolement thermique du vêtement, I _t : isolement thermique total, I _a : isolement thermique de la couche d'air | |

* L'indice synthétique appelé WBGT comprend les 3 mesures de thermomètres suivantes basées sur des paramètres météorologiques fondamentaux :

- Un premier thermomètre mesure la température de l'air ('Dry Bulb Temperature'),
- Un second thermomètre mesure la température de globe ('Globe Temperature') qui est fonction de l'intensité du rayonnement solaire, rayonnement infrarouge... et des conditions des vents,
- Un troisième thermomètre ('Wet Bulb') mesure le refroidissement naturel provoqué par les mouvements de l'air qui dépend de la pression de vapeur, de la vitesse du vent, etc.

Tableau 13 : Effets thermiques.

L'ambiance thermique est un ensemble de facteurs jouant un rôle important sur le bien-être et la santé des personnes. Concernant aussi bien les situations de chaleur et de froid, le confort thermique allie plusieurs types de phénomènes dont les principales variables sont la température, l'humidité relative, la vitesse de l'air, la température de rayonnement, l'activité physique de l'occupant et l'isolement de ses vêtements.

Le bilan thermique, ensemble des échanges de chaleur subit par l'organisme, permet de prédire si les conditions sont propices ou non à l'établissement du confort thermique.

| | |
|------------------------|---|
| Bilan thermique | $\mathbf{B} = \mathbf{M} - \mathbf{W} + \mathbf{K} + \mathbf{C} + \mathbf{C}_{\text{res}} + \mathbf{R} - \mathbf{E} - \mathbf{E}_{\text{res}}$ <p> \mathbf{C}_{res} : Echanges convectifs respiratoires \mathbf{E}_{res} : Echange évaporatoire respiratoires \mathbf{W} : Travail fourni extérieur \mathbf{K} : Echanges conductifs \mathbf{C} : Echanges convectifs cutanés </p> |
|------------------------|---|

Une situation propice au confort correspond à un bilan thermique nul. L'inconfort sera caractérisé quant à lui par un bilan thermique positif ou négatif, correspondant aux situations d'hyperthermie ou d'hypothermie. Si le bilan thermique permet de prédire les situations de confort, notons toutefois que certains phénomènes ne peuvent être qu'estimés a priori (tenue vestimentaire, activité métabolique).

III.4.1.b Qualité de l'air intérieur

Si l'aération influence le confort thermique, la QAI intègre en revanche le confort moral par son rôle sanitaire. Les individus passent en moyenne 14 heures dans leur habitat et l'air intérieur est souvent beaucoup plus pollué que l'air extérieur. L'objectif est alors de réduire les pertes énergétiques tout en assurant un renouvellement suffisant de l'air.

La gestion de la QAI doit tenir compte de nombreux facteurs : type et quantité de contaminants, déplacement des particules contaminantes dans l'espace, débit et qualité de l'air importé et mouvement de l'air. Les sources de contaminants sont de différents types :

- Les contaminants extérieurs, qui pénètrent dans le bâti par la ventilation, les ouvertures et les murs,
- Les matériaux de construction, continuellement relâchés dans l'air intérieur,
- Les occupants eux-mêmes, par les gaz qu'ils produisent (respiration, transpiration) et les produits d'hygiène personnels.

Les principales sources polluantes dans un logement [Mich] sont listées dans le tableau 14.

| <i>Type de source</i> | <i>Principaux polluants</i> |
|--|--|
| Sources extérieures Pollution atmosphérique Sol | CO ₂ , CO, SO ₂ , NO _x , O ₃ , particules Radon |
| Occupants Etres humains et animaux | H ₂ O, CO ₂ , NH ₃ , odeurs, particules organismes |
| Activités humaines Tabagisme Appareil de chauffage Lavage et séchage Aérosols | CO, NO ₂ , HCHO, odeurs, particules, COV CO, CO ₂ , NO _x , HOCO, H ₂ O, particules, odeurs H ₂ O, COV, NH ₃ , HCHO, odeurs Particule, COV, odeurs |
| Matériaux et produits Béton, pierre Dérivés du bois Isolants Meubles et revêtements | Radon HCHO Fibres HCHO, COV |

Tableau 14 : Principaux polluants de l'air ambiant.

Les contaminants rendent l'air vicié, poussiéreux, désagréable et peuvent provoquer l'insatisfaction et l'inconfort des occupants, ou à plus long terme occasionner, à concentration élevée, des troubles dangereux pour la santé.

III.4.2 Les indices mesurables du confort

III.4.2.a Confort thermique

Plusieurs phénomènes sont difficiles à évaluer, tels que l'isolement du vêtement ou l'activité de la personne, sans l'utilisation d'un dispositif dédié. La température opérative peut être calculée avec un capteur WBGT, et l'humidité relative, avec un capteur de pression et d'humidité. Certains indices tels le PMV et PPD [Iso94] permettent de graduer et d'estimer le confort et l'inconfort, en fonction notamment de la plage de conditionnement privilégiée [Ashr92].

Les échelles de jugements subjectifs [Iso95] semblent appropriées au diagnostic et à la prévision du confort individuel, d'autant plus qu'une correspondance est possible avec l'indice PMV.

Notons également que le ministère du gouvernement Canadien « Environnement Canada », a fondé le « facteur Humidex » [Humi04] pour exprimer la sensation de chaleur ressentie par les usagers en fonction de la température et de l'humidité. La relation entre l'humidex et le confort est subjective : la valeur de l'indice fournit par la table de référence correspond à une niveau d'inconfort. Si l'indice Humidex est non personnalisé et ne prend pas en compte l'intensité du vent (paramètre important dans la sensation de confort), il peut être exploité par ERGDOM pour réguler par défaut les conditions d'ambiance lorsque les habitudes de confort des usagers ne sont pas encore connues : nous retenons le principe d'exploitation de l'indice « Humidex » pour l'interprétation des situations d'inconfort dans ERGDOM II.

III.4.2.b QAI

Le paramètre exploité pour mesurer la qualité de l'air est le plus souvent le CO₂. D'autres contaminants peuvent cependant être pris en compte pour une gestion plus fine et plus significative de la QAI : COV, CO, HCHO, H₂O. Pour des raisons économiques et de disponibilité des fournitures, nous avons retenu de surveiller la qualité de l'air sur la base du CO₂ en priorité.

III.5 La conception système

Il est toujours envisageable d'aborder la conception d'un système de commande complexe selon une architecture d'automatismes hiérarchisés où chaque paramètre influant est géré séparément puis repris dans un gestionnaire global qui pilote l'ensemble des automatismes avec un critère choisi en fonction des priorités que l'on se fixe : énergie, coût, pollution...

Dans l'approche que nous proposons, nous voulons tirer le meilleur parti de la connaissance acquise sur le confort ressenti par l'utilisateur et en extraire des règles expertes assurant la combinaison. Cette commande est largement rassemblée dans les normes et les standards que nous avons brièvement rappelés ci-dessus. Sur le plan de partitionnement matériel-logiciel, nous avons repris les options de ERGDOM I et les avons étendus.

III.5.1 Architecture

III.5.1.a Les aspects matériels

L'architecture matérielle de ERGDOM II, selon le cahier des charges qui a été fixé, est la suivante :

- Appareils : climatisation, ventilation et volets électriques,
- Capteurs : ensoleillement, température intérieure, température extérieure, humidité et luminosité,
- Une unité de calculs ainsi qu'une interface homme-machine.

- La ventilation

Le système de ventilation utilisé est une VMC simple ou double flux. Les VMC se régulent en fonction de l'entrée d'air, autoréglable en limitant le débit entrant sous de forts écarts de pression, et de la sortie d'air, hygroréglable en modulant le débit d'air extrait selon la teneur en humidité intérieur. Le débit nécessaire étant proportionnel à l'intensité de la source polluante, il doit être suffisant pour assurer la qualité de l'air et réduit au minimum pour éviter le gaspillage d'énergie. En outre, la VMC double flux échange la chaleur entre l'air vicié et l'air frais et permet un rendement de récupération de chaleur allant jusqu'à 60%.

- La climatisation

Le système de climatisation utilisé sera de type split air/air. L'unité intérieure, qui contient un échangeur ventilé, un dispositif de commande et des filtres mobiles à la reprise d'air, est reliée par des liaisons frigorifiques à l'unité extérieure, contenant le second échangeur ventilé, le compresseur, le détendeur et une vanne d'inversion de cycle pour les appareils réversibles.

- Les occultants

Le système utilisé pour gérer les occultants (volets roulants, store, etc.) et réguler la luminosité externe reste encore à définir.

III.5.1.b Les aspects algorithmiques

L'architecture logicielle reste globalement inchangée par rapport à l'architecture existante puisque le composant nouveau est celui de la « Logique décisionnelle » s'insérant avant le calcul des commandes afin de choisir le type d'appareil à utiliser. Un modèle ERGDOM peut être appliqué pour la gestion de chaque appareil si l'on considère la température intérieure. Ainsi, seul le modèle thermique est adapté en fonction du type d'appareil piloté : un modèle thermique spécifique à la gestion de la ventilation, des occultants et de la climatisation.

III.6 Les extensions de Ergdom II

La gestion du confort dans l'habitat consiste à maîtriser l'ensemble des conditions climatiques caractérisant une ambiance donnée. Les différents appareils gérés par le système vont modifier les éléments composant cette ambiance. Le concept de ERGDOM étant générique, il peut être appliqué, sans modification profonde, à la gestion des nouveaux types d'appareils. Les adaptations porteront uniquement sur le modèle thermique de l'habitat.

III.6.1 Approche Ergdom II pour la climatisation

Le concept ERGDOM générera le froid comme le chaud. Le modèle thermique sera ainsi inchangé et seule la partie dédiée à la commande sera adaptée au pilotage de la climatisation. La figure 44 représente l'architecture de ERGDOM existant pour la gestion du confort thermique.

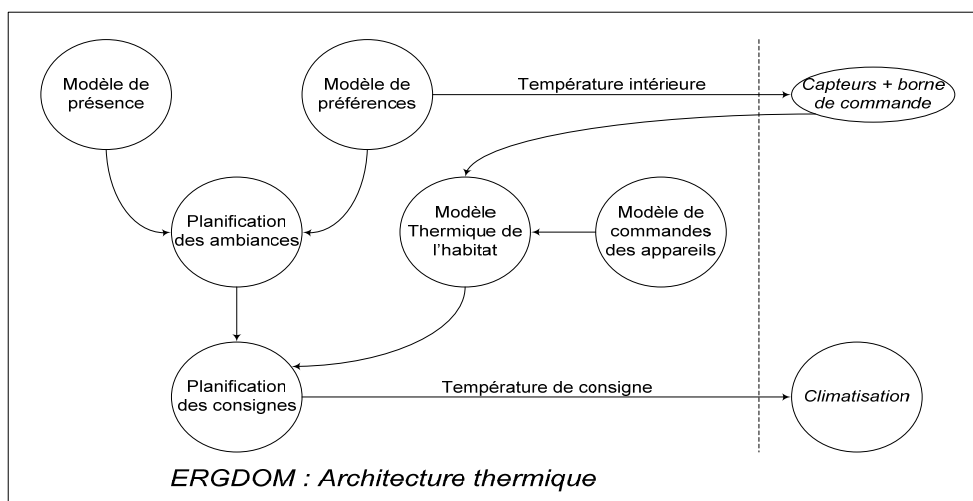


Figure 44 : Architecture ERGDOM : gestion du confort thermique (rafraîchissement).

III.6.2 Approche Ergdom II pour la gestion des occultants

Les occultants peuvent être traités en tant qu'apport ou perte d'énergie, mais également en tant que confort visuel. Le modèle thermique de l'habitat sera adapté pour prendre en compte les effets de l'ensoleillement sur la température intérieure. Le concept ERGDOM étendu au confort visuel est illustré figure 45.

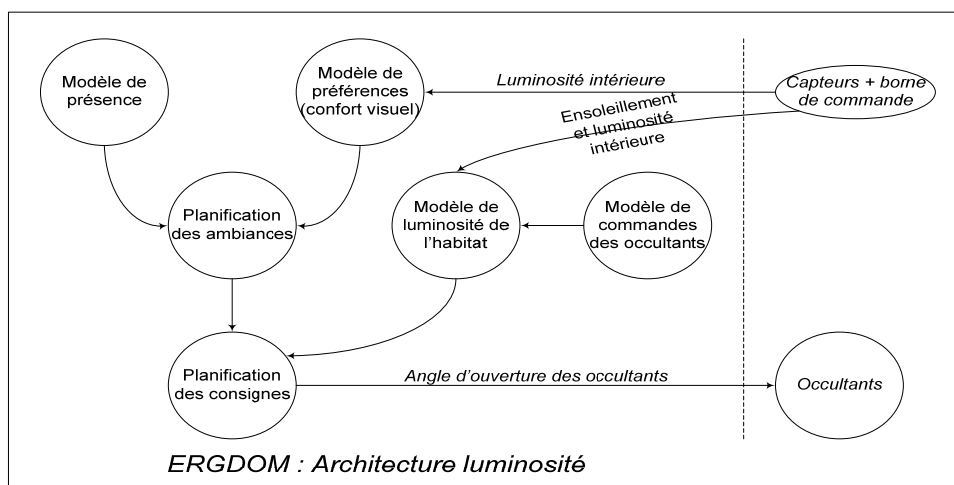


Figure 45 : Architecture ERGDOM : gestion du confort visuel.

III.6.3 Approche Ergdom II pour la ventilation

Si les normes imposent un débit constant de renouvellement de l'air, il n'est alors pas utile d'appliquer le concept de ERGDOM à la gestion de la ventilation. En revanche, si l'utilisateur a la possibilité de piloter son système de ventilation, le concept peut être appliqué (figure 46). Le modèle thermique sera alors modifié pour pouvoir estimer la température interne en fonction du taux de renouvellement de l'air et de la température extérieure.

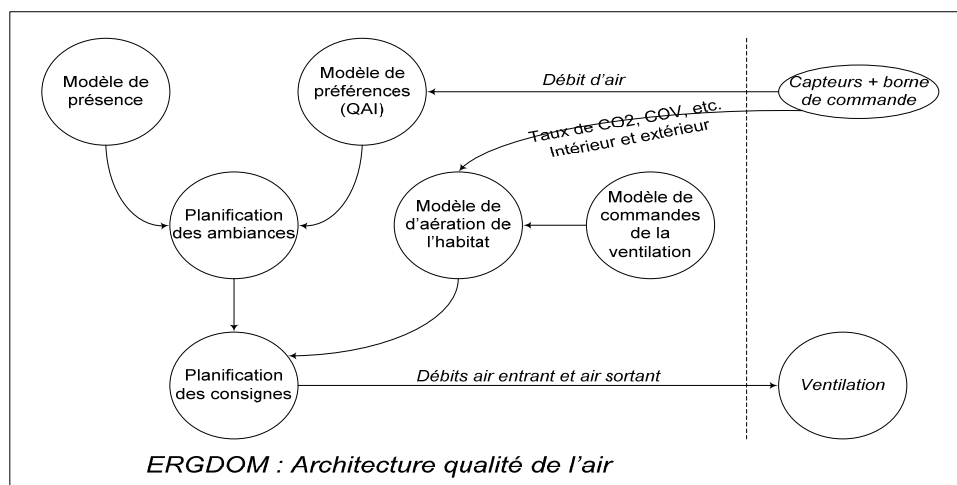


Figure 46 : Architecture ERGDOM : gestion de la qualité de l'air.

III.6.4 Approche Ergdom II pour la gestion de l'humidité

La gestion de l'humidité s'effectue de la même façon que la gestion de la température. L'hypothèse est que l'humidité est gérée par un automatisme spécifique qui maintient un degré d'humidité choisi (par exemple : humidificateur, système de ventilation hygroréglable, etc.). Le modèle thermique est remplacé par un modèle hygrométrique capable d'estimer le comportement de l'habitat (voir figure 47).

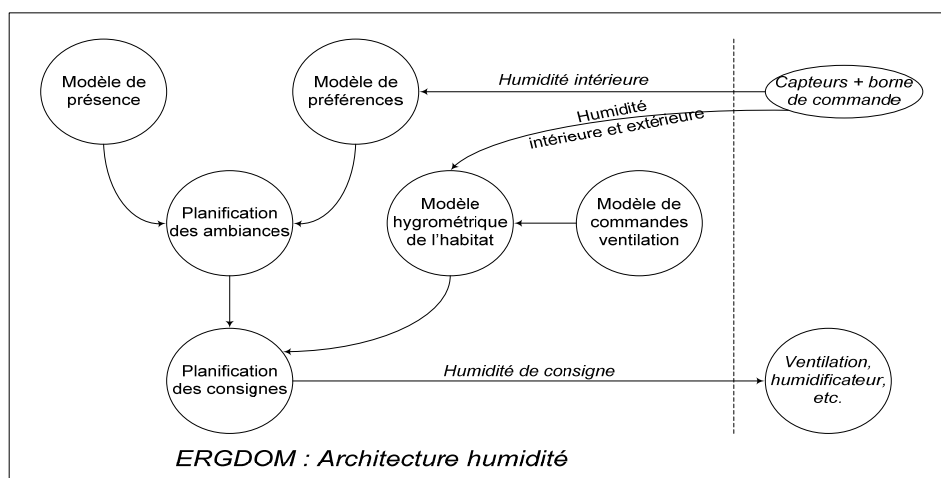


Figure 47 : Architecture ERGDOM : gestion de l'humidité.

III.6.5 Problèmes posés par l'intégration des fonctionnalités

Les exigences nouvelles induisent une complexité beaucoup plus importante du système par l'introduction de nouvelles variables et de nouveaux scénarios : il ne serait pas raisonnable de construire des automatismes spécifiques à ces différents cas et d'imaginer une supervision globale. En effet, toutes les variables ne sont pas indépendantes... Le plus raisonnable est de considérer les modèles de commande sur le concept de confort tout en ré-utilisant les acquis dans une conception compacte.

La contrainte de réduction de consommation d'énergie nécessite de choisir, durant la phase de décision, le type d'appareil qui sera utilisé pour réguler l'ambiance. Ce choix s'effectuera selon un critère de minimisation du coût énergétique. Cette étape de décision ne peut s'accomplir que dans un modèle de plus haut niveau intégrant les trois sous-systèmes ERGDOM en parallèle.

Deux types d'intégration existent si l'on considère comme cible : l'habitat et le petit tertiaire. Quelque soit l'environnement, les règles de décision concernant le choix du scénario de plus basse consommation énergétique seront définies. Celles-ci privilégieront les sources naturelles d'apport ou de perte énergétique à savoir les occultants et la ventilation.

Pour l'habitat, les appareils de ventilation, de climatisation et de gestion des occultants sont entièrement pilotables par ERGDOM. L'intégration porte donc sur l'ensemble des concepts ERGDOM II.

Dans le petit tertiaire, la ventilation est souvent collective. L'intégration portera donc sur les modèles ERGDOM II dédiés à la gestion de la climatisation et au pilotage des occultants.

A ce niveau, il est possible de mettre en œuvre une approche multicritères pour ajouter à la gestion de la température, la clarté et la ventilation. Ceci permet d'estimer l'ambiance préférée de l'utilisateur en prenant en compte plusieurs dimensions de confort (thermique, visuel, olfactif).

III.7 Evaluation des apports naturels pour la gestion du confort

Dans la conception du système ERGDOM II, le chauffage et la climatisation restent des acteurs majeurs autour desquels il faut maîtriser les interactions avec des facteurs d'influences. Ces interactions sont, pour partie, gérées par les réglementations en place que nous allons rapidement rappeler. Elles contraignent les apports naturels, à savoir le « free cooling » et le rayonnement solaire, qu'il est judicieux d'exploiter dans une gestion écologique du confort. Ces deux types de ressources énergétiques ont été caractérisés au travers de simulations numériques également présentées dans cette section.

III.7.1 Exigences et réglementation

Les logements construits depuis le 1^{er} juin 2001 sont soumis aux exigences de la réglementation thermique 2000 (RT2000) définie par l'arrêté du 29 novembre 2000 et entériné par le décret n°2000-1153. Notons que la nouvelle réglementation thermique (RT2005), arrêté du 24 mai 2006, ne remet pas en cause les principes de la RT2000 sur lesquels nous nous sommes basés dans notre étude.

Plusieurs zones climatiques, illustrées figure 48, sont distinguées par la réglementation RT2000. La France est en effet découpée en 3 zones climatiques pour l'hiver (H1, H2, H3) et 4 zones climatiques pour l'été (Ea, Eb, Ec, Ed).

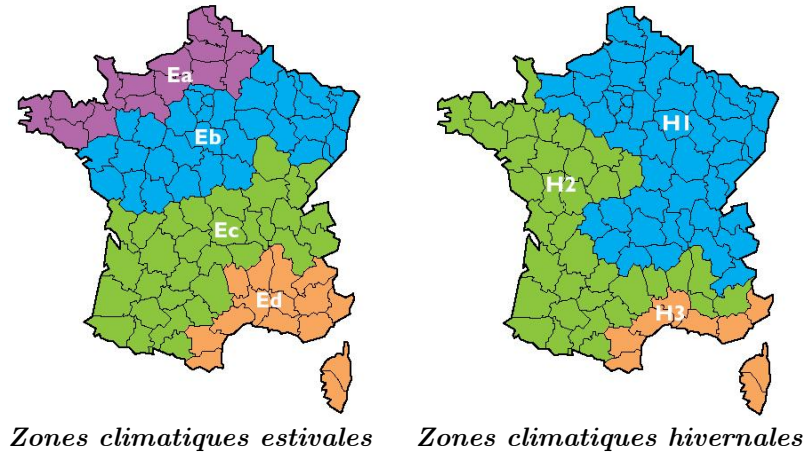


Figure 48 : Zones climatiques de France selon la RT2000.

Le *free cooling* peut être effectué par ventilation naturelle ou mécanique. La maîtrise du *free cooling* par ventilation mécanique, conduit naturellement vers la prise en compte de plusieurs normes et réglementations concernant l'installation des systèmes de ventilation mécanique contrôlée.

Différents aspects doivent être pris en compte, dont les principales exigences [Candas] sont décrites dans les textes suivants :

- Thermique : *Déperditions par renouvellement d'air et consommations des systèmes*
 - Décret n°2000-1153, code de construction et de l'habitat
 - Arrêté du 29/11/2000, caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux
- Ventilation : *Débits, règles de dimensionnement et de mise en œuvre des installations*
 - Arrêté du 24/03/1982 (modifié le 28/10/1983), aération des logements
 - Norme NFXP 50.410 (DTU 68.1), conception et dimensionnement des VMC
 - Norme NFP 50.411 (DTU 68.2), exécution des installations de VMC
 - Norme NFP 50.401, distributions d'air par conduits droits circulaires en tôle d'acier galvanisé
- Acoustique : *Contraintes sur le bruit émis et l'isolation de façade*
 - Loi du 31/12/1992, lutte contre le bruit
 - Arrêtés du 06/10/1978 (modifié le 30/05/1996 et le 23/02/1982) et du 30/06/1999, isolement et caractéristiques acoustiques des bâtiments
 - Circulaire n°2000-5 du 28/01/2000, application de la réglementation acoustique.

- Sécuritaire :
 - Arrêté du 31/01/1986 (modifié le 20/09/1986 et le 19/12/1988), rôle des systèmes de ventilation dans la protection incendie des bâtiments d'habitation.
 - Norme NF.C 15.100

Les exigences de la réglementation thermique RT2000 imposent ainsi des entrées d'air dans toutes les pièces principales, réalisées par des orifices en façades, des conduits à fonctionnement naturel ou des dispositifs mécaniques. L'air devant circuler librement des pièces principales vers les pièces de services, les sorties d'air doivent ainsi être placées dans les cuisines, les salles de bains et les cabinets d'aisance, réalisées par des conduits verticaux à tirage naturel ou des dispositifs mécaniques. L'aération des logements doit également être générale et permanente tant que la température extérieure oblige à maintenir les fenêtres fermées.

La réglementation RT2000 fournit les débits d'extraction de l'air à respecter. L'aération imposée dépend du type et du nombre de pièces du logement considéré (voir tableau 15).

| Nombre de pièces principales | Débit à extraire en petite vitesse (m^3/h) | | Débit à extraire en grande vitesse (m^3/h) | | | | |
|------------------------------|--|--------------|--|---------------------------|-------------------|--------------------|-----------|
| | Global mini | Cuisine mini | Cuisine maxi | Salle de bains ou douches | Autre salle d'eau | Cabinet d'aisances | |
| | | | | | | Unique | Multiple |
| 1 | 35 | 20 | 75 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 2 | 60 | 30 | 90 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 3 | 75 | 45 | 105 | 30 | 15 | 15 | 15 |
| 4 | 90 | 45 | 120 | 30 | 15 | 30 | 15 |
| 5 | 105 | 45 | 135 | 30 | 15 | 30 | 15 |
| 6 | 120 | 45 | 135 | 30 | 15 | 30 | 15 |
| 7 | 135 | 45 | 135 | 30 | 15 | 30 | 15 |

Tableau 15 : Débits d'extraction d'air imposés par la norme RT2000.

La modélisation thermique du logement prend en compte ces critères pour d'une part, simuler les caractéristiques réelles d'un logement individuel et d'autre part, évaluer l'influence de ces paramètres sur l'ambiance dans le respect de la réglementation en vigueur.

Le logement type (100 m²) qui a été modélisé (plans, enveloppes, parois internes, équipements, vitrage, sous-sol, etc.) comporte quatre pièces, une cuisine et une salle de bain (avec toilettes) tel que représenté figure 49 Le modèle thermique de l'habitat, élaboré avec l'outil Clim2000 (progiciel de modélisation et de simulation thermique développé par EDF-R&D), est présenté en annexe D. Les exigences des systèmes de ventilation mécanique contrôlée ont été intégrées : les entrées d'air sont représentées en bleu et les extractions d'air en rouge. Les débits d'extraction d'air ainsi pris en compte sont présentés dans le tableau 15 (ligne n°4) conformément à la réglementation RT2000.

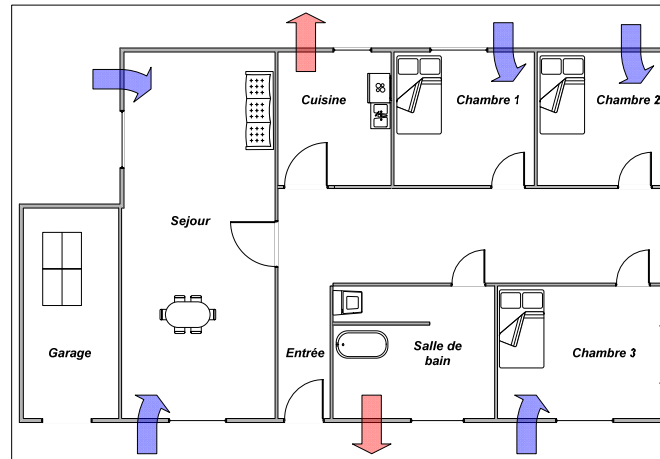


Figure 49 : Modélisation d'un logement type.

III.7.2 Principe du « Free cooling »

Le « free cooling » est un procédé utilisé pour refroidir un produit à partir de l'air ambiant (ou de l'eau), sans utiliser de machine thermodynamique. Dans notre étude, il est appliqué au refroidissement du bâti en utilisant l'air extérieur lorsque celui-ci présente une température inférieure à la température intérieure. L'efficacité frigorifique du « free cooling » dépend donc de l'écart de température entre l'air extérieur et l'air intérieur. La ventilation utilisée peut être naturelle ou mécanique.

Dans le cas de la ventilation naturelle, différents moyens de réalisation sont communément envisagés :

- la ventilation unilatérale, l'air frais pénètre en partie basse de la pièce tandis que l'air chaud est évacué par le haut.
- la ventilation transversale, un courant d'air est créé grâce aux différentes pressions exercées par le vent de chaque côté du bâti.
- la ventilation par effet cheminée, des ouvertures sur la toiture et en façade et permettent la circulation de l'air.

Afin de maîtriser totalement l'impact du *free cooling* sur l'ambiance, l'étude est basée sur l'exploitation de la ventilation mécanique.

III.7.2.a Méthode de mesure des capacités de rafraîchissement

Pour estimer l'efficacité frigorifique du *free cooling* avec un système de ventilation mécanique, plusieurs scénarios de ventilation, décrits dans le tableau 16, ont été appliqués. La méthodologie consiste dès lors à comparer les températures des pièces du logement obtenues en appliquant les différents scénarios de ventilation. Les scénarios sont ainsi comparés à un scénario de référence qui présente la particularité d'avoir les débits minimums d'extraction d'air autorisés par la réglementation RT2000.

III.7.2.b Scénarios retenus

Le premier scénario de ventilation est le scénario de référence dont les débits d'air extrait sont les débits minimaux autorisés par la RT2000 ($V_{référence}$ du tableau 16).

Le second scénario (V_{reg}) de ventilation consiste à augmenter le débit d'extraction d'air lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure ($T_{ext} < T_{int}$), tout en respectant les débits minimum et maximum imposés par la réglementation RT2000.

Les troisième et quatrième (V_f et V_{f+}) scénarios de ventilation sont identiques au second. Seuls les débits maximums d'extractions d'air dépassent les valeurs autorisées par la RT2000.

| Scénario | Description | Débit d'extraction | | | |
|-----------------|---|--------------------------------|---------|--------------------------------|---------|
| | | Ventilation minimale | | Ventilation maximale | |
| | | Salle de bain | Cuisine | Salle de bain | Cuisine |
| $V_{référence}$ | Scénario de référence assurant une ventilation réduite selon les exigences de la RT2000 | 45 | 45 | / | / |
| | | <i>0,34 vol.h⁻¹</i> | | | |
| V_{reg} | Ventilation maximale dont les débits sont autorisés par la RT2000 | 45 | 45 | 60 | 120 |
| | | | | <i>0,6 vol.h⁻¹</i> | |
| V_f | Ventilation forcée dont les débits maximaux dépasse les limites fixées par la RT2000 | 45 | 45 | 230 | 230 |
| | | | | <i>1,75 vol.h⁻¹</i> | |
| V_{f+} | Ventilation forcée dont les débits maximaux dépasse les limites fixées par la RT2000 | 45 | 45 | 656 | 656 |
| | | | | <i>6 vol.h⁻¹</i> | |

Tableau 16 : Caractéristiques des scénarios de ventilation.

III.7.2.c Variables retenues

Les variables observées pour quantifier le rafraîchissement naturel sont basées sur la température. La température extérieure et les températures de chaque pièce sont ainsi exploitées et pour simplifier l'observation du phénomène, la température de la chambre n°3 (T_{ch_3} , exposition sud) et la moyenne des températures des deux autres chambres et du séjour (T_{ch_m}) sont distinguées. Les températures des chambres sont quasiment similaires (écart maximal des températures de 0,2 °C) alors que l'évolution des températures du séjour varie légèrement plus (écart de température maximal de 0,6°C) par rapport aux trois chambres.

Les variables utilisées, pour mettre en évidence le rafraîchissement par ventilation mécanique, sont donc :

- La température de la chambre n°3,
- La moyenne des températures du séjour et des chambres n°1 et n°2.

III.7.2.d Capacité de rafraîchissement

Scénario météorologique fourni par « Météo France » représentant la moyenne des évolutions sur les 30 dernières années.

- Exemple : Trappes

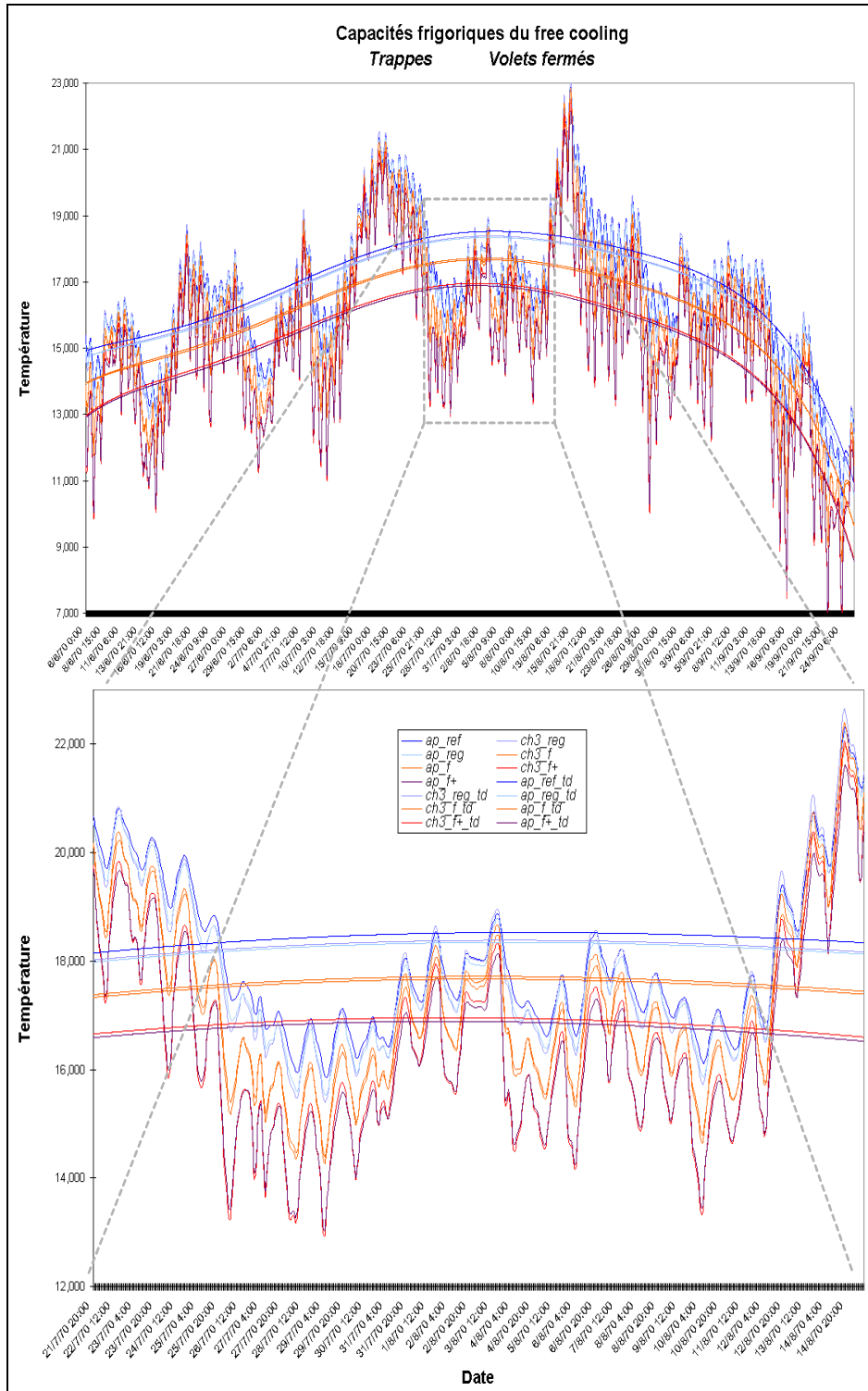


Figure 50 : Evolution des températures en fonction des scénarios de ventilation.

La figure 50 présente l'évolution des températures, obtenues à partir des simulations, en fonction des scénarios de ventilation. Pour chaque scénario, la température de la chambre n°3 et la moyenne des températures du séjour et des chambres n°1 et n°2 sont tracées. La tendance des évolutions est également calculée afin d'avoir un aperçu global de l'écart des températures entre les scénarios.

Le tableau 17 synthétise les capacités de rafraîchissement du « free cooling » appliqué sur le logement Mozart dans les conditions météorologiques de Trappes, Agen et Nice en 1970. Il présente ainsi l'apport moyen de fraîcheur sur l'ensemble de la période estivale, ainsi que l'écart maximal en température rencontré durant cette période.

Le *gain moyen* en fraîcheur correspond à la moyenne des écarts entre les tendances des scénarios et l'*écart maximal* correspond à la différence maximale des températures à un instant donné, sur l'ensemble de période estivale. Les gammes de température du tableau 17 sont issues des résultats obtenus après simulation des météo de Trappes, Agen et Nice.

| <i>Scénarios comparés au scénario de référence</i> | <i>Gain moyen</i> | <i>Ecart maximal</i> |
|--|-------------------|----------------------|
| Scénario n°2 <i>Régulation RT2000</i> | [0,2°C - 0,3°C] | [0,4°C - 0,8°C] |
| Scénario n°3 <i>Ventilation forcée</i> | [0,1°C - 0,9°C] | [1,3°C - 2,5°C] |
| Scénario n°4 <i>Ventilation forcée +</i> | [1,2°C - 1,7°C] | [2,8°C - 5,4°C] |

Tableau 17 : Capacités de rafraîchissement du free cooling.

Les résultats montrent donc que plus les débits d'extraction d'air sont élevés, plus le logement est rafraîchi. Ils montrent également que l'apport de fraîcheur est insignifiant lorsque la réglementation RT2000 est respectée. Une ventilation dépassant les limites autorisées par la RT2000 est ainsi nécessaire pour profiter pleinement du pouvoir rafraîchissant du « free cooling » qui peut rafraîchir jusqu'à 5,4°C dans certaines conditions.

III.7.3 La régulation du réchauffement par rayonnement solaire

Le rayonnement solaire global parvenant sur terre est constitué de composantes diffuses et directes. Le rayonnement diffus, dispersé par les nuages et la vapeur, provient de l'ensemble du ciel et possède une faible densité énergétique. Le rayonnement solaire direct est souvent utilisé en thermie solaire dont les techniques pour capter cette énergie sont :

- La *photovoltaïque*, transformation du rayonnement solaire en électricité par des cellules exploitant l'effet photovoltaïque (panneaux solaires, etc.)
- La *thermique*, exploitation de la chaleur (centrales solaires thermodynamiques, chauffe-eau et chauffage solaire, rafraîchissement solaire, etc.)
- Le *passif*, exploitation de l'apport direct du rayonnement solaire. Architecture, orientation, matériaux, surfaces vitrées jouent un rôle important pour optimi-

ser la proportion de l'apport solaire passif dans le chauffage et l'éclairage du bâti.

Notre étude porte sur l'énergie solaire passive pour chauffer le bâti avec un coût quasi-nul. L'apport d'énergie est alors régulé par l'ouverture des volets de chaque fenêtre.

Pour estimer l'efficacité calorifique du rayonnement solaire avec un système de volets mécaniques, plusieurs scénarios d'occultation ont été appliqués. La méthodologie, identique à celle citée précédemment, consiste à comparer l'évolution des températures des pièces du logement obtenues en appliquant les différents scénarios d'occultations. Les scénarios sont également comparés à un scénario de référence.

Trois scénarios sont distingués selon que les volets sont fermés, entre-ouverts ou ouverts. Pour l'ensemble des scénarios, les débits de ventilation sont régulés selon les exigences de la réglementation RT2000 (*i.e. scénario n°2 du tableau 16*). Le scénario de référence correspond à une évolution libre des températures du logement volets fermés (**VF**). Les deuxième et troisième scénarios (**VE et VO**) correspondent à une évolution libre des températures du logement volets entre-ouverts et volets ouverts.

- Exemple : Trappes

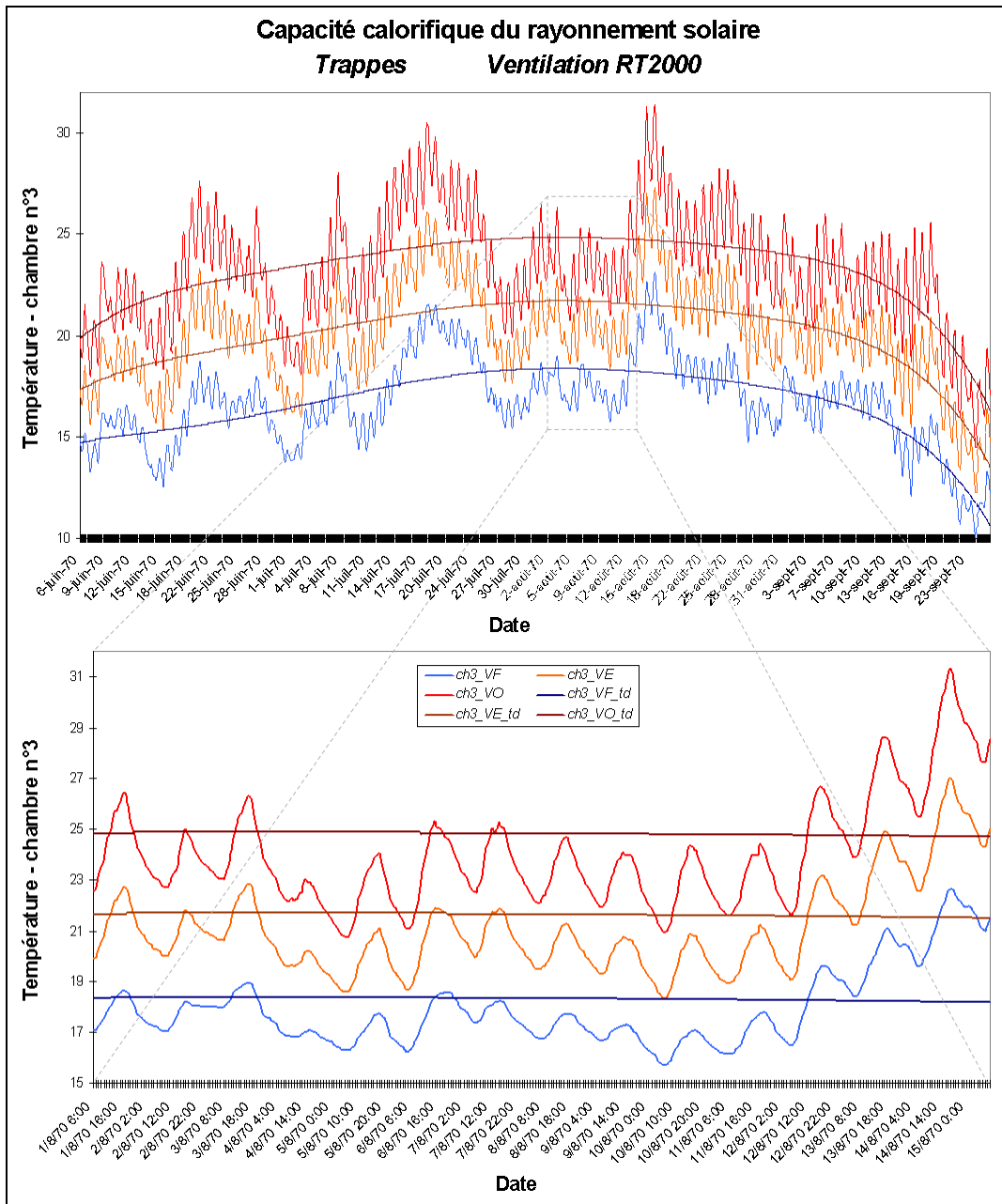


Figure 51 : Evolution des températures en fonction des scénarios d'occultation.

La figure 51 présente l'évolution des températures, obtenues à partir des simulations, en fonction des scénarios d'occultations explicités section III.7.3 . Pour chaque scénario, les températures du séjour et des trois chambres ont été distinguées du fait de leurs différentes expositions. La tendance des températures est calculée afin de visualiser l'écart des températures entre les scénarios.

- Bilan

Le tableau 18 synthétise les capacités calorifiques du rayonnement solaire appliqué sur le logement Mozart dans les conditions météorologiques de Trappes, Agen et Nice en 1970. Il présente ainsi l'apport moyen de chaleur sur l'ensemble de la période esti-

vale, ainsi que l'écart maximal en température rencontré durant cette période pour chaque pièce du logement.

Le *gain moyen* de chaleur correspond à la moyenne des écarts entre les tendances des scénarios. L'*écart maximal* correspond à la différence maximale des températures à un instant donné, sur l'ensemble de période estivale. Les gammes de température du tableau 18 sont issues des résultats obtenus après simulation des météo de Trappes, Agen et Nice.

| Scénarios comparés au scénario de référence | Séjour | | Chambre n°1 | | Chambre n°2 | | Chambre n°3 | |
|---|------------|---------------|-------------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| | Gain moyen | Ecart maximal | Gain moyen | Ecart maximal | Gain moyen | Ecart maximal | Gain moyen | Ecart maximal |
| Volets entre-ouverts | 2,8 - 3°C | 3,9 - 4 °C | 2,7 - 2,9°C | 3,7 - 3,8°C | 2,8 - 3,1 °C | 4,5 - 6,2°C | 3,3 - 3,6°C | 4,9 - 7,1°C |
| Volets ouverts | 5,7 - 6°C | 7,9 - 8°C | 5,3 - 5,7°C | 7,6°C | 4,5 - 6,2°C | 9,1°C | 7,1°C | 9,8°C |

Tableau 18 : Capacités calorifique du rayonnement solaire.

Les résultats montrent que plus l'ouverture des occultants est grande, plus les chambres sont réchauffées la journée. Ils montrent également qu'une gestion inadaptée des occultants peut provoquer des températures inconfortables (parfois supérieures à 30°C) et qu'une gestion adaptée permet, au contraire, d'obtenir des températures de confort sans appareil de régulation thermique.

III.7.4 Synthèse

La logique d'intégration des quatre automatismes gérés par ERGDOM II est présentée dans le tableau 19 :

- Nous proposons d'exploiter le principe de l'Humidex (corrélant température opérative et degré hygrométrique) pour l'estimation du confort thermique en présence des usagers.
- Nous proposons, en l'absence des usagers, de considérer les volets roulants comme des actionneurs thermiques utilisables à plein régime.
- La ventilation doit d'abord être gérée par rapport aux normes choisies en vigueur. Au-delà, elle intervient sur :
 - la détection de polluants en actionneur sécuritaire,
 - sur la définition de la température opérative (température apparente plus faible en présence de ventilation).
- L'influence de l'activité de l'utilisateur sur l'ambiance est considérée en tant qu'apport : de chaleur, d'humidité et de CO₂. Ces différents apports, résultant des activités de l'utilisateur, pourront être corrélés à un unique indice tel que l'« agitation » (utilisé dans PROSAFE).
- Le confort prend ainsi en considération l'ambiance de l'habitat (T°, H, CO₂) dans un premier temps, puis l'activité humaine (horaire, agitation).

| | Automate Objectif : Température | | Automate Objectif : Humidité | | Automate Objectif : CO₂ | | Automate Objectif : Luminosité | |
|---------------------------------|---|----------|--|----------|--|----------|---|----------|
| | Absence | Présence | Absence | Présence | Absence | Présence | Absence | Présence |
| <i>Appareils contrôlés</i> | | | | | | | | |
| Climatisation | ◆ | ○ | ◆ | ○ | | | | |
| Ventilation | ◆ | ○ | ◆ | ○ | ◆ | ○ | | |
| Eclairage électrique | | ○ | | | | | | ○ |
| Eclairage solaire | | | | | | | | ○ |
| Energie Solaire | ◆ | ○ | | | | | | |
| <i>Activités humaines</i> | | | | | | | | |
| Apport de chaleur | | ○ | | | | | | |
| Apport d'humidité | | | | ○ | | | | |
| Apport de CO₂ | | | | | | ○ | | |

 Phénomène quantifié

Capteurs :

- *Présence* : dans toutes les pièces
- *Température* : dans toutes les pièces (pour estimer le confort thermique)
- *Humidité* : dans toutes les pièces (pour estimer le confort thermique)
- *Odeur* : cuisine et salles de bain (pour estimer la QAI, ex. : CO₂, COV etc.)
- *Luminosité* : dans toutes les pièces (pour estimer le confort visuel).

Tableau 19 : Analyse des interactions entre automates.

- Cette première phase de simulation a permis de mesurer l'influence du *free cooling* et du réchauffement par rayonnement solaire sur l'ambiance de l'habitat.
 - Pour le rafraîchissement par *free cooling*, les simulations ont montré qu'il était possible de rafraîchir l'habitat d'environ :
 - 0,3°C en moyenne en respectant la RT2000
 - 0,9°C en moyenne en dépassant les vitesses maximales de ventilation autorisées par la RT2000.
 - Pour le réchauffement par rayonnement solaire, les simulations ont montré qu'il fallait être attentif, d'une part, à l'exposition des chambres au soleil car selon l'orientation un gain moyen en température peut varier de 5,3°C à 7,1°C, et d'autre part, aux situations inconfortables où une gestion inadaptée des occultants peut provoquer des températures supérieures à 30°C.
- Une seconde phase de simulation initialement prévue pour mesurer l'influence des différents appareils contrôlés sur l'ambiance n'a pu être effectuée en raison des capacités limitées du simulateur pour l'exécution de scénarios de régulation complexes : Clim2000 s'appuie sur le solveur ESACAP qui représente le problème sous forme d'équations électriques analogiques...
- Une troisième phase pourra prendre en compte l'influence des activités humaines sur l'ambiance en fonction de données issues des travaux menés par le département « EnerBat » de EDF sur l'activité humaine dans l'habitat.

III.8 Définition d'une logique décisionnelle ERGDOM II

III.8.1 Principe

Le module de logique décisionnelle a pour rôle de choisir la forme d'actionnement pour atteindre une consigne de référence. Le module considère chaque pièce de l'habitation pour laquelle deux situations sont possibles : pièce occupée, pièce non occupée, étant entendu que la perspective d'occupation ou de non occupation renvoie vers les deux situations possibles précédentes. En fonction de la présence de l'utilisateur, 3 modes de gestion de confort sont considérés :

- Le mode '*confort*' : lorsque la pièce considérée est occupée par l'utilisateur,
- Le mode '*préconfort*' : lorsque la pièce est vide et que l'appartement est occupé (à définir entre 0 et -3°C),
- Le mode '*minimal*' : lorsque l'appartement est vide pour une durée inférieure à une journée (ne pas dépassée -3 à 4°C pour des raisons économiques),
- Le mode '*hors gel*' : lorsque l'appartement est vide et que le mode 'hors gel' est activé.

Remarquons qu'une étude de ERGDOM menée par EDF-R&D pour le tertiaire réunissait les modes 'préconfort' (cas 2) et 'réduit' (cas 3).

Comme cité section 1.1, les modes 'confort' et 'réduit' sont, pour le module de logique décisionnelle, identiques car distingués par la valeur de la consigne. Le mode 'minimal' est quant à lui caractérisé par l'exploitation des actionneurs de climatisation et chauffage, seulement avant l'arrivée de l'utilisateur dans l'appartement.

Quatre types de traitements sont effectués séquentiellement, tels que présentés figure 52 :

- Interprétation des consignes,
- Détermination de la vitesse générale de la ventilation mécanique contrôlée en respectant les normes sur la qualité de l'air intérieure (le critère étant le CO_2).
- Choix de la forme d'actionnement complémentaire des apports caloriques ou réfrigérants centraux : la position des volets, climatisation, chauffage.
- Calcul des commandes en exploitant le modèle thermique.

Le choix des commandes se fait à partir de règles expertes et des résultats issus du modèle personnalisé du confort humain. La quantification des commandes concernant les occupants, la climatisation et le chauffage est déterminée par l'organe de commande et le modèle thermique. Nous détaillons ci-après chacune de ces étapes jusqu'à aboutir au calcul des commandes.

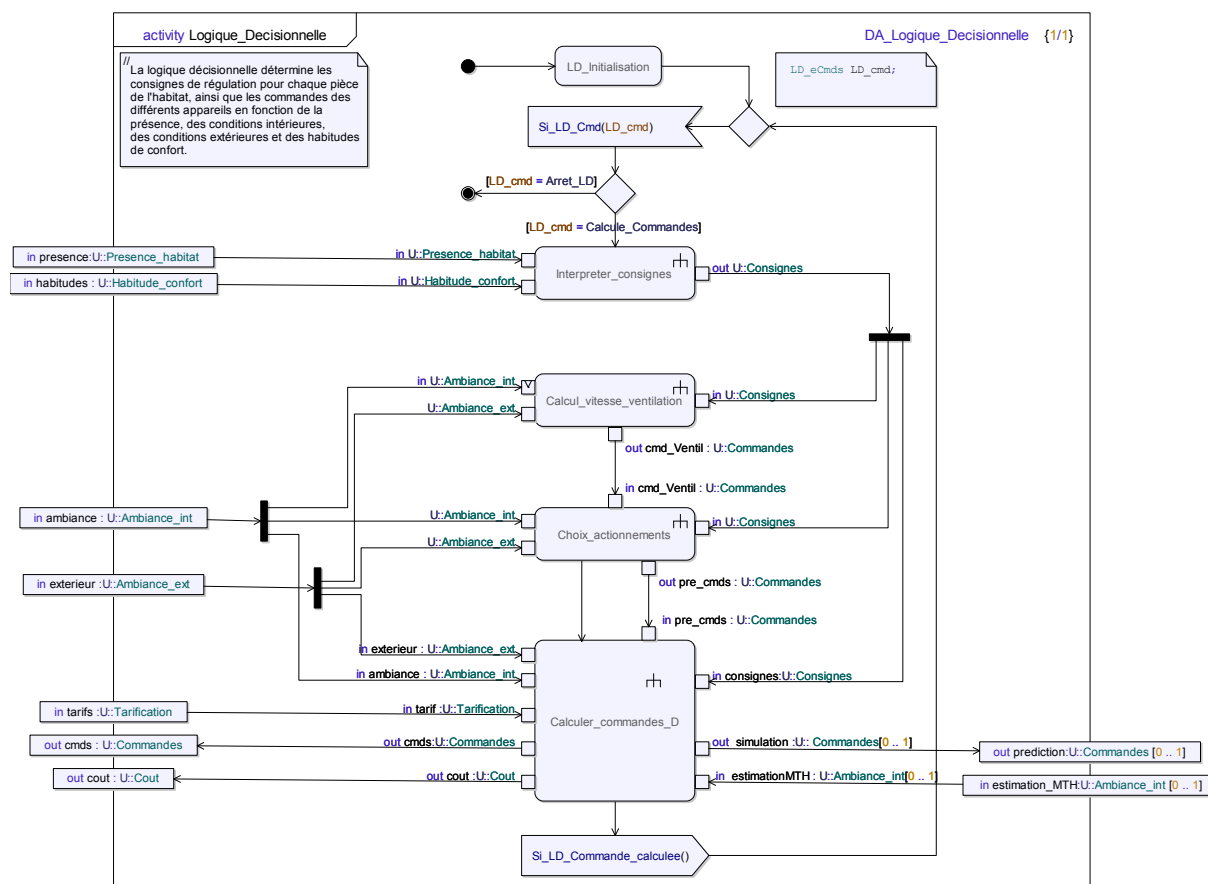


Figure 52 : Procédure de la logique décisionnelle.

III.8.2 L'interprétation des consignes

Nous avons vu section III.4 que le confort ressenti par les personnes prend en compte de nombreux paramètres (vêtements, activité physique, température, humidité, vitesse de l'air ainsi que les variations de températures) dont certains, tel le clot, sont difficilement mesurables par les technologies actuelles. Nous limitons le confort à la température et l'humidité pour des raisons de coût économique. Nous avons également justifié section III.4.2 l'intérêt de l'indice Humidex pour la modélisation de l'inconfort et dont la particularité est de mesurer l'intensité de chaleur ressentie par les personnes en fonction de la température ambiante et de l'humidité relative. A l'origine, le principe d'exploitation de l'Humidex est le suivant :

- les occupants se sentent en situation de confort pour les ambiances dont l'indice est inférieur à 29,
- un certain inconfort est ressenti par les personnes pour les ambiances dont l'indice est compris entre 30 et 39,
- un inconfort important est caractérisé par un indice compris entre 40 et 45,
- les ambiances dangereuses pour la santé des personnes sont caractérisées par un indice supérieur à 45.

Les valeurs de l'Humidex fournies par « Environnement Canada » sont présentées figure 53a et les domaines de valeurs identifiés figure 53b (notons que les quelques

valeurs extrêmes non fournies par « Environnement Canada » ont été complétées en se basant sur l'arithmétique logique liant les valeurs entre elles).

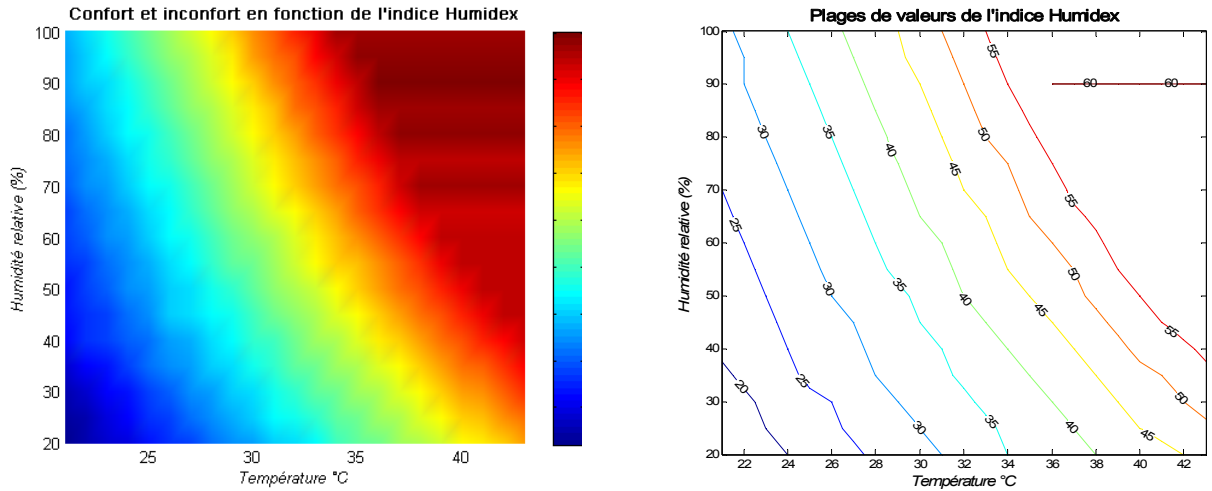


Figure 53 : Valeurs de l'indice Humidex.

Comme l'ensemble de ces valeurs représente l'inconfort ressenti par les personnes de manière générale, nous proposons, dans le contexte de personnalisation du confort, d'adapter la grille de référence en fonction des interventions de l'utilisateur. Au départ et en l'absence de connaissance des ambiances privilégiées des usagers, nous choisissons d'exploiter les valeurs par défaut de la grille. Durant la phase d'apprentissage, nous proposons l'exploitation de l'Humidex selon les principes suivants :

- les conditions de confort (ou d'absence d'inconfort) sont caractérisées par l'indice de valeur 29,
- les conditions d'inconfort concernant les sensations de chaleur excessive correspondant aux valeurs supérieures à 29 (conformément aux principes déjà en place),
- les conditions d'inconfort relatives aux sensations de fraîcheur correspondent aux valeurs inférieures à 29,
- Lorsque l'utilisateur interagit pour modifier l'ambiance, qui n'est donc pas 'confortable', la valeur de l'indice correspondant à la température et à l'humidité observées est écartée de la valeur 29. L'écart est proportionnel à la nature de la commande et nous proposons pour les commandes « -3 », « -2 », « -1 », « +1 », « +2 » et « +3 » les variations : +3, +2, +1, -1, -2, -3,
- Lorsque l'utilisateur est présent dans une pièce durant une période déterminée sans modifier l'ambiance, l'indice correspondant à l'ambiance observée est rapproché de la valeur 29 s'il ne l'est pas déjà.

La figure 54 illustre l'adaptation du modèle de confort après que l'utilisateur ait commandé le système pour augmenter la 'chaleur' par la commande « +2 » étant dans une ambiance à 26 °C et à 45% d'humidité relative.

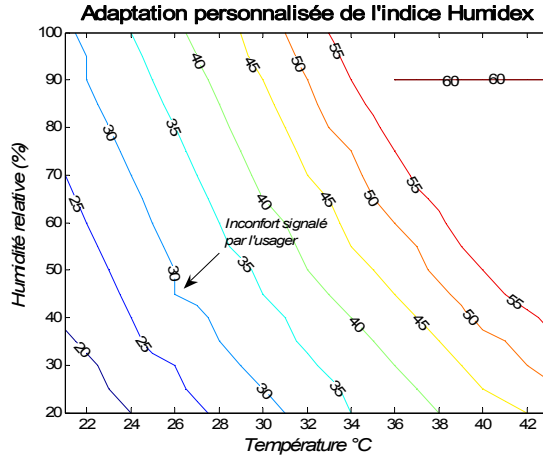


Figure 54 : Personnalisation du modèle de confort.

Au fur et à mesure de l'apprentissage, les plages des conditions de confort et d'inconfort seront ainsi identifiées. A partir de l'ambiance observée, signalée 'inconfortable' par l'utilisateur, les nouvelles consignes seront celles de la grille correspondant à l'indice Humidex de valeur 29 le plus proche des conditions intérieures de la pièce.

III.8.3 Le calcul de la vitesse de ventilation

Le calcul de la vitesse de ventilation mécanique contrôlée distingue deux phases : une première vérification des règles sécuritaires liées au polluant puis le calcul de la vitesse de la ventilation générale.

| <i>Air vicié</i> | |
|---|---|
| <u>Si</u> ($A_{int} > A_{norme} > A_{ext}$) | <u>Si</u> ($A_{ext} > A_{int} > A_{norme}$) |
| $V = 2$ | $V = 0$ Message = « Alerte : air vicié » |

Tableau 20 : Règles de sécurité pour la qualité de l'air.

La vitesse de ventilation choisie a un impact sur toutes les pièces de l'appartement. Dans cette phase de traitement, toutes les pièces sont donc considérées. Comme illustré tableau 21, les consignes pour chacune des pièces, ainsi que les prédictions calculées par le modèle thermique selon les 2 vitesses de ventilation, fournissent les données d'entrées. A partir de là, les distances entre les points de départs (prédictions) et le point d'arrivée (consignes) sont calculées pour chaque pièce. La somme des distances est enfin calculée pour chacune des pièces occupées par l'utilisateur.

| | | | <i>Distances par rapport aux consignes</i> | | | |
|----------------|---------------------------------------|---|--|--|--|----------------------|
| | <i>Cons</i> | <i>Pred (V=1)</i> | <i>Pred (V=2)</i> | <i>Cons-Pred (V=1)</i> | <i>Cons-Pred (V=2)</i> | <i>Pièce occupée</i> |
| <i>Pièce 1</i> | { T _{C1} , H _{C1} } | { T _{V11} , H _{V11} } | { T _{V12} , H _{V12} } | d₁₁ | d₁₂ | 0 |
| <i>Pièce 2</i> | { T _{C2} , H _{C2} } | { T _{V21} , H _{V21} } | { T _{V22} , H _{V22} } | d₂₁ | d₂₂ | 1 |
| <i>Pièce 3</i> | { T _{C3} , H _{C3} } | { T _{V31} , H _{V31} } | { T _{V32} , H _{V32} } | d₃₁ | d₃₂ | 1 |
| | | | Somme | d₂₁ + d₃₁ | d₂₂ + d₃₂ | |

Tableau 21 : Choix de la vitesse de ventilation.

La vitesse de ventilation adéquate correspond au scénario de ventilation dont la somme des distances est la plus faible.

III.8.4 Le choix des actionneurs

Le choix des actionneurs consiste à déterminer l'utilisation qui sera faite des différents appareils pour augmenter, ou diminuer, la température, l'humidité et la luminosité.

Terminologie des pré-consignes

| <i>Terminologie</i> | | |
|----------------------|--|--|
| <i>Classe</i> | <i>Nom</i> | <i>Signification</i> |
| <i>Préconditions</i> | R_{ext} | Il y a de l'ensoleillement extérieur |
| | O_f | Les occultants sont totalement fermés |
| | O_o | Les occultants sont totalement ouverts |
| | O_n | Les occultants sont mi-ouverts |
| | T_{ext}, T_{int} | Différence entre température extérieure et intérieure (1 = écart positif, 0 = écart négatif) |
| | H_{ext}, H_{int} | Différence entre humidité extérieure et intérieure (1 = écart positif, 0 = écart négatif) |
| <i>Actions</i> | A | Taux de CO ₂ dans l'air : $A_{int}, A_{ext}, A_{norme}$ (ppm) |
| | Clim- | Climatisation refroidit |
| | Clim+ | Climatisation chauffe |
| | Ch+ | Les convecteurs chauffent |
| | O+ | Les occultants s'ouvrent |
| | O- | Les occultants se ferment partiellement |
| | O _t | Les occultants se ferment totalement |
| V | Ventilation (2 vitesses V_1 et V_2) | |
| <i>Effets</i> | T↗ | La température croît |
| | T↘ | La température décroît |
| | H↗ | L'humidité croît |
| | H↘ | L'humidité décroît |
| | L↗ | La luminosité croît |
| | L↘ | La luminosité décroît |

Les opérations effectuées dans la procédure de choix des actionnements sont basées sur des règles expertes :

1. Les règles d'interprétation des consignes,
2. Les règles expertes sur effets des actionneurs,
3. Le choix des actionneurs.

III.8.4.a Interprétation des consignes pour une pièce

Nous avons vu que les objectifs visant à augmenter ou à diminuer les paramètres de température, d'humidité et de luminosité sont identifiés sur le principe détaillé section III.8.2 , en fonction de l'ambiance intérieure observée et de la consigne à atteindre.

| <i>Pour la pièce i</i> | Objectifs |
|--|------------------|
| Obs $_t$ (T) > Cons (T) | T \nearrow |
| Obs $_t$ (T) < Cons (T) | T \searrow |
| Obs $_t$ (H) > Cons (H) | H \nearrow |
| Obs $_t$ (H) < Cons (H) | H \searrow |
| Obs $_t$ (L) > Cons (L) | L \nearrow |
| Obs $_t$ (L) < Cons (L) | L \searrow |

Tableau 22 : Identification des objectifs de la régulation.

III.8.4.b Description des règles expertes d'exploitation des actionneurs

Pour chaque actionneur, les pré-conditions, actions et effets sont identifiés :

- **Pour la ventilation**

| <i>Pré-conditions</i> | | <i>Action</i> | <i>Effets</i> | | | |
|---------------------------|---------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| $\Delta H_{ext}, H_{int}$ | $\Delta T_{ext}, T_{int}$ | V | T \searrow | T \nearrow | H \searrow | H \nearrow |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |

La vitesse de ventilation étant déjà calculée (voir étape n°2), les effets sur l'ambiance doivent tout de même être pris en compte.

• Pour les occultants

| Pré-conditions | | | Actions | | | Effets | | | |
|------------------|----------------|----------------|---------|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| R _{ext} | O _o | O _f | O+ | O- | O _t | T [∅] | T [∞] | L [∅] | L [∞] |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | x | x | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | x | x | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | x | x | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

• Pour la climatisation

| Pré-conditions | | Actions | | Effets | | | |
|----------------|---|---------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | Clim+ | Clim- | T [∅] | T [∞] | H [∅] | H [∞] |
| / | / | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| / | / | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |

III.8.4.c Le choix des actionneurs

Sur la base des deux types de tableaux : ‘interprétation des objectifs’ et ‘règles d’exploitation des actionneurs’, le choix des actionneurs est immédiat dès que l’on considère les priorités suivantes des actionneurs : p1 = ventilation, p2 = occultants, p3 = climatisation et chauffage (considérant le critère d’économie d’énergie). Ainsi la climatisation et les convecteurs, principaux consommateurs d’énergie, seront utilisés comme appoint lorsque la personne est présente dans le logement. La corrélation des objectifs fixés et les effets de chacun des actionneurs (dépendant des conditions météorologiques) identifiés, le choix des actions apparaît par la table de vérité illustrée tableau 23.

Ci-dessous un exemple illustratif :

En fonction des observations et des consignes reçues, les objectifs sont listés :

ex. = {T[∞], H[∅], L[∅]}. Le tableau 23 synthétise l’ensemble des règles expertes identifiées précédemment :

| Pré-conditions | | | | | Actions | | | | | | Résultats | | | | | |
|------------------|----------------|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------|----|----|----------------|-------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| R _{ext} | O _o | O _f | ΔH _{ext} , H _{int} | ΔT _{ext} , T _{int} | V | O+ | O- | O _t | Clim+ | Clim- | T [↗] | T [↘] | H [↗] | H [↘] | L [↗] | L [↘] |
| x | x | x | 0 | 0 | 1 | x | x | x | x | x | 0 | 1 | 0 | 1 | x | x |
| x | x | x | 0 | 1 | 1 | x | x | x | x | x | 1 | 0 | 0 | 1 | x | x |
| x | x | x | 1 | 0 | 1 | x | x | x | x | x | 0 | 1 | 1 | 0 | x | x |
| x | x | x | 1 | 1 | 1 | x | x | x | x | x | 1 | 0 | 1 | 0 | x | x |
| 1 | 0 | 0 | x | x | x | 1 | 0 | 0 | x | x | 1 | 0 | x | x | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 1 | 0 | x | x | 0 | 1 | x | x | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 1 | x | x | 0 | 1 | x | x | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | x | x | x | 1 | 0 | 0 | x | x | 1 | 0 | x | x | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | x | x | x | 0 | 1 | 0 | x | x | 0 | 1 | x | x | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 1 | x | x | 0 | 1 | x | x | 0 | 1 |
| 0 | x | x | x | x | x | 1 | 0 | 0 | x | x | 0 | 1 | x | x | 0 | 0 |
| 0 | x | x | x | x | x | 0 | 1 | 0 | x | x | 0 | 0 | x | x | 0 | 0 |
| 0 | x | x | x | x | x | 0 | 0 | 1 | x | x | 0 | 0 | x | x | 0 | 0 |
| x | x | x | x | x | x | x | x | x | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | x | x |
| x | x | x | x | x | x | x | x | x | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | x | x |

(Les couleurs, destinées à faciliter la lecture du tableau, correspondent aux règles : de la ventilation en clair, des occultants en gris moyen et de la climatisation en gris foncé).

Tableau 23 : Logique de décision.

Les observations météorologiques pour l'exemple peuvent être les suivantes : {R_{ext}, ΔH_{ext}, H_{int}, ΔT_{ext}, T_{int}}. L'application de la méthode consiste ainsi à retenir les actions (hachuré diagonal) dont les pré-conditions sont identiques aux observations météorologiques, et dont les effets correspondent aux objectifs fixés (hachuré vertical).

| Observations | | | | | Actions possibles | | | | | | Effets | | | | | |
|------------------|----------------|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|----|----|----------------|-------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| R _{ext} | O _o | O _f | ΔH _{ext} , H _{int} | ΔT _{ext} , T _{int} | V | O+ | O- | O _t | Clim+ | Clim- | T [↗] | T [↘] | H [↗] | H [↘] | L [↗] | L [↘] |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | | 1 | | | | | 1 | 1 | 1 | | | |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | | | 1 | | | | | 1 | 1 | | | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | 1 | 1 | | | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | | | | | | 1 | | 1 | 1 | | | |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | |

Les actions issues de la logique sont dans cet exemple : { V, O+, Clim- }

III.8.5 Le calcul des commandes

A partir des consignes, des pré-commandes, des conditions extérieures et intérieures, la procédure de calcul des commandes, présentée figure 55, va interagir avec le module de prédiction thermique de l'habitat pour déterminer les commandes optimales. Le principe consiste à effectuer une recherche itérative jusqu'à trouver le bon compromis entre le niveau confort attendu et la consommation énergétique.

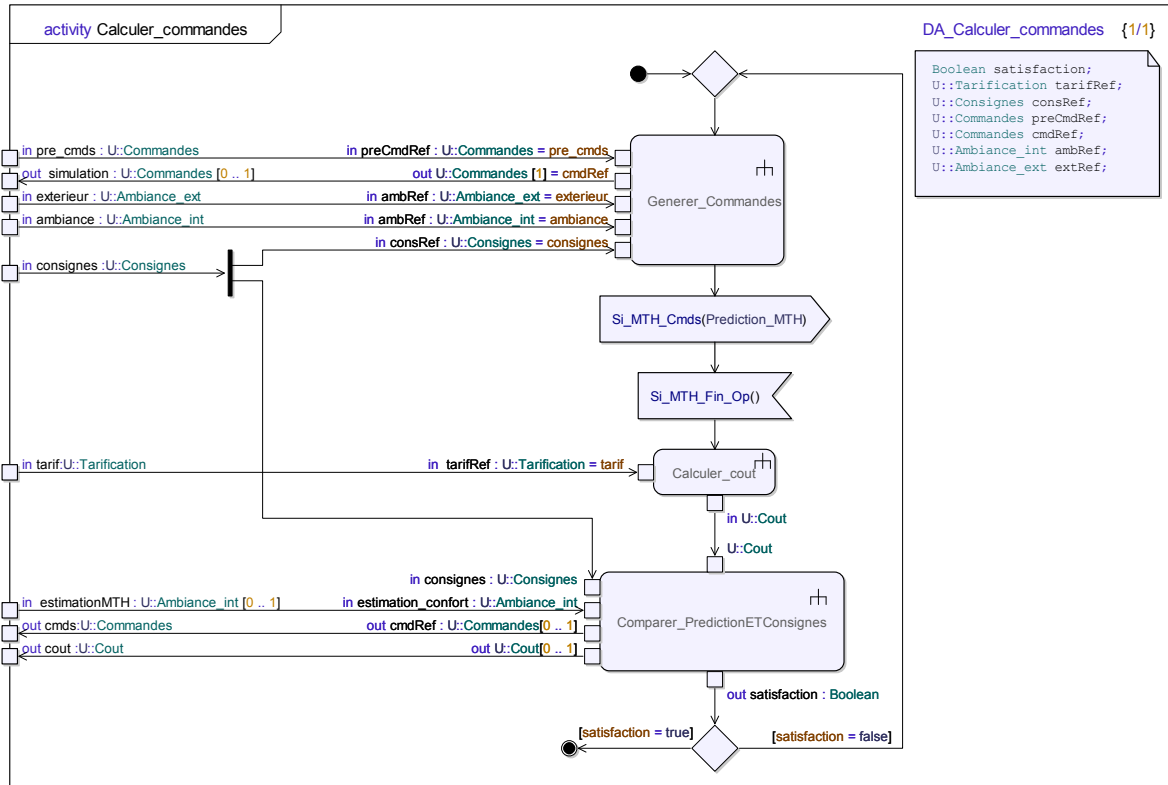


Figure 55 : Le calcul des commandes.

Nous distinguons bien à ce niveau toutes les informations nécessaires ainsi que les différents traitements associés au calcul des commandes. Le modèle thermique a un rôle déterminant dans cette étape et les commandes, une fois déterminées, sont retournées au module de logique décisionnelle assurant la transmission des commandes aux différents appareils.

III.9 Conclusion

Pour la mise en œuvre de la méthodologie présentée au chapitre II, un cahier des charges fixant les ambitions de ERGDOM II a été rédigé par EDF-R&D. Le cahier des charges propose une extension du concept à la gestion de la climatisation, de la ventilation et des volets roulants. L'objectif des travaux est d'élaborer un algorithme de commande étendu à l'ensemble de ces actionneurs interagissant les uns avec les autres.

Notre proposition est d'établir une table de décision pour gérer ces interactions. Les règles expertes sont écrites en tenant compte des normes et réglementations administratives qui sont un premier cadrage réduisant le domaine des solutions possibles. Un autre élément de gestion est de s'appuyer sur des modèles génériques de perception humaine du confort : nous faisons dans ce chapitre quelques rappels utiles qu'il conviendra d'approfondir selon les paramètres de confort que l'on peut être amené à considérer.

Cette proposition de table de décision est intégrée à la modélisation globale du système telle que proposée dans le chapitre II. La politique d'économie d'énergie est

considérée dès la conception en exploitant en priorité les actionneurs à faible consommation énergétique (la ventilation et les occultants), et en systèmes d'appoints la climatisation et les convecteurs lorsque l'utilisateur est présent dans le logement.

Chapitre IV La sécurité dans l'habitat : le projet PROSAFE

| | |
|---|------------|
| IV.1 INTRODUCTION | 139 |
| IV.2 RAPPEL DES RESULTATS ANTERIEURS | 140 |
| IV.2.1 Le concept PROSAFE | 140 |
| IV.2.2 Principe de détection d'incident..... | 141 |
| IV.2.3 L'apprentissage supervisé..... | 141 |
| IV.3 LA SURVEILLANCE EN INSTITUTION : L'EXPERIMENTATION DE CHARRON | 141 |
| IV.3.1 Architecture de PROSAFE..... | 141 |
| IV.3.2 Résultats | 143 |
| IV.3.3 Bilan..... | 144 |
| IV.3.4 Limites du système..... | 145 |
| IV.4 LA SURVEILLANCE SECURITAIRE EN APPARTEMENT..... | 146 |
| IV.4.1 Vers une extension « Indoor » | 147 |
| <i>IV.4.1.a Proposition d'une architecture multifonctionnelle</i> | <i>147</i> |
| <i>IV.4.1.b Les exigences de la surveillance en appartement</i> | <i>148</i> |
| IV.4.2 L'expérimentation d'Orléans | 149 |
| <i>IV.4.2.a Présentation</i> | <i>150</i> |
| <i>IV.4.2.b Objectifs.....</i> | <i>150</i> |
| <i>IV.4.2.c Problématique.....</i> | <i>151</i> |
| <i>IV.4.2.d Principe de l'expérimentation.....</i> | <i>151</i> |
| <i>IV.4.2.e Architecture</i> | <i>151</i> |
| IV.4.3 Modélisation générale des habitudes de vie | 154 |
| <i>IV.4.3.a Principe.....</i> | <i>155</i> |
| <i>IV.4.3.b Classification temporelle par algorithme évolutionnaire.....</i> | <i>155</i> |
| <i>IV.4.3.d Modélisation du problème</i> | <i>157</i> |
| <i>IV.4.3.f Découpage local.....</i> | <i>160</i> |
| <i>IV.4.3.g Les critères de diagnostic.....</i> | <i>161</i> |
| IV.4.4 Algorithme de détection d'incidents..... | 163 |
| <i>IV.4.4.a Incidents considérés</i> | <i>163</i> |
| <i>IV.4.4.b Outils et prétraitements</i> | <i>163</i> |
| <i>IV.4.4.c Le calcul des seuils de détection.....</i> | <i>165</i> |
| <i>IV.4.4.d La confirmation des alarmes</i> | <i>166</i> |
| IV.4.5 Résultats | 167 |
| <i>IV.4.5.a Suivi quotidien des activités</i> | <i>167</i> |
| <i>IV.4.5.b Identification d'une chute.....</i> | <i>172</i> |
| IV.4.6 Evaluation des performances..... | 173 |
| IV.5 L'AIDE AU DIAGNOSTIC MEDICAL | 174 |
| IV.5.1 Principe | 174 |
| IV.5.2 La mesure de la déviance | 175 |
| IV.5.3 Les témoins des capacités physiques | 176 |
| IV.6 CONCLUSION | 178 |

IV.1 Introduction

Le maintien à domicile des personnes âgées ou handicapées est une question permanente de nos sociétés modernes qui est devenue plus visible avec les progrès de la médecine, l’allongement de la durée de vie et la charge des établissements d’accueil de ces personnes. Dans le cas des personnes âgées, les premiers systèmes techniques d’assistance à domicile se sont appuyés sur le réseau téléphonique pour transférer des appels de détresse actionnés par le patient lui-même. Des limites sont apparues, liées au fait que le patient n’est, le plus souvent, pas en mesure d’appeler, soit parce qu’il ne porte pas son équipement, soit parce qu’il est, en cas de malaise ou de chute, incapable de réaliser le geste d’appel. Une surveillance sans instrumentation du patient paraît, dans ce contexte, complémentaire à ces premiers systèmes.

En 1995, le concept PROSAFE centré sur les questions de surveillance des personnes âgées à Domicile était lancé, donnant lieu au dépôt d’un brevet commun EDF-CNRS et validé en Institution en 2003 [Chan95]. Le concept de PROSAFE est basé sur l’instrumentation de l’environnement du bâti et sur la mise en place d’un diagnostic automatique fondé sur les habitudes des personnes.

Ce chapitre traite de l’extension du système PROSAFE, exploité à l’origine par le personnel médical en Institution, vers une surveillance en appartement. Nous souhaitons valider les concepts de base et identifier les complications amenées par la géographie « in door ».

En appartement, les personnes surveillées sont des usagers autonomes, ou quasi-autonomes, dont les pathologies peuvent ne pas être très handicapantes. Les activités de ces usagers sont donc plus riches et plus complexes qu’en Institution et différent, selon les pièces occupées. Des appartements ont fait l’objet d’une expérimentation dans la ville d’Orléans, dans la résidence foyer-logement « Isabelle Romée ». Ces appartements ont une superficie d’environ 35m² (F1-bis) et sont composés de plusieurs pièces : la pièce principale (faisant chambre, séjour et salle à manger) et les pièces techniques (cuisine, salle de bain, toilettes, etc.), où diverses configurations de réseaux de capteurs sont possibles. La surveillance doit s’effectuer de jour comme de nuit et ‘s’effacer’ lorsque plusieurs personnes occupent simultanément l’appartement (conjoint, famille, aide ménagère, médecin, etc.).

Les objectifs visés dans notre application de surveillance en appartement sont regroupés en deux catégories :

- la surveillance temps-réel basée sur des mesures en continu, la transmission des alarmes à un centre de téléassistance et la levée de doutes (télé-interpellation, écoute, dialogue, etc.)
- Le diagnostic associé à des services spécifiques d’interventions (médecins, infirmiers, associations, famille, etc.) et fondé sur des techniques de fusion multi-sensorielle : télédiagnostic médical basé sur des données physiologiques, l’identification des activités et des habitudes, l’évaluation de la déviance du comportement et la transmission des données utiles aux utilisateurs pour le diagnostic médical.

Ce chapitre IV présente, après un rappel des résultats acquis lors d'études antérieures à la thèse, les premiers résultats en appartement ainsi que les différentes techniques de calculs qui ont été élaborées. Ces techniques permettent d'enrichir les contenus des diagnostics déjà présentés pour la surveillance en Institution, pour la surveillance des personnes autonomes en appartement.

IV.2 Rappel des résultats antérieurs

IV.2.1 Le concept PROSAFE

L'originalité du concept PROSAFE a été de proposer la construction d'un modèle prédictif du comportement du patient fondé sur la caractérisation des habitudes. Ce concept a été utilisé initialement pour la détection d'hypovigilance de conduite automobile puis appliqué à la gestion thermique de l'habitat.

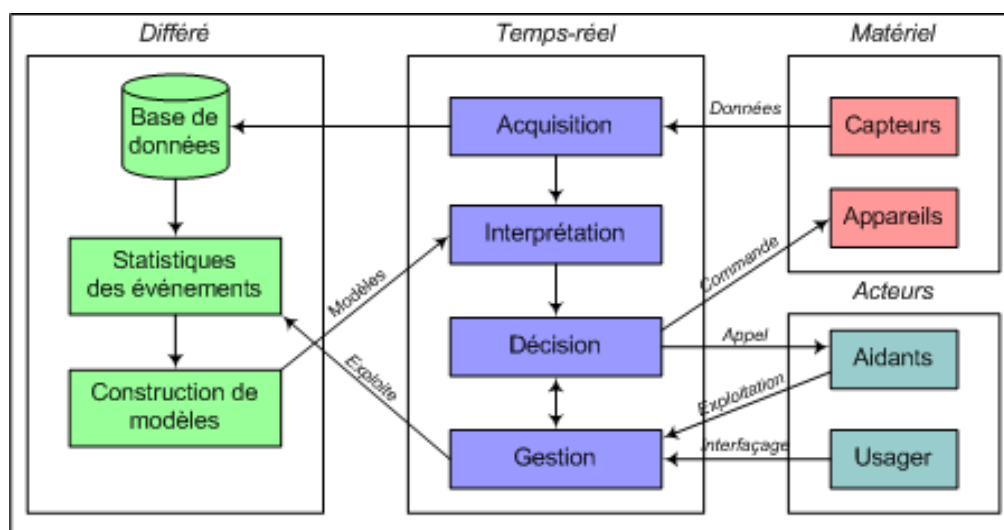


Figure 56 : Architecture fonctionnelle PROSAFE.

Le principe de fonctionnement présenté figure 56 distingue les analyses, le matériel et les acteurs interagissant avec le système :

- La composante matérielle est constituée de capteurs et d'une unité de traitements gérant l'ensemble des fonctionnalités du système,
- L'analyse différée est dédiée à la construction quotidienne de modèles de références et offre à l'utilisateur la possibilité de consulter l'évolution des activités du patient sur le long terme,
- L'analyse temps-réel a pour but d'identifier les situations 'anormales', par comparaison des observations aux modèles de références, afin d'envoyer une alarme à la personne chargée d'intervenir en cas d'incident,
- Les aidants, dans le cas de la surveillance en Institution, sont les infirmières et le personnel de surveillance de nuit.

IV.2.2 Principe de détection d'incident

La détection d'un incident est basée sur le principe suivant (illustré en figure 57) : les événements sont observés en temps-réel et lorsque certains critères d'activités dépassent une valeur de référence (le seuil de détection) une alarme est générée. Le calcul des seuils est basé sur la moyenne des événements observés sur les 30 jours derniers jours, intégrant ainsi les habitudes des personnes dans la modélisation.

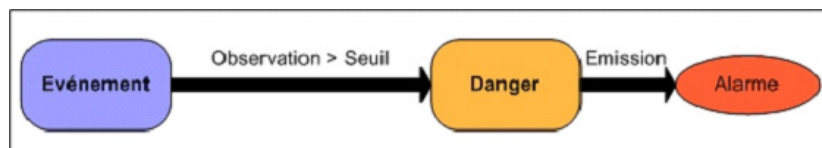


Figure 57 : Principe de détection d'un incident

IV.2.3 L'apprentissage supervisé

Parallèlement au calcul des seuils de détection, une procédure d'apprentissage supervisé exploitant la levée de doute suivant l'alarme est couplée au paramétrage des « bons » seuils. La personne responsable d'une intervention en cas d'alarme, est en charge de préciser au système la véracité du diagnostic en validant, ou refusant, l'alarme selon la situation constatée. Dans le cas d'une fausse alarme, le seuil de détection associé est augmenté automatiquement et, afin de mémoriser les différentes interventions, les seuils calculés quotidiennement chaque jour sont moyennés aux seuils de la journée précédente.

IV.3 La surveillance en Institution : l'expérimentation de Charron

En 2002, une campagne d'essais était lancée en institution à Charron [Camp02] pour une surveillance de nuit de personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer. Le système conçu par le LAAS-CNRS avec l'appui d'EDF-R&D est un ensemble matériel et logiciel composé dans sa version initiale d'un réseau de capteurs infrarouges filaires capables de suivre les déplacements des personnes. Il permet d'identifier un mode de vie, de détecter certains comportements anormaux ainsi que les incidents de chute, de fugue et d'agitation au lit. PROSAFE fournit également un diagnostic des activités servant de support à l'analyse des comportements par le personnel médical.

IV.3.1 Architecture de PROSAFE

La configuration matérielle déployée durant l'expérimentation de Charron pour surveiller les sujets dans leur chambre est présentée figure 58. Elle s'appuie sur un réseau filaire de communication installé dans 3 chambres. Le sujet est la plupart du temps seul dans sa chambre et l'interface de visualisation du système est placée dans le local des infirmières situé à proximité des chambres.

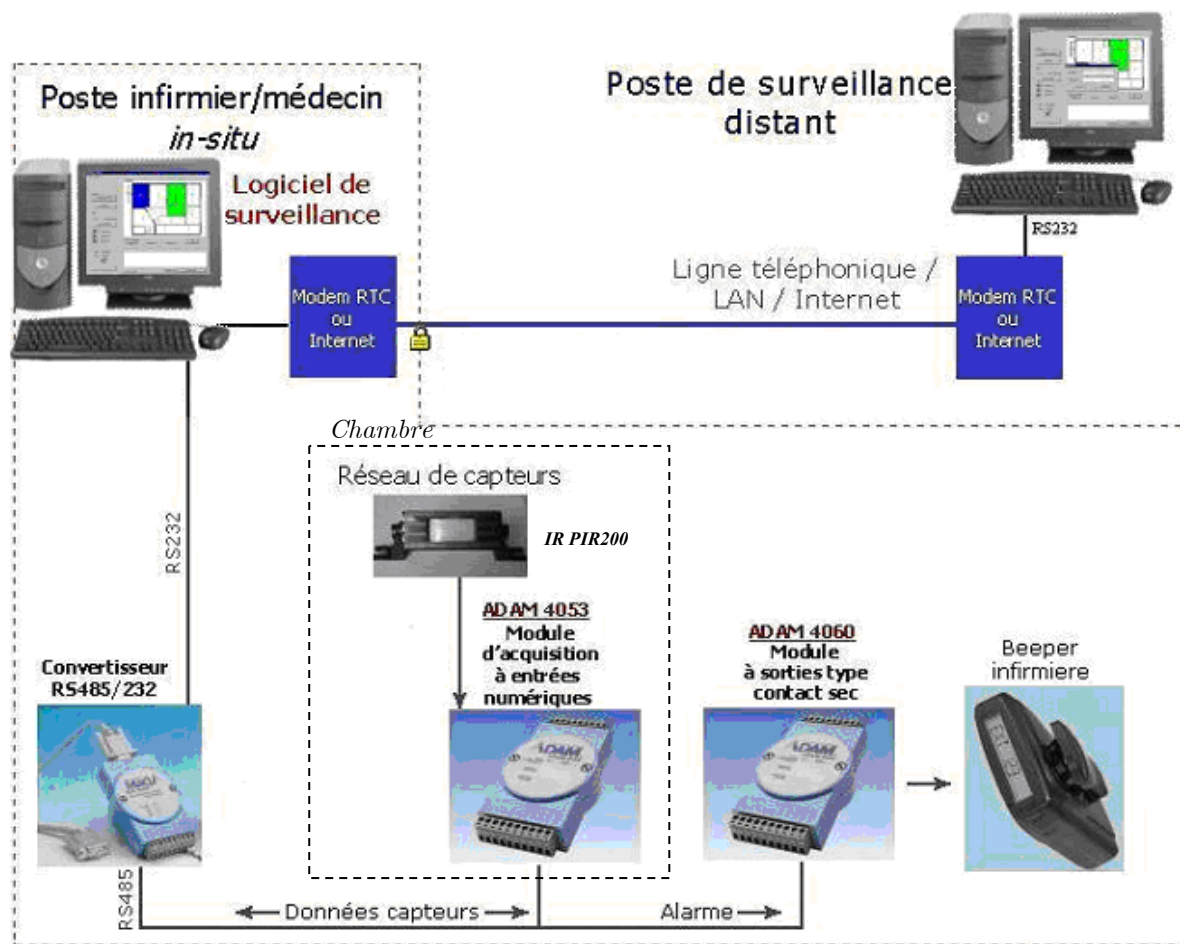


Figure 58 : Architecture matérielle du système « PROSAFE » existant

- Les capteurs « IR PIR200 » (conçus par la société Jay-Sensor), au nombre de 10 par chambre, permettent de détecter les mouvements de la personne. Ils sont dotés d'une sortie binaire (« 0 » pour absence de mouvement et « 1 » pour une détection de mouvement),
- Un module d'acquisition numérique « ADAM 4053 » recueille les données résultantes de l'état des capteurs d'une chambre. Le temps d'activation des détecteurs étant très court (0,5s), le processus d'acquisition procède à une scrutation périodique des signaux des capteurs à une fréquence de 2Hz.
- Un module à sorties relais « ADAM 4060 » permet de commander la centrale gérant l'ensemble des beepers du personnel médical,
- Un module de conversion du bus de données RS485/RS232 est utilisé pour la liaison au port série de l'ordinateur de traitement,
- Les câbles de connexion utilisés sont des câbles coaxiaux et téléphoniques blindés,
- L'ordinateur est un PC équipé d'un modem permettant la supervision du système à distance.

IV.3.2 Résultats

A partir de la seule information de mouvement, plusieurs activités (présentées figure 59) pouvaient être déduites tels les levers, couchers, sorties, déambulations, etc. Utilisées par les infirmières dans un contexte de surveillance médicale et de surveillance sécuritaire, elles ont permis notamment de corrélérer les effets de certains traitements thérapeutiques, attendus par le médecin, aux changements de comportement du patient.

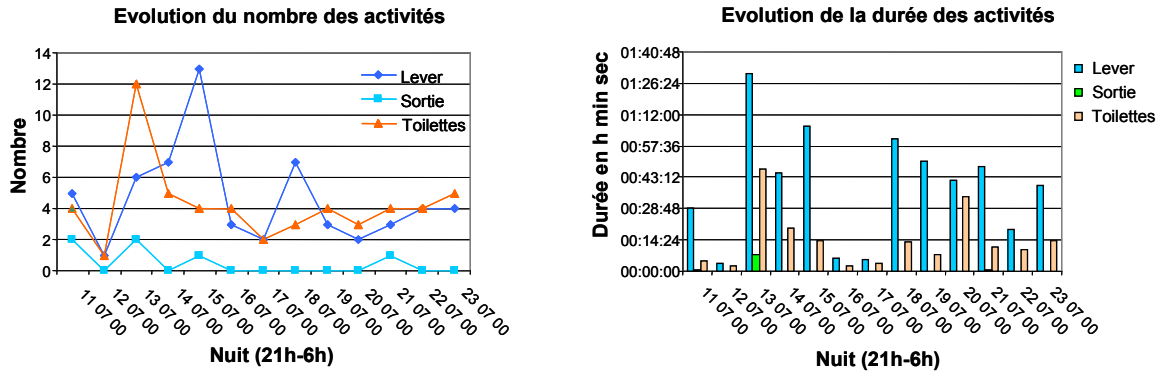


Figure 59 : Activités des patients en Institution

Parallèlement, la surveillance de nuit permettait d'identifier en temps-réel les incidents de chute, de fugue et d'agitation. La détection d'une fugue était basée sur le seul suivi de position du patient. L'agitation excessive était définie pour un comportement du patient trop agité lorsqu'il était dans son lit. La présomption de chute était basée sur l'analyse de l'immobilité prolongée du patient en distinguant cependant la chambre de la salle de bain.

Une interface utilisateur (figure 60) a été conçue spécifiquement pour répondre aux besoins du personnel médical.

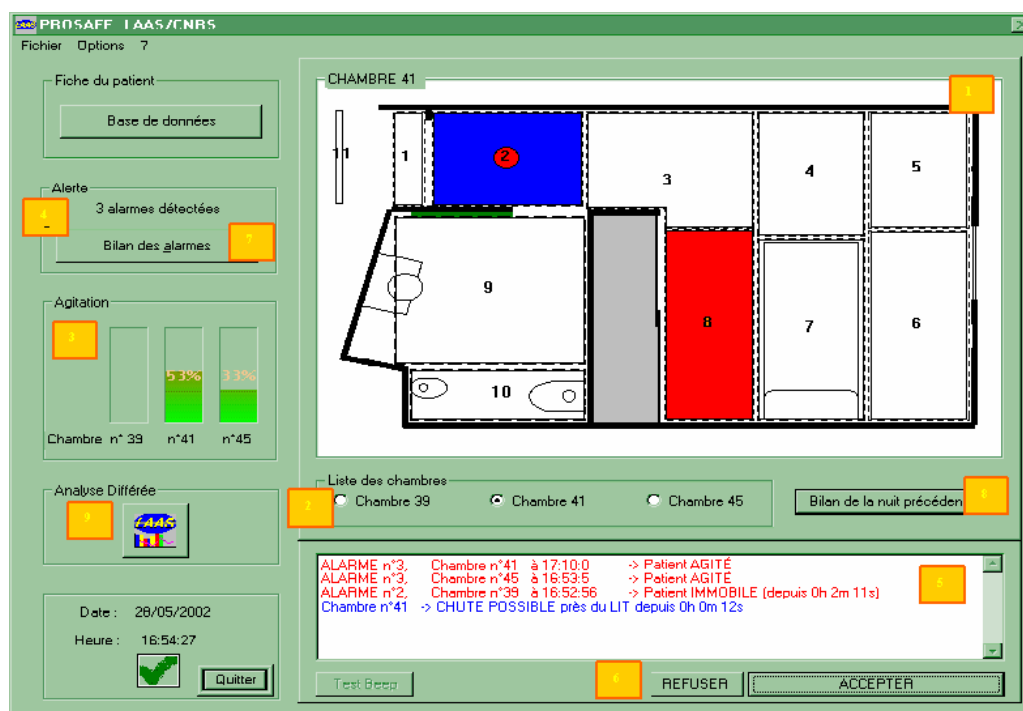


Figure 60 : IHM d'exploitation du système pour le personnel médical

L'IHM représente l'état et la situation du patient par :

- une fenêtre représentant la chambre (n°1) ainsi que la position du patient et celle du personnel (ici le patient en rouge et le personnel en bleu), sur la base d'un code de couleur (rouge en situation de danger et vert dans le cas contraire),
- l'affichage des alarmes (n°5) des alarmes et des alertes détectées,
- des indicateurs (n°3) des critères d'agitation de chaque patient lorsqu'ils sont au lit.

L'ensemble des diagnostics est également consultable au travers :

- d'un bilan des alarmes (n°7) stockant l'ensemble des alarmes de la nuit présente (il peut être activé durant la nuit),
- d'un bilan de la nuit passée (n°8),
- de l'analyse différée (n°9) permettant de visionner les statistiques du comportement d'un patient.

IV.3.3 Bilan

D'abord implanté en milieu hospitalier [Chan03], le concept PROSAFE a été validé en Institution par une longue campagne de tests sur 8 mois en continu et portant sur 3 chambres [Camp04].

Cela a donné lieu à plusieurs publications dont les principaux résultats sont :

- Une architecture type illustrée par la figure 58 où l'instrumentation de l'environnement est essentiellement constituée de capteurs de présence répartis

et communicants, l'interface de suivi est renvoyée au personnel soignant pour ses surveillances de nuit,

- Des mesures expérimentales permettant de valider l'hypothèse de départ que les patients, de nuit et dans la configuration d'une institution, ont des habitudes de vie (déplacements et activités) qui peuvent servir de base à un diagnostic de situations anormales de chute, fugue et agitation,
- L'exploitation de capteurs infrarouges bas coûts et adaptés à cette fonction de surveillance.

Par ailleurs, le personnel médical apprécie bien ce type de service complémentaire qui leur permet de pouvoir, sur écran, apprécier la situation en étudiant les caractéristiques comportementales de leur patient dans le passé récent et en temps-réel. L'expérimentation a aussi mis en évidence une dimension nouvelle de la surveillance que nous avons appelé « agitation » : grâce aux propriétés des capteurs de présence, on peut accéder aux mouvements du patient (gestes, mouvements corporels, marche, etc.). C'est ainsi que l'on a pu détecter des comportements inhabituels et suivre l'influence de certains médicaments sur le sommeil des patients.

IV.3.4 Limites du système

L'expérimentation de Charron a cependant montré certaines limites du système. Concernant l'interprétation des situations de dangers, les principales sources de fausses alarmes, parmi les alarmes de chute, de fugue et d'agitation, étaient principalement des fausses alarmes de chute. Les sources d'erreurs, présentées figure 61, étaient liées aux problèmes de lever du patient, du suivi des déplacements et de distinction dans le cas de la présence de plusieurs personnes.

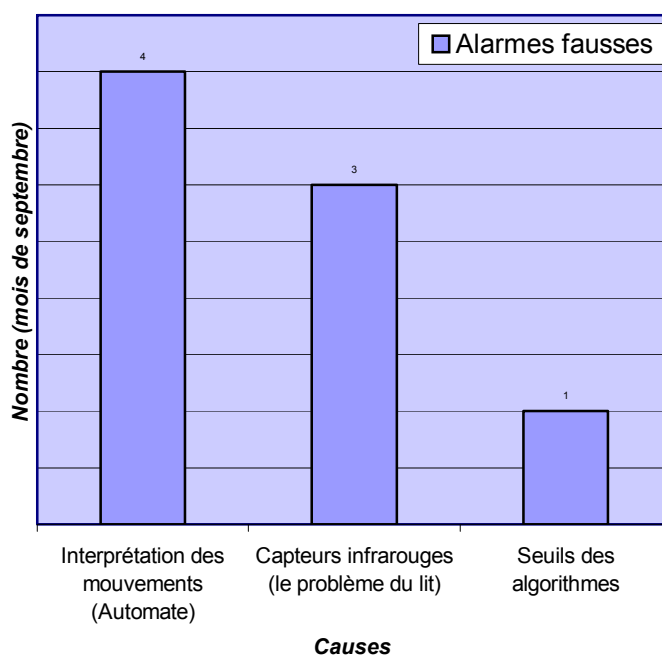


Figure 61 : Evaluation des différentes causes d'erreurs de diagnostic

- Le lever :

La détection du lever consiste à identifier les situations où le patient quitte son lit. La problématique du lever est un point critique dans l'application PROSAFE car il est source de nombreuses erreurs de diagnostic. Le système tel qu'implémenté à l'origine, ne pouvait difficilement faire la différence entre un mouvement de bras (juste à coté du lit) pendant le sommeil, et un levé ordinaire voire même une chute.

- Les déplacements de plusieurs personnes :

Par un suivi continu des déplacements, conformément à la topologie du réseau de capteurs, le système est capable de détecter la présence d'une, ou de plusieurs, personnes dans la chambre. Lorsque plusieurs personnes sont présentes, la surveillance est suspendue jusqu'à ce qu'il n'y ait plus qu'une seule personne détectée. L'interprétation fiable des déplacements de plusieurs personnes est difficile surtout lorsqu'elles se croisent ou qu'une personne en accompagne une autre.

- Identification des personnes :

L'identification est une fonctionnalité primordiale pour pouvoir surveiller la bonne personne. En institution, ce problème n'est pas majeur car il n'y a pas de visite pendant la nuit mise à part les rondes du personnel médical. Dans ce cas, la surveillance est suspendue automatiquement dès que le personnel entre dans la pièce et ce, jusqu'à ce qu'il en soit sorti.

Concernant la partie matérielle, l'installation du système est fastidieuse en raison du caractère filaire du réseau qui doit être mis en œuvre. Les détecteurs utilisés ne sont pas à l'origine destinés à des fonctions de surveillance, ils ne sont pas configurables à distance. De plus, ils provoquent des cliquetis sonores, en cas de détection de mouvement, qui peuvent occasionner une gêne des usagers.

IV.4 La surveillance sécuritaire en appartement

Dans sa configuration existante, le système PROSAFE peut être utilisé, tel qu'introduit en institution pour la surveillance de nuit et, peut être encore enrichi dans cette application. Mais les résultats obtenus invitent à étendre le domaine d'application vers la surveillance d'une personne isolée en appartement, suivie de jour et de nuit. Ce sont les résultats de cette nouvelle étape que nous présentons dans cette section.

IV.4.1 Vers une extension « Indoor »

La question est d'abord de faire le choix d'une stratégie de développement fondée sur les acquis des travaux résumés section IV.2 . Deux obstacles doivent être franchis :

- Celui d'une architecture ouverte du système à des services multiples,
- Celui du développement des méthodes et outils de la conception système, permettant de concevoir des ensembles domotiques complexes.

IV.4.1.a Proposition d'une architecture multifonctionnelle

L'expérimentation PROSAFE montre que des services multiples nouveaux doivent être identifiés, distingués dans une opération de surveillance mais accueillis dans une même architecture système :

- sur la base de l'instrumentation de l'habitat par des capteurs de présence, les fonctions de localisation, de détection d'immobilité (présomption de chute), d'agitation, de vitesse de déplacement, des trajectoires de déplacements peuvent être envisagées et développées,
- sur la base de capteurs spécifiques embarqués sur le patient, des caractéristiques mécaniques complémentaires peuvent être intégrées au diagnostic sur la station (debout – couché) du patient, sur la marche, etc, et, bien évidemment, sur la surveillance de certains paramètres physiologiques : rythme cardiaque, électrocardiogramme, etc.
- sur la base de nouveaux actionneurs couplés au diagnostic, il faut que l'architecture projetée intègre des possibilités de robotique d'assistance [Hane97][Robo06] de systèmes, apportant les premiers soins.

Cette tendance à la conception des systèmes multifonctionnels et multiservices se retrouve dans la littérature sous la forme d'expérimentations multiples dans le domaine de l'habitat intelligent [Chan]. Ces exigences conduisent à une architecture telle que celle présentée figure 62 avec des fonctions parallèles, ayant un certain niveau d'autonomie pour déclencher des alertes propres à chaque fonction, et un niveau de supervision ayant une mission transversale de coordination et de diagnostic terminal ciblé sur des services d'interventions bien identifiés. Cet enrichissement de l'architecture présente aussi l'avantage de pouvoir mieux construire et mieux documenter les surveillances et les interventions extérieures de manière très flexible.

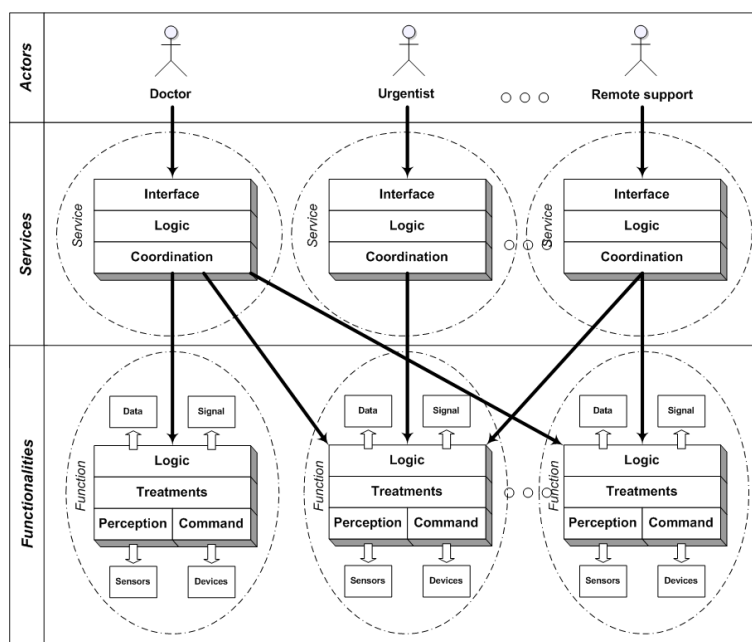


Figure 62 : Architecture multifonctionnelle

Les services associés à l'exploitation du système peuvent donc être divers et complémentaires : médecin traitant, infirmiers, associations, parents et voisins, urgentistes... et peuvent recevoir une information adaptée à leur mission.

IV.4.1.b Les exigences de la surveillance en appartement

Les exigences traitées dans cette section concernent le milieu de vie (appartement, activités, occupants, etc.), les services associés à un système de surveillance ainsi que les technologies utilisées (capteurs, réseau de communication, système d'informations).

i) L'environnement

En appartement, les personnes surveillées ne sont plus forcément des patients à mobilité réduite mais des usagers autonomes dont les éventuelles pathologies peuvent ne pas être handicapantes. Les activités des usagers sont donc plus riches et plus complexes qu'en Institutions et différent, selon les pièces occupées, d'où la nécessité d'intégrer plusieurs caractérisations pour l'apprentissage des habitudes. Les appartements à considérer ont une superficie supérieure à 30m² et sont composés de plusieurs pièces : les pièces principales (chambre, séjour, salle à manger) et les pièces techniques (cuisine, salle de bain, toilettes, etc.), offrant ainsi diverses configurations possibles pour les réseaux de capteurs. La surveillance doit s'effectuer de jour comme de nuit et s'effacer lorsque plusieurs personnes occupent simultanément l'appartement (conjoint, famille, aide ménagère, médecin, etc.). Au-delà du comptage des individus, une identification de la personne peut paraître essentielle.

ii) Fonctions et Services

Les fonctions identifiées dans notre application de surveillance en appartement sont regroupées en deux catégories :

- La surveillance temps-réel basée sur des mesures en continu, la transmission des alarmes aux téléopérateurs, la transmission des données utiles aux intervenants et la levée de doutes (télé-interpellation, écoute, dialogue, caméra, robot, etc.)
- Le diagnostic associé à des services spécifiques d'interventions (médecins, infirmiers, associations, famille, etc.) et fondés sur des techniques de fusion multisensorielle [Corn02] : télédiagnostic médical basé sur des données physiologiques, identification des activités et des habitudes, évaluation de la déviance du comportement et la transmission de diagnostic pertinents pour le suivi médical.

Autonomes et intégrant plusieurs fonctionnalités indépendantes, les services pourront être personnalisés en fonction des besoins des usagers et des utilisateurs.

iii) Les technologies

L'évolution des technologies, par la progression de la miniaturisation des dispositifs, incite les particuliers à exiger de plus en plus des systèmes miniaturisés intégrant de manière discrète leur environnement, ce qui contribue notamment au développement de détecteurs de plus en plus autonomes, sans fil et dotés d'une bonne autonomie énergétique. Dans les applications Smart-Home, l'emplacement et le nombre de ces détecteurs dépendent essentiellement de leurs portées de télétransmission, leurs champs de détection, leurs sensibilités aux bruits ainsi que des fonctions et services réalisés. Dans notre cas, les détecteurs de mouvements sont placés dans les endroits de l'appartement caractérisant les activités des personnes, et les dispositifs de levers de doute placés dans les pièces les plus fréquentées (séjour, chambres, etc.).

Les technologies de communication se basent dans un premier temps sur Internet puisque 14 millions de foyers sont connectés à Internet en France (soit 55% de la population) et 84 millions au Etats-Unis (soit 42% de la population). De ce fait, l'accès, la gestion et l'exploitation des services du système de surveillance peuvent s'effectuer via Internet. En revanche, les services critiques (émission d'alarmes, levée de doute, etc.) doivent exploiter des voies de communications plus fiables et complémentaires : le téléphone, le GSM, etc.

Les informations véhiculées et stockées par les fonctionnalités des systèmes complexes doivent être portables pour être exploitées par tout type de services. Le choix s'est ainsi porté vers une structuration des données en XML, stockées dans une base de données native XML : accessible à distance, gérant les authentifications, les accès multiutilisateurs, et dont la structure des données peut évoluer facilement sans conséquence sur la structure existante.

IV.4.2 L'expérimentation d'Orléans

Le système de surveillance conçu section IV.2 a été implanté en appartement en fonction des nouvelles exigences. L'évaluation des algorithmes originaux PROSAFE a montré ses limites dans ce nouvel environnement et a permis de préciser l'architecture de nouvelle génération (illustrée figure 62).

IV.4.2.a Présentation

Le système de surveillance pour la surveillance des personnes autonomes en appartement, « PROSAFE-étendu », a fait l'objet d'une expérimentation, conduite en collaboration avec EDF-R&D, dans la résidence foyer-logement « Isabelle Romée » à Orléans. L'expérimentation fait interagir 5 acteurs :

- La personne âgée, suivie en temps-réel par le système PROSAFE,
- Le local CCAS, situé au rez-de-chaussée de la résidence dans lequel figure le poste de direction de la résidence, permettant de superviser les plateformes PROSAFE situées dans les chambres de la résidence,
- GTS, société externe de téléassistance, EDF-R&D et le LAAS-CNRS supervisant le système de l'extérieur.

L'office des HLM de la ville d'Orléans a mis à disposition deux appartements. Leurs locataires sont des personnes âgées autonomes vivant seules. Un service de gardiennage local peut exceptionnellement intervenir dans les appartements. Situés dans la même aile de la résidence, les deux appartements d'une superficie 35m² au rez-de-chaussée et au second étage ont été instrumentés.

L'ouverture du site d'Orléans a été officialisée par une cérémonie le 16 novembre 2005 en présence des différents partenaires dont la mairie d'Orléans [Pros05b].

IV.4.2.b Objectifs

L'adaptation de PROSAFE pour l'expérimentation d'Orléans consistait à modifier d'une part, le système existant selon une nouvelle configuration matérielle (capteurs sans fil, société d'intervention distante) et à fiabiliser d'autre part, la détection de chute de la personne.

Portant sur les améliorations de PROSAFE, l'étude visait principalement à prendre en compte les nouvelles contraintes liées au milieu foyer-logement telles que définies section IV.4.1.b . Il s'agissait également d'adapter la méthode de détection de chute à ces nouvelles contraintes. Les objectifs fixés par le cahier des charges sont les suivantes :

- Améliorer le mode d'installation et de configuration du système pour tout type de logements,
- Améliorer le degré de confiance dans les alertes/alarmes pour réduire les taux de fausses alarmes,
- Améliorer la détection de l'immobilité d'une personne,
- Améliorer l'architecture matérielle de PROSAFE (intégration de nouveaux capteurs, réseau de communication sans fil, diminution du coût de la solution matérielle).

IV.4.2.c Problématique

La problématique générale concerne essentiellement les aspects :

- Architecture logicielle pour aboutir à une architecture flexible, indépendante notamment des détecteurs utilisés, capable d'intégrer de nouveaux services,
- Architecture matérielle, intégrant de nouveaux types de détecteurs et différents périphériques de contrôle dont l'installation doit être aisée.
- Performances, dont le nombre de fausses alarmes, notamment pour la détection de chute doit être réduit pour ne pas gêner l'utilisateur et les services d'assistance.

Pratiquement, l'algorithme de détection de chute, élaboré initialement pour la surveillance nocturne des personnes dépendantes vivant dans des chambres individuelles, devait être adapté pour la surveillance continue des personnes autonomes vivant seules sans pathologie dans leur appartement. L'expérimentation de Charron mettait en évidence que les principales sources de fausses alarmes étaient des détections de chute mal interprétées par le système. Pour la surveillance en milieu médicalisé, deux types de zones étaient considérés : la chambre et la salle de bain. La détection de chute est initialement basée sur le suivi temps-réel de l'immobilité prolongée. Le problème majeur est d'adapter la méthode de calcul des seuils de détection de chute du système existant pour permettre la surveillance des personnes dans leur appartement dont les habitudes sont plus complexes qu'en institution.

IV.4.2.d Principe de l'expérimentation

PROSAFE, détecte les incidents et transmet les alarmes à la société de télésurveillance GTS par voie téléphonique. Le téléopérateur rappelle aussitôt la personne à son domicile afin de vérifier la validité de l'alarme (phase de levée de doute), procède à une intervention si besoin est, puis valide l'alarme pour signaler au système PROSAFE la véracité de son diagnostic. L'ensemble des événements et diagnostics est consigné dans une base de données, accessible par Internet. La supervision est effectuée, dans le cadre des expérimentations, à distance par le LAAS-CNRS.

IV.4.2.e Architecture

i) Architecture Logique

Les services proposés par le système pour la surveillance des personnes autonomes font interagir 3 acteurs : l'utilisateur, le téléopérateur et nous prévoyons le médecin ayant le rôle indispensable de suivi médical de la personne par les diagnostics du comportement fournis par le système. La figure 63 présente les services de « PROSAFE-étendu » sous la forme d'un diagramme des cas d'utilisations et structuré selon le principe d'architecture multifonctionnelle décrit section IV.4.1.a .

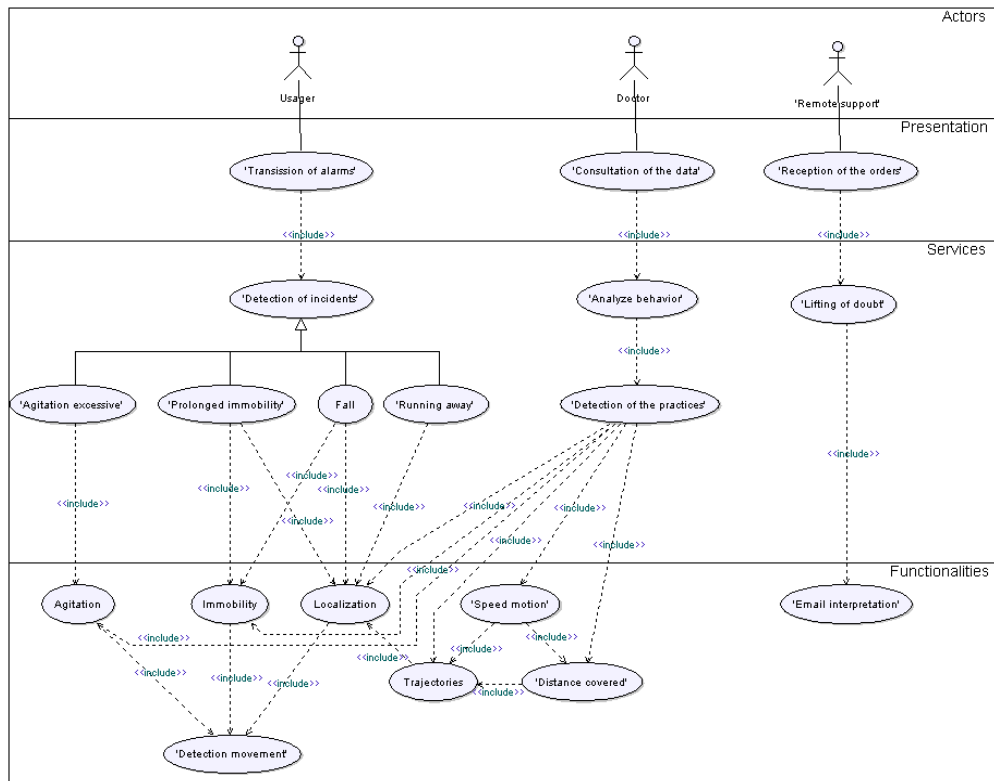


Figure 63 : Architecture logique du système de surveillance « PROSAFE-étendu ».

- L'utilisateur interagit avec le système en : déclenchant un appel vers l'opérateur de téléassistance en cas de malaise, dialoguant avec l'opérateur de téléassistance pour expliciter une situation et déclenchant les détecteurs de mouvements lors de ses déplacements.
- Le téléopérateur interagit en appelant l'utilisateur suite à la réception d'un signal d'alarme et confirme la véracité d'une alarme.
- Le médecin interagit en consultant l'évolution des critères d'activités ainsi que l'évolution du comportement de l'utilisateur.

ii) Architecture physique

L'architecture matérielle du système est composée de 3 éléments essentiels :

- **Capteurs infrarouges passifs sans fil CEDOM**



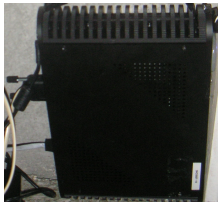
Une première nouveauté a été la conception des capteurs sans fil adaptés, développés avec le LAAS-CNRS et la société CEDOM dans le cadre du contrat RNTS PROSAFE 2003-2005 [Pros05a]. Ces détecteurs de mouvements radiofréquence sont configurables entièrement à distance. Ils sont fixés au plafond par collage. Ils peuvent, si la surface est trop rugueuse, être fixés avec une vis. Un cache plastique, ajusté manuellement, permet de dimensionner la zone de surveillance.

- **Boîtier Biotel**



Le boîtier Biotel est placé à l'intérieur de l'appartement. Connecté au téléphone, il permet l'appel vers le télésurveilleur GTS lorsque l'utilisateur presse son émetteur portatif ou que le système PROSAFE détecte un incident. Un transmetteur radio, conçu spécifiquement par la société Biotel, permet au système PROSAFE de commander à distance le boîtier Biotel.

- **L'unité de traitements**



L'unité de traitements commande l'ensemble des dispositifs situés à l'intérieur de l'appartement, exécute les fonctionnalités de PROSAFE-étendu et assure la transmission des alarmes par Biotel et par Internet. Les unités de traitements sont situées à l'extérieur des appartements et plus précisément dans les gaines électriques des couloirs de la résidence.

iii) *Environnement d'exploitation*

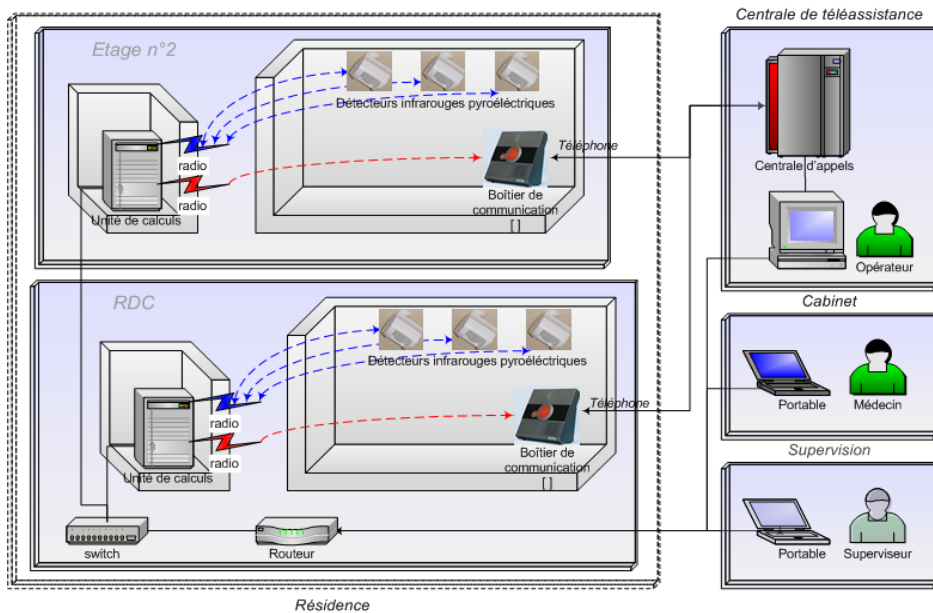


Figure 64 : Architecture matérielle.

L'exploitation qui a été effectuée est synthétisée figure 64 : les unités de calculs, sont placées à proximité de l'appartement dans les gaines EDF. De là, elles permettent de commander à distance les capteurs de présence ainsi que le boîtier Biotel destiné à alerter la société de téléassistance.

Le système intègre le réseau Ethernet relié à un point d'accès servant la gestion de la plateforme et l'exploitation des données pour les différents utilisateurs du système via Internet. Cette connexion Internet permet de plus au téléopérateur distant de valider les alarmes par email, lesquels sont traités automatiquement par le système.

iv) Configuration du réseau de capteurs

La localisation de l'individu dans l'appartement, selon le principe de configuration du réseau de capteurs, décrit section IV.3 , impose de placer au minimum un capteur par pièce. Les endroits de l'appartement nécessitant une analyse plus fine des activités sont les zones autour du lit, et les zones de séjour et d'activités prolongés (fauteuil, table, etc.). Nous avons ainsi instrumenté les deux appartements de 35m² par 12 et 13 capteurs IR sans fil tel qu'illustré dans les figure 65 et figure 66. Deux configurations de capteurs ont en effet été distinguées en fonction des emplacements différents du lit, des fauteuils et des tables.

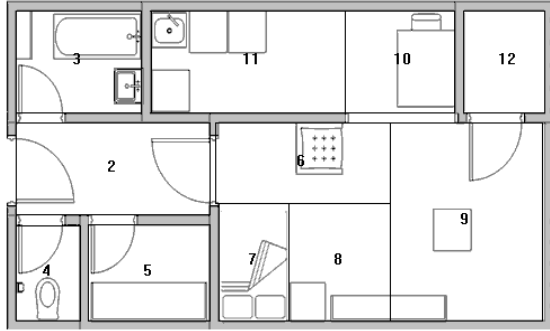


Figure 65 : Configuration capteurs appartement 1

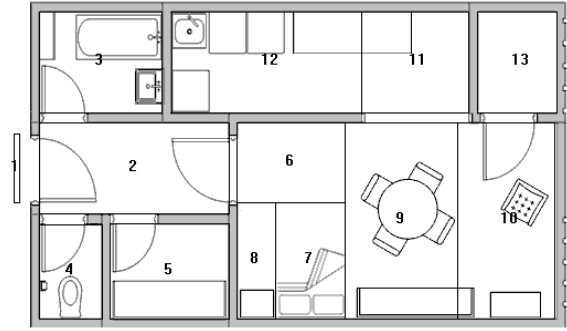


Figure 66 : Configuration capteurs appartement 2

La première configuration possède 12 capteurs avec la particularité d'avoir un capteur au-dessus du fauteuil principal (zone 6), un capteur au-dessus de la table (zone 10) et deux capteurs (zone 8 et 6) à proximité du lit pour authentifier les levers et les couchers (zone 8).

La seconde configuration utilise un capteur supplémentaire car le lit, contrairement à la première configuration, n'est pas juxtaposé dans l'angle de la pièce principale. Un espace, non négligeable, est présent de chaque côté du lit de sorte que la personne peut se lever/coucher par la gauche ou par la droite du lit. L'identification fiable des levers, justifie donc les zones de détection n°8 et n°9.

IV.4.3 Modélisation générale des habitudes de vie

Le principe de détection des incidents reste fondé sur la modélisation des habitudes de vie. Il conduit à des alertes et alarmes par comparaison, en temps-réel, d'une mesure (agitation, immobilité, déplacement) à un seuil de référence témoin des habitudes. Lorsque la mesure observée dépasse le seuil témoignant d'une anomalie, une alarme est automatiquement envoyée à l'opérateur de téléassistance.

Dans un premier temps, deux valeurs de seuils ont été distinguées : 1 seuil pour la période diurne et un second pour la période nocturne conformément aux principes initiaux du concept PROSAFE. Les valeurs de ces seuils sont calculées automatiquement par des traitements statistiques, sur l'historique des 30 derniers jours, ce qui permet une première intégration des habitudes des usagers. Selon les algorithmes que nous avons déjà mis au point en institution, l'exploitation des données fixait automatiquement des seuils d'alarme très souvent supérieurs à 1h, pour la détection de

chute, ce qui intègre les habitudes de l'utilisateur mais ne peut toutefois pas convenir pour un objectif de détection de chute dont la réactivité doit être inférieure à 15min, afin d'éviter le traumatisme mental a posteriori de l'utilisateur. Il fallait donc revenir sur la modélisation des habitudes qui constitue en soit l'étape clef de la fonction principale de détection d'incidents.

La modélisation des habitudes proposée aujourd'hui pour « PROSAFE-étendu » est explicitée dans cette section. Elle a pour but de satisfaire les exigences citées section IV.4.1.b et d'intégrer les activités complexes en appartement pour fiabiliser les détections d'incidents.

IV.4.3.a Principe

Les habitudes des usagers sont identifiées, par apprentissage artificiel, et organisées dans un modèle de référence servant les fonctions de détection d'incidents et d'aide au diagnostic médical dans l'interprétation des mesures observées. Les activités des usagers, durant une journée, varient en fonction de la période de la journée, de l'état physique du patient, des visites, des 'hobbies' ainsi que de nombreux facteurs extérieurs non perçus par le système.

La modélisation proposée aujourd'hui intègre les habitudes complexes et l'environnement vaste de l'utilisateur. L'élaboration du modèle des habitudes comporte deux étapes distinctes : une classification temporelle des activités d'une journée, couplée à un découpage local permettant une analyse descriptive des critères d'activités.

L'analyse des activités des personnes à domicile débute par la recherche d'un découpage temporel de la journée qui définisse une classification temporelle des activités. Ce découpage est effectué par une analyse automatisée d'un historique des détections de présence (activations des capteurs) des 30 derniers jours précédents le jour de l'analyse. Les données des capteurs correspondants aux zones extérieures à l'appartement (porte d'entrée, balcon, jardin, etc.) sont exclues de l'échantillon pour éliminer l'influence de certains phénomènes interférents (météorologie, habitudes du personnel médical, assistante ménagère...) et ne retenir que les habitudes « indoor » des usagers.

La procédure retenue de classification temporelle des activités exploite un algorithme génétique combiné à une analyse statistique descriptive, qui suggère un découpage temporel de la journée en au moins 6 périodes caractéristiques des habitudes de vie de l'utilisateur.

IV.4.3.b Classification temporelle par algorithme évolutionnaire

La méthode de classification temporelle des activités retenue est basée sur un algorithme de type évolutionnaire tel que défini par [Holl75] et [Gold94]. Le choix de cette approche est justifié par la volonté d'exploiter un algorithme adaptatif, temporellement borné, interruptible, facilement parallélisable et nécessitant peu de ressources de calcul. Chaque étape de la procédure a fait l'objet de choix pertinents et complémentaires qui sont présentés dans cette section.

IV.4.3.c Principe des algorithmes évolutionnaire

Les algorithmes évolutionnaires sont caractérisés par le codage du problème sous forme de « chromosome » ou « individu » dont les valeurs peuvent être booléennes, entières, flottantes, etc. L'« individu » est une solution potentielle au problème considéré appartenant à une population brassée « génétiquement » pour atteindre l'objectif fixé.

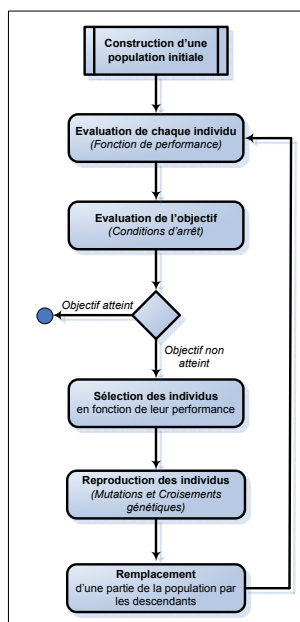


Figure 67 : Principe de fonctionnement des algorithmes évolutionnaires.

Le principe de fonctionnement d'un algorithme génétique classique est composé de 6 étapes telles que illustrées figure 67.

- 1- Une population initiale d'individus est créée de manière aléatoire.
- 2- L'adaptation de chaque individu au problème considéré est évaluée par une fonction de performance (ou 'fitness') déterminant un score.
- 3- Lorsque l'objectif est atteint, l'algorithme se termine et la solution est caractérisée par le meilleur des individus de la population finale. Dans le cas contraire, l'algorithme poursuit sa recherche.
- 4- Les individus reproducteurs sont sélectionnés en fonction de leur score.
- 5- La reproduction des individus s'effectue au travers des opérateurs de croisement et de mutation génétique pour engendrer les descendants.
- 6- Les descendants intègrent la population et la procédure réitère à partir de l'étape 2.

L'efficacité, la précision et la convergence de l'algorithme dépendent des choix et des méthodes choisies à chaque phase de l'algorithme.

IV.4.3.d Modélisation du problème

i) Codage du problème

Dans notre approche, nous cherchons à identifier les périodes de la journée caractérisant les différentes activités de la personne. Le matériel génétique retenu pour un individu est composé d'autant de gènes que de périodes temporelles considérées. La figure 68, présente la structure génétique d'un individu où les gènes $T_1, T_2 \dots T_n$ sont des indices temporels appartenant au domaine $[0 \ 24 \times 3600[$ secondes et classés par ordre croissant. Les tranches horaires sont dès lors définies par : $TH_1 = [T_1, T_2[$, $TH_2 = [T_2, T_3[$, ... $TH_n = [0, T_1[\cup [T_n, 84600[$. A chaque individu est associé un score qui est fonction des valeurs de chaque gène.

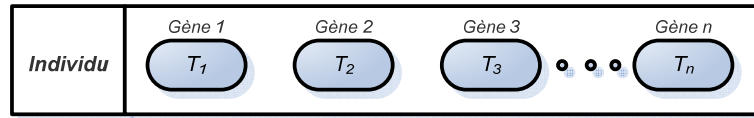


Figure 68 : Définition d'un individu

ii) Choix du processus de sélection

Conformément à la théorie de l'évolution de Darwin, le processus de sélection doit permettre de favoriser les individus de qualité pour affiner la recherche tout en explorant de nouvelles régions de l'espace des solutions. La méthode de sélection contribue fortement à la convergence de l'algorithme et plusieurs méthodes ont été proposées pour sélectionner les individus selon leurs performances, leur rang ou par 'tournois'.

La sélection proportionnelle aux performances des individus dont la méthode de sélection par 'roulette' [Holl75] est la plus classique. Les inconvénients majeurs sont que la pression sélective n'est pas maîtrisée et que, lorsque les effectifs sont réduits, le biais statistique n'est pas pris en compte. J.E. Backer [Bake87], propose alors la méthode d'« échantillonnage universelle stochastique » où la 'roulette' dispose cette fois d'autant de marqueurs que d'individus à sélectionner ce qui présente l'intérêt de ne pas trop favoriser les individus inadaptés et inversement.

La sélection proportionnelle au rang des individus est une technique évitant de sur-sélectionner les individus les plus adaptés au détriment des autres. Les individus sont classés en fonction de leur score mais sélectionnés en fonction de leur rang. La pression sélective est alors grande lorsque la variance des scores est faible, et petite lorsque la variance des scores est importante.

La sélection par tournois, est une technique efficace car elle évite les tris et l'évaluation de chaque individu. Le principe consiste à organiser α tournois de β individus et de retenir les α vainqueurs pour la reproduction ce qui permet de contrôler la pression sélective par la taille α des tournois. Cette technique est très performante mais l'inconvénient constaté est que la solution trouvée n'est pas forcément la meilleure dans le cas particulier où deux solutions sont proches d'un point de vue score, mais éloignées dans l'espace des solutions.

La diversité des solutions potentielles est donnée par la répartition des différents scores d'une population. Pour préserver cette diversité, il est parfois judicieux de transformer cette répartition des valeurs : c'est la fonction d'adaptation. De nom-

breuses transformations arithmétiques ont été proposées : l'ajustement linéaire (fonction des valeurs extrêmes), la méthode « sigma truncation » proposée par S. Forrest [Forr85] (où la répartition reste gaussienne), la méthode « ranking » proposée par J. Backer [Bake87] (où le score devient proportionnel au rang), etc.

L'ensemble de ces méthodes ne garantit pas la convergence de l'algorithme car certaines régressions sont possibles lorsque les meilleurs individus ne sont pas préservés. Pour résoudre ce problème, De Jong [Jong75] propose la méthode « élitiste » où le meilleur individu est réinséré dans la génération suivante introduisant ainsi un mécanisme de mémorisation. Cette technique peut être pénalisante car l'espace de recherche est significativement réduit et la convergence de l'algorithme peut être prématurée.

Nous avons retenu la méthode « ranking », couplée à une sélection proportionnelle au rang, puisque qu'elle permet de s'affranchir des variations de la diversité génétique [Holl98] tout en propageant l'exploration de l'espace des solutions. Ainsi, la sur-sélection des meilleurs individus et la sous-sélection des plus faibles sont évitées.

iii) Choix des opérateurs

La fonction de croisement permet de générer de nouveaux individus à partir d'une recombinaison du matériel génétique existant de deux individus parents. Dans notre cas, nous exploitons un croisement unitaire sur un seul point du chromosome à partir d'un gène choisi aléatoirement tel qu'illustré figure 69.

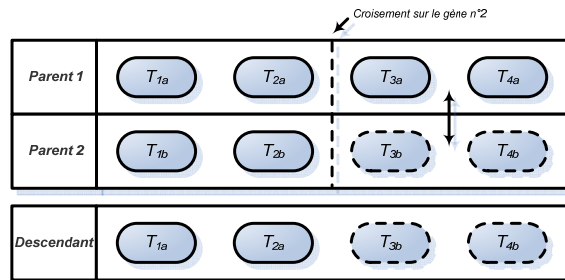


Figure 69 : Opérateur de croisement génétique.

L'opérateur de mutation a pour rôle d'élargir la diversité génétique en intégrant de la nouveauté dans les solutions potentielles. L'opérateur retenu consiste à sélectionner au hasard un gène pour lui ajouter, ou soustraire, une valeur Δ_d (figure 70).

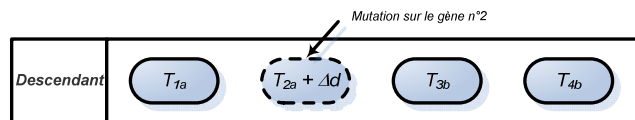


Figure 70 : Opérateur de mutation génétique.

La valeur Δ_d est définie par la loi de Weibull [Weib51] (de paramètres $a = 4,822.e+3$, $b = 1,168$) afin de propager l'indice temporel aléatoirement par tranches de 15 minutes de préférence, tout en proposant de rares variations allant jusqu'à 4 heures. La figure 71 présente la proportion des fréquences de variations de Δ_d selon la distribution de Weibull paramétrée spécifiquement pour notre problématique.

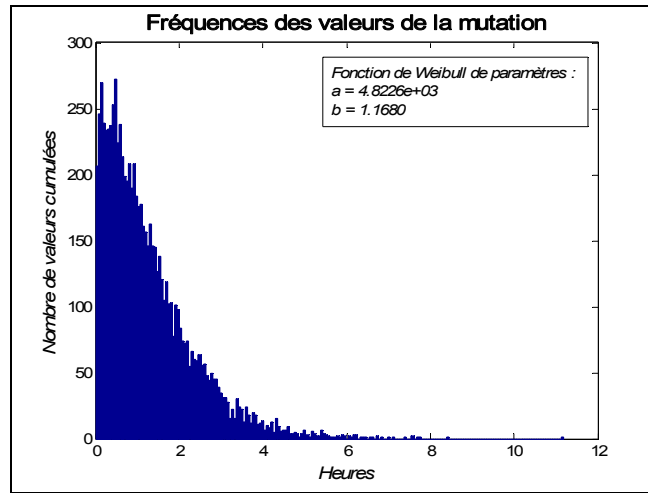


Figure 71 : Fréquences des valeurs de mutation.

iv) Définition de la fonction de performance

La fonction de performance, ou fonction score, permet d'évaluer un individu, la solution potentielle, par rapport au problème étudié. Dans notre cas, le problème est représenté par l'histogramme des détections des capteurs comptabilisé sur un historique de données de 30 jours tel que présenté figure 72. Le score, image de l'adéquation des tranches horaires retenues par rapport à l'histogramme, est calculé selon l'équation 1. Le meilleur individu possède ainsi le plus petit score.

| Formule | Paramètre | Description |
|----------------------------------|---|---|
| $\text{score} = \frac{A}{B + C}$ | $NbTH$ | Nombre de tranches horaires |
| | $Gene(i)$ | Indice temporel n°i de l'individu, $i \in [1, NbTH]$ |
| | $HistTH(i)$ | Histogramme des impulsions comprises entre : $[gene(i), gene(i-1)[$, $\forall i \in [1, NbTH - 1]$, $[0, gene(1)[\cup [gene(NbTH), 84600[$, pour $i = NbTH$, (une durée minimale de 30 min. est imposée pour chaque tranche horaire pour éviter d'obtenir, à terme, des échantillons contenant de faibles quantités de données) |
| | A | $\sum_{i=1}^{NbTH} ec(i)$ où $ec(i)$ écart type de la distribution normale de $HistTH(i)$. |
| | B | $\left(\sum_{i=1}^{NbTH-1} abs(m(i) - m(i+1)) \right) + abs(m(NbVar) - m(1))$ Où $m(i)$ est la moyenne de $HistTH(i)$. |
| C | $\prod_{i=1}^{NbTH} \frac{n(i)}{T}$ où $n(i)$ est la taille du tableau $HistTH(i)$, et T la taille de l'histogramme général. | |

Équation 1 : Calcul de l'adéquation des tranches horaires d'une journée

IV.4.3.e Résultats

Le nombre de périodes est volontairement limité aux phénomènes les plus apparents définissant les tranches horaires : la figure 72 illustre le découpage horaire obtenu pour la journée 27/03/2006 de l'appartement n°2 (figure 66). Elle représente le nombre de détections, comptabilisé sur les 30 jours précédant la date du 27 (histogramme) et fait bien apparaître 6 périodes temporelles caractéristiques des habitudes de vie qui cadrent bien l'intensité des activités durant la matinée, le déjeuner (effectué à l'extérieur de l'appartement), l'après-midi, le début de soirée, le coucher et le sommeil.

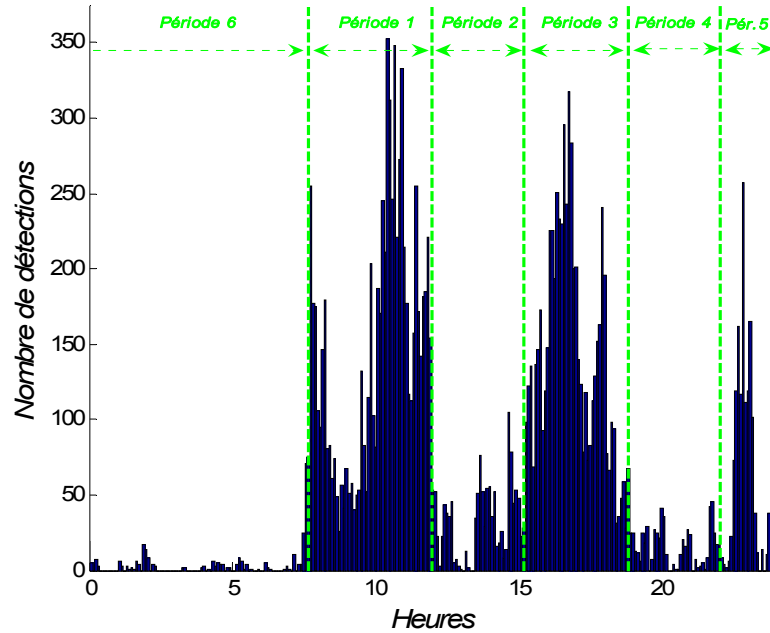


Figure 72 : Découpage temporel d'une journée.

IV.4.3.f Découpage local

La classification temporelle offre à ce stade une précision sur les échantillons de l'historique qui seront exploités. Le découpage local des activités, intégré à la classification temporelle des activités, permet de calculer, pour chaque période et pour chaque zone de l'appartement, les estimateurs qui serviront de référence pour la détection d'incidents.

Pour chaque classe, les différents critères d'activités vont être, un à un, calculés statistiquement et automatiquement, toujours sur la base d'un historique des 30 derniers jours. Nous obtenons ainsi pour chaque critère, chaque période et chaque zone de l'appartement, un couple de seuils (valeurs minimale et maximale) caractérisant la normalité d'activité, i.e. l'ensemble des valeurs qui différencie le comportement habituel d'un comportement inhabituel. Une fois définis, ces seuils servent de référentiel pour la procédure de détection des incidents.

IV.4.3.g Les critères de diagnostic

Les critères d'activités sont les interprétations qu'il est possible de faire à partir de la seule information de mouvement. A l'origine, PROSAFE exploitait les critères d'immobilité, d'agitation et de présence pour la détection d'incident. « PROSAFE-étendu », exploite en plus le temps de séjour, la vitesse de déplacement et la distance parcourue qui témoignent des capacités physiques de la personne.

i) Immobilité

L'immobilité est un critère basé sur l'absence de mouvement de l'utilisateur dans un lieu de l'appartement. Nous faisons l'hypothèse qu'une immobilité prolongée de l'utilisateur, peut être signe de chute, malaise, etc. L'immobilité est caractérisée par :

| Formule | Paramètre | Description |
|----------------------|-----------|---|
| $I(t) = t - t_{det}$ | I(t) | Immobilité de l'utilisateur à l'instant t (en minute). |
| | t | Instant t (min.) |
| | t_{det} | Instant de la dernière détection de capteur observée (min.) |

ii) Séjour

Le critère de séjour correspond au temps passé par l'utilisateur dans un lieu de séjour dans l'appartement. Le temps de séjour caractérise les habitudes d'occupation de chaque endroit du milieu de vie.

| Formule | Paramètre | Description |
|----------------------------|-----------|--|
| $S(t) = t_{Arr} - t_{Sor}$ | S(t) | Durée du séjour dans une zone (en minute). |
| | t_{Arr} | Instant où l'utilisateur arrive dans la zone considérée (min.) |
| | t_{Sor} | Instant t (min.) où l'utilisateur sort de la zone considérée |

iii) Agitation

L'agitation est calculée en fonction du nombre de détections de mouvement comptabilisé sur la période temporelle des 10 dernières minutes.

| Formule | Paramètre | Description |
|--|------------|---|
| $A(t) = \left(\sum_{i=t-D}^t Det(i) \right) \cdot \frac{100}{N}$ <p>avec</p> $N = D \cdot \Delta_c \cdot S$ | A(t) | Agitation à l'instant t (en %). |
| | D | Durée de l'intervalle temporel considéré : 10*60 sec. |
| | Det(i) | Nombre de détection des capteurs à l'instant i. |
| | N | Nombre maximal de détection possible en 10 min. |
| | Δ_c | Nombre de détections possible en 1 seconde pour un détecteur : 2. |
| | S | Nombre de détecteurs pouvant s'activer simultanément : 2. |

iv) *Distance parcourue*

Avant d'explicitier le modèle de calcul de la distance parcourue par l'utilisateur, il faut rappeler certaines caractéristiques des détecteurs ainsi que les propriétés des configurations des réseaux de capteurs. Les détecteurs sont installés de telle sorte que le réseau de capteurs couvre la superficie totale de l'appartement. Les zones de détection sont indépendantes les unes des autres et leurs surfaces sont réglées manuellement par l'installateur en plaçant un cache, de taille variable, sur la lentille de Fresnel : la forme et la superficie des zones de détection ne sont donc pas connues avec précision. De plus, l'orientation des détecteurs est réglée manuellement.

La distance peut être aisément calculée lorsque l'on connaît la distance tridimensionnelle entre la source de rayonnement et le détecteur. Comme le déclenchement d'un détecteur dépend de la surface de détection, de son orientation, et de l'intensité du rayonnement de la source (variant avec la vitesse, la taille de l'utilisateur, la tenue vestimentaire, etc.), un calcul arithmétique précis paraît dans ce contexte peu fiable. Les réflexions sur les premiers résultats ont conduit à déterminer, pour chaque triplet de zone, une distance « estimée » calculée à partir des temps moyens de déplacements de la personne.

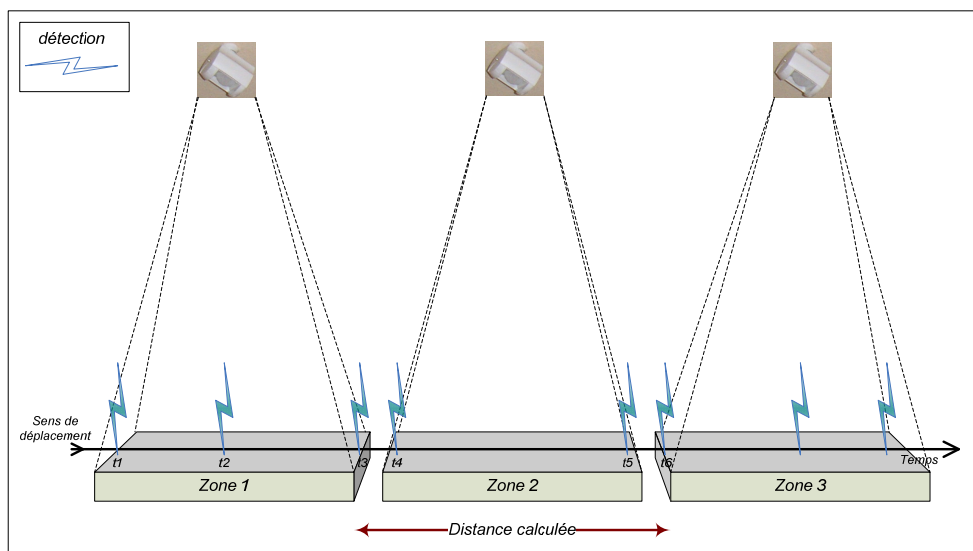


Figure 73 : Exemple de trajectoire pour le calcul de la distance « estimée ».

Le principe consiste à recenser dans un premier temps tous les déplacements effectués par l'utilisateur pour chaque trajectoire de 3 zones distinctes (exemple de trajectoire : « Zone 1 \Rightarrow Zone 2 \Rightarrow Zone 3 » illustrée figure 73) dans une période donnée (30 jours), avec une vitesse de déplacement de la personne supposée constante. Cette hypothèse est respectée lorsque l'on considère les trajectoires de l'utilisateur contenant le même nombre de détections dans la zone centrale (zone 2 pour l'exemple de la figure 73). Nous obtenons ainsi une estimation de la distance par :

| Formule | Paramètre | Description |
|--|-----------|--|
| $D_m = \frac{\sum_{i=1}^{Tech} (V_u \cdot T_i)}{Tech}$ | D_m | Distance relative moyenne |
| | T_{ech} | Taille de l'échantillon |
| | V_u | Vitesse de l'utilisateur (supposée constante), fixée à 1m/s. |
| | T_i | Durée du déplacement de l'utilisateur pour la trajectoire considérée (sec.) entre la première détection de la zone centrale et la première détection de la zone d'arrivée. |

IV.4.3.h Vitesse de déplacement

Le critère de vitesse est un critère intéressant car il témoigne des capacités physiques de l'utilisateur. La vitesse de déplacement, pour une trajectoire donnée, peut être calculée lorsque la distance « estimée » est connue :

| Formule | Paramètre | Description |
|--------------------|-----------|--|
| $V(t) = D_m / T_d$ | $V_{(t)}$ | Vitesse relative calculée à l'instant t pour une trajectoire donnée. |
| | D_m | Distance « estimée » de la trajectoire considérée. |
| | T_d | Durée du déplacement (figure 73 : durée comprise entre les instants $[t_4, t_6]$) |

IV.4.4 Algorithme de détection d'incidents

IV.4.4.a Incidents considérés

Sur la base des critères d'activités, plusieurs types d'incidents peuvent être identifiés par le système soit par suivi permanent d'une seule mesure, soit par fusion multicritères. Aujourd'hui « PROSAFE-étendu », cadre ses diagnostics sur l'analyse indépendante de chaque critère d'activité pour :

- la présomption de chute, sur la base de l'immobilité prolongée et du temps de séjour anormal,
- l'agitation excessive, sur la base de l'agitation,
- la fugue, sur l'exploitation de l'absence et du temps de séjour,
- la diminution de la mobilité physique sur la base de la distance parcourue,
- le séjour excessif, sur la base du critère de séjour et adapté à certaines pathologies comme par exemple les personnes diabétiques qui ne doivent pas rester assises au-delà de 3 heures...

Ce sont ainsi les seuils de détection, dont la méthode de calcul est présentée, qui serviront de référence pour l'identification de ces types d'incidents.

IV.4.4.b Outils et prétraitements

Les opérations préliminaires effectuées sur les données élémentaires (issues des détections des capteurs) en amont des traitements principaux ont pour objectifs :

d'éliminer les valeurs perturbatrices ou sources d'erreur, d'enrichir les données brutes par certaines métriques, de définir un ensemble de données structurées.

Pour la surveillance des personnes autonomes en appartement, les données élémentaires sont les détections de mouvements de l'utilisateur. Les phénomènes perturbateurs à filtrer sont :

- les détections intempestives dues aux rayonnements émis par certains appareils ménagers ou par la météo (cuisinière, convecteurs, soleil, etc.)
- les déplacements de plusieurs personnes dans l'appartement,
- les déplacements effectués dans le couloir, à l'extérieur de l'appartement, par une tierce personne.

Le filtrage qui est appliqué consiste à suivre les déplacements de l'utilisateur, détection par détection, conformément à la configuration connue du réseau de capteurs. Deux détections successives, non conformes à un déplacement « logique » de l'utilisateur marquent donc la fin des trajectoires de positions valides. La figure 74 illustre les déplacements valides d'une trajectoire étiquetée par le label XML « niveau > 0 ».

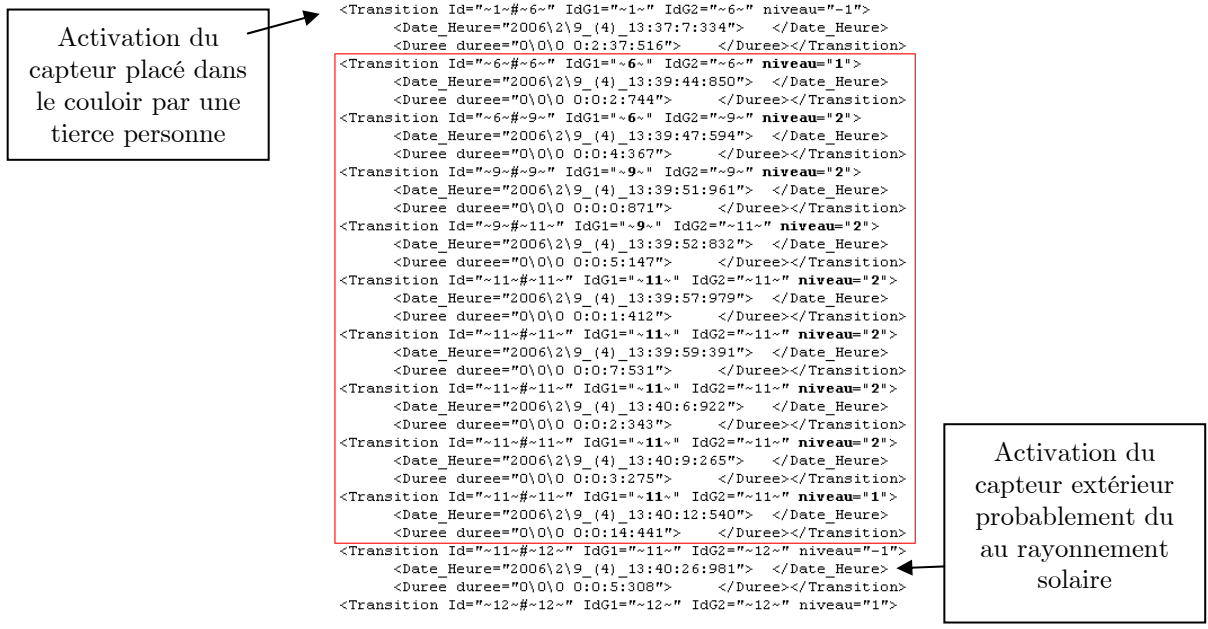


Figure 74 : Filtrage des données des capteurs.

| DateDebut | Seq. | Indice | Zone | Ips Sej | Agitation | Immobilité | Immob Min | Immob Max | NbImpls | Deplacmt | Deplcmt duree |
|-----------------------------|------|-----------|----------|-------------|-----------|------------|------------|-------------|---------|-----------|---------------|
| 2005V11V18_(6)_14:15:33.226 | 1 | 51333.226 | -9- | 1924.726929 | 3 | 265.522003 | 0.841 | 1622.042969 | 6 | | |
| 2005V11V18_(6)_14:47:37.953 | 1 | 53257.953 | -6- | 33.248001 | 1 | 33.248001 | 33.248001 | 33.248001 | 1 | -9-6-11- | 298.769989 |
| 2005V11V18_(6)_14:48:11.201 | 1 | 53291.201 | -11- | 583.629028 | 2 | 583.629028 | 583.629028 | 583.629028 | 1 | -6-11-9- | 616.877014 |
| 2005V11V18_(6)_14:57:54.830 | 1 | 53874.83 | -9- | 2.444 | 1 | 2.444 | 2.444 | 2.444 | 1 | -11-9-10- | 586.072998 |
| 2005V11V18_(6)_14:57:57.274 | 1 | 53877.274 | -10- | 3.385 | 4 | 1.042 | 0.751 | 1.592 | 3 | -9-10-11- | 5.829 |
| 2005V11V18_(6)_14:58:0.659 | 1 | 53880.659 | -11- | 8.922 | 7 | 7.471 | 0.53 | | 3 | | |
| 2005V11V18_(6)_14:58:9.581 | 1 | 53889.581 | -10- | 28.742001 | 8 | 28.742001 | 28.742001 | 28.742001 | 1 | -11-10-9- | 36.213001 |
| 2005V11V18_(6)_14:59:36.323 | 1 | 53918.323 | -9- | 5.958 | 9 | 5.958 | 5.958 | 5.958 | 1 | -10-9-11- | 34.700001 |
| 2005V11V18_(6)_14:59:44.261 | 1 | 53924.261 | -11- | 31.645 | 5 | 3.226 | 0.721 | 14.75 | 4 | -9-11-10- | 37.002998 |
| 2005V11V18_(6)_14:59:15.326 | 1 | 53955.326 | -10- | 7.14 | 7 | 0.821 | 0.821 | 6.319 | 2 | | |
| 2005V11V18_(6)_14:59:22.466 | 1 | 53962.466 | -11- | 9.925 | 9 | 7.201 | 2.724 | 7.201 | 2 | | |
| 2005V11V18_(6)_14:59:22.391 | 1 | 53972.391 | -10- | 77.210999 | 8 | 47.472 | 14.377 | 47.472 | 3 | -11-10-9- | 84.412003 |
| 2005V11V18_(6)_15:0:49.602 | 1 | 54049.602 | -9- | 2.643 | 3 | 1.993 | 0.65 | 1.993 | 2 | -10-9-11- | 50.115002 |
| 2005V11V18_(6)_15:0:52.245 | 1 | 54052.245 | -11- | 4.517 | 7 | 1.482 | 0.591 | 1.813 | 4 | -9-11-10- | 6.51 |
| 2005V11V18_(6)_15:0:56.762 | 1 | 54056.762 | -10- | 2.383 | 9 | 0.605 | 0.605 | 1.778 | 2 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:0:59.145 | 1 | 54059.145 | -11- | 25.958 | 13 | 11.877 | 0.601 | 11.877 | 5 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:1:25.103 | 1 | 54085.103 | -10- | 2.147 | 14 | 2.147 | 2.147 | 2.147 | 1 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:1:27.250 | 1 | 54087.25 | -11- | 18.242001 | 15 | 18.242001 | 18.242001 | 18.242001 | 1 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:1:59.843 | 2 | 54119.843 | -3- | 11.747 | 6 | 11.747 | 11.747 | 11.747 | 1 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:2:11.590 | 2 | 54131.59 | -2- | 0.67 | 6 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 1 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:2:12.250 | 2 | 54132.26 | -6- | 3.716 | 7 | 3.716 | 3.716 | 3.716 | 1 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:2:15.976 | 2 | 54135.976 | -10- | 20.639 | 8 | 1.111 | 1.111 | 11.025 | 5 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:2:36.615 | 2 | 54156.615 | -11- | 344.546021 | 1 | 23.604 | 0.631 | 191.796005 | 14 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:8:21.161 | 2 | 54501.161 | -10- | 6.74 | 3 | 5.989 | 0.751 | 5.989 | 2 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:8:27.901 | 2 | 54507.901 | -6-9-10- | 5.928 | 4 | 5.928 | 5.928 | 5.928 | 1 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:8:33.829 | 2 | 54513.829 | -10- | 124.689003 | 6 | 15.943 | 0.641 | 46.748001 | 12 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:10:38.518 | 2 | 54638.518 | -11- | 47.678997 | 4 | 2.253 | 1.272 | 34.5 | 4 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:11:26.197 | 2 | 54886.197 | -10- | 267.613007 | 9 | 206.414993 | 1.463 | 206.414993 | 10 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:15:53.810 | 2 | 54953.81 | -11- | 426.595001 | 1 | 235.035004 | 191.559998 | 235.035004 | 2 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:23:0.405 | 2 | 55380.405 | -10- | 262.356995 | 3 | 0.962 | 0.561 | 52.685001 | 17 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:27:22.762 | 2 | 55642.762 | -10-11- | 19.618999 | 4 | 19.618999 | 19.618999 | 19.618999 | 1 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:27:42.381 | 2 | 55662.381 | -11- | 5.948 | 4 | 4.546 | 1.402 | 4.546 | 2 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:27:48.329 | 2 | 55666.329 | -10- | 19.417999 | 5 | 19.417999 | 19.417999 | 19.417999 | 1 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:28:7.747 | 2 | 55697.747 | -11- | 10.105 | 8 | 0.552 | 0.552 | 7.633 | 3 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:28:17.852 | 2 | 55697.852 | -10- | 2.798 | 9 | 2.798 | 2.798 | 2.798 | 1 | -11-10-9- | 3.35 |
| 2005V11V18_(6)_15:28:20.650 | 2 | 55700.65 | -9- | 10.27 | 10 | 10.27 | 10.27 | 10.27 | 1 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:28:30.920 | 2 | 55710.92 | -10- | 6.95 | 9 | 6.95 | 6.95 | 6.95 | 1 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:28:37.870 | 2 | 55717.87 | -9-10- | 1.072 | 10 | 1.072 | 1.072 | 1.072 | 1 | | |
| 2005V11V18_(6)_15:28:38.942 | 2 | 55718.942 | -10- | 4.026 | 11 | 4.026 | 4.026 | 4.026 | 1 | | |

Figure 75 : Métriques calculées.

Les trajectoires (de positions) valides d'un seul individu, accompagnées de certaines métriques (immobilité, temps de séjour, trajectoires, nombre d'impulsions durant les 20 dernières minutes, etc.) sont ainsi identifiées et préservées dans deux fichiers :

- le premier détaille toutes les détections de mouvements observées ainsi que le suivi « temps-réel » des critères associés,
- le second synthétise les critères d'activités observés dans chaque endroit de l'appartement occupé par l'utilisateur (voir figure 75). L'intérêt est de ne retenir que l'information essentielle tout en réduisant la taille des fichiers traités (rapport de 4).

Ces fichiers, générés automatiquement ou sur interrogation après une requête de l'utilisateur, contiennent les informations structurées qui seront exploitées par l'outil de traitements numériques.

IV.4.4.c Le calcul des seuils de détection

Les éléments présentés section IV.4.3 définissent une modélisation du comportement humain par tranche horaire et par zone de localisation. Pour détecter un comportement inhabituel, nous proposons de définir des seuils permettant de distinguer deux classes de comportements : « habituels » et « inhabituels ». L'idée est de considérer chacune des zones de l'appartement de manière indépendante et de travailler sur autant de seuils que de zones pour apporter d'avantage de précision. Pour chaque diagnostic, les valeurs des seuils sont calculées à partir de l'historique des 30 jours passés également filtrés pour améliorer l'analyse statistique. De cet échantillon de données, nous déduisons les paramètres d'une distribution suivant la loi de Weibull (formule 1) puis calculons les seuils minimum et maximum selon la formule 2.

$$y = f(x/a, b) = b \cdot a^{-b} \cdot x^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}$$

Formule 1 : Densité de probabilité suivant la loi de Weibull.

| <i>Formule</i> | <i>Paramètre</i> | <i>Description</i> |
|--|------------------|--------------------|
| $\left\{ \begin{array}{l} \text{Seuil}_{\max} = \mu + \mathcal{G} \\ \text{Seuil}_{\min} = \mu - \mathcal{G} \end{array} \right\}$ | μ | Moyenne |
| | \mathcal{G} | Ecart type |

Formule 2 : Calcul des seuils de détection d'incidents.

Les sections suivantes ont pour but de détailler les résultats obtenus pour chaque critère d'activité.

IV.4.4.d La confirmation des alarmes

En vue de mettre au point la validation par un téléopérateur des alarmes PROSAFE, un système de confirmation par mail a été élaboré. Les téléopérateurs peuvent informer le système sur la validité d'une alarme par un mail de confirmation contenant 4 champs prédéfinis :

- le nom de l'abonné,
- la date et l'heure de l'alarme,
- la véracité de l'alarme :
 - 1 : l'alarme correspond à une chute,
 - 2 : l'alarme ne traduit aucun événement anormal,
 - 3 : un incident s'est produit dans l'appartement et aucune alarme n'a été déclenchée par le système PROSAFE.
- La référence du téléopérateur.

Le mail type est illustré figure 76.

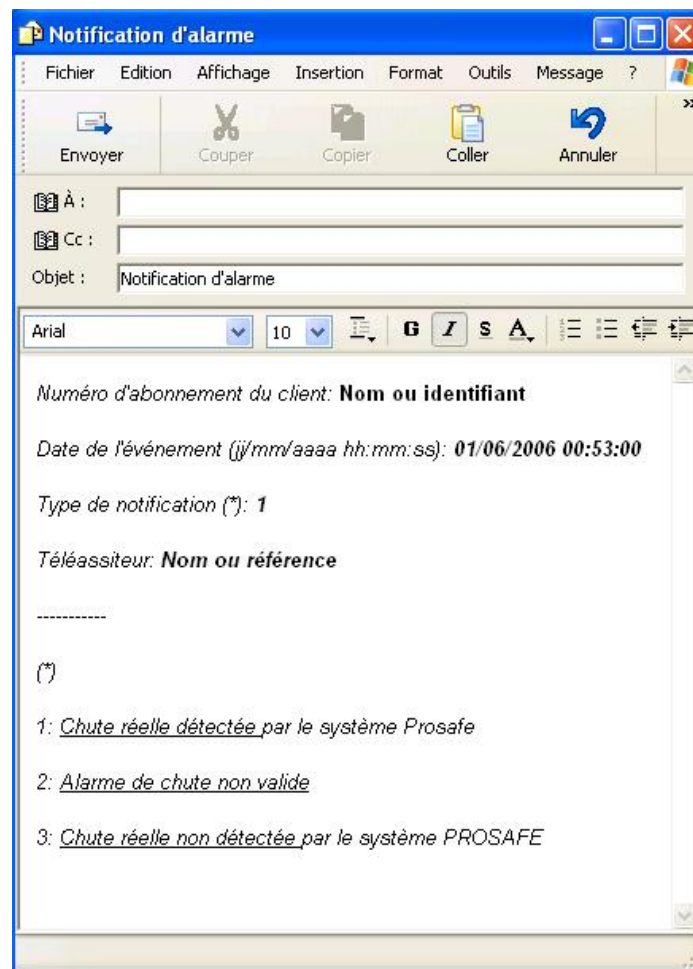


Figure 76 : Patron de mail de confirmation d'alarme.

Le mail est envoyé vers une adresse Internet dédiée et PROSAFE scrute toutes les 3 minutes la boîte de réception. Le mail, aussitôt récupéré, est interprété par PROSAFE pour effectuer l'ajustement des seuils en fonction de la véracité de l'alarme. La validation ou non de l'alarme contribue ainsi fortement à l'apprentissage supervisé des paramètres de détection d'incidents.

IV.4.5 Résultats

IV.4.5.a Suivi quotidien des activités

i) Immobilité

L'analyse des résultats en fonction du critère d'immobilité est présentée figure 77. Les durées d'immobilités inférieures à 2 minutes sont exclues de l'échantillon car seule l'immobilité prolongée joue un rôle dans la détection d'incidents notamment la chute. La figure 77 présente le seuil maximal calculé (lignes rouges) pour la journée du

27/03/2006 à partir des immobilités observées sur les 30 jours précédents (points bleus) ainsi que les immobilités constatées durant la journée observée (points noirs).

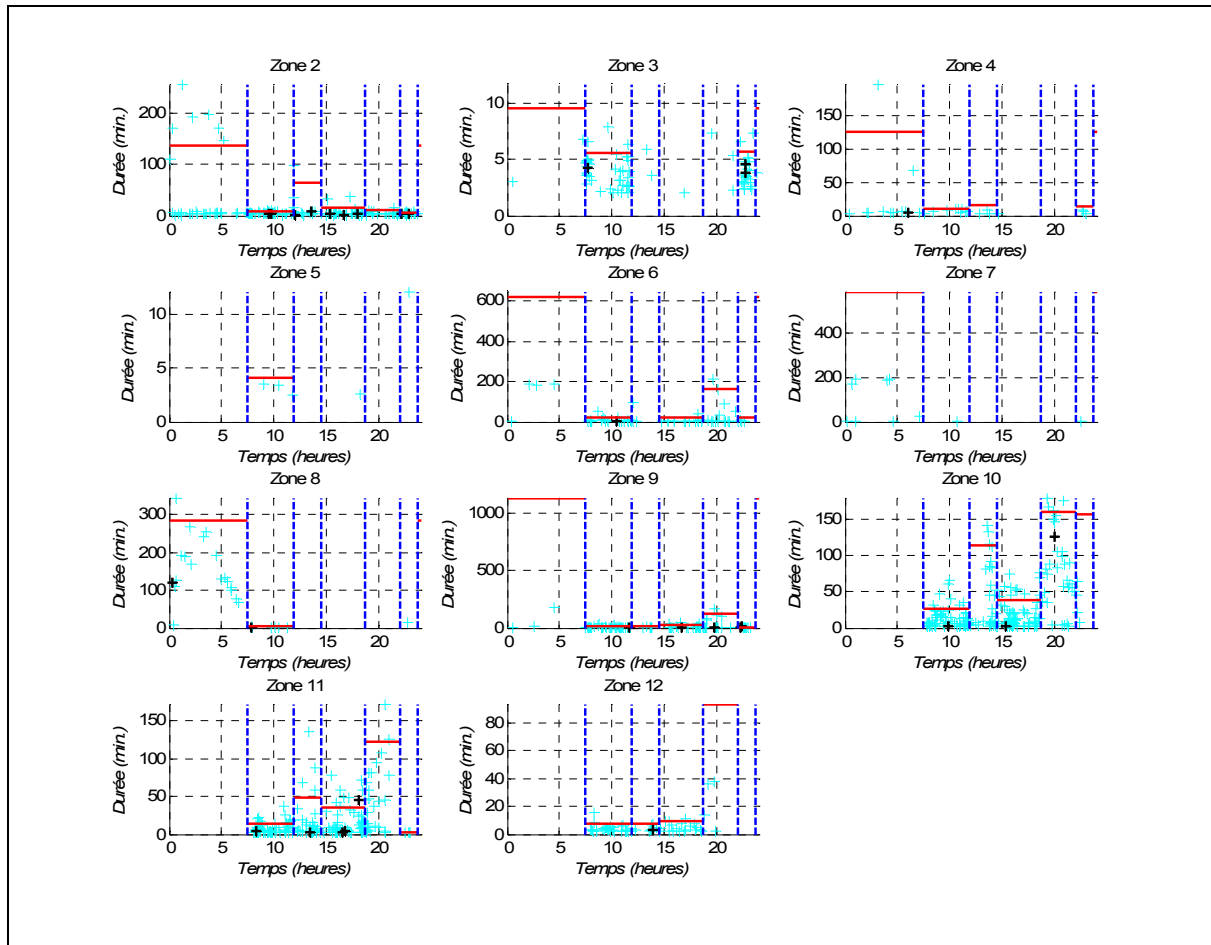


Figure 77 : Immobilité par tranches horaires en fonction des zones.

Nous pouvons observer que l'ensemble des événements se situe en dessous du seuil de tolérance (barres horizontales).

ii) Séjour

L'analyse statistique selon le critère de séjour est présentée figure 78. Les durées de séjour inférieures à 1min30 sont ignorées afin de ne pas comptabiliser les durées trop faibles dues aux déplacements de l'utilisateur. La figure 78 présente le seuil maximal calculé (lignes rouges) pour la journée du 27/03/2006 à partir des durées de séjour observées sur les 30 jours précédents (points bleus) ainsi que les durées de séjour constatées durant cette journée (points noirs).

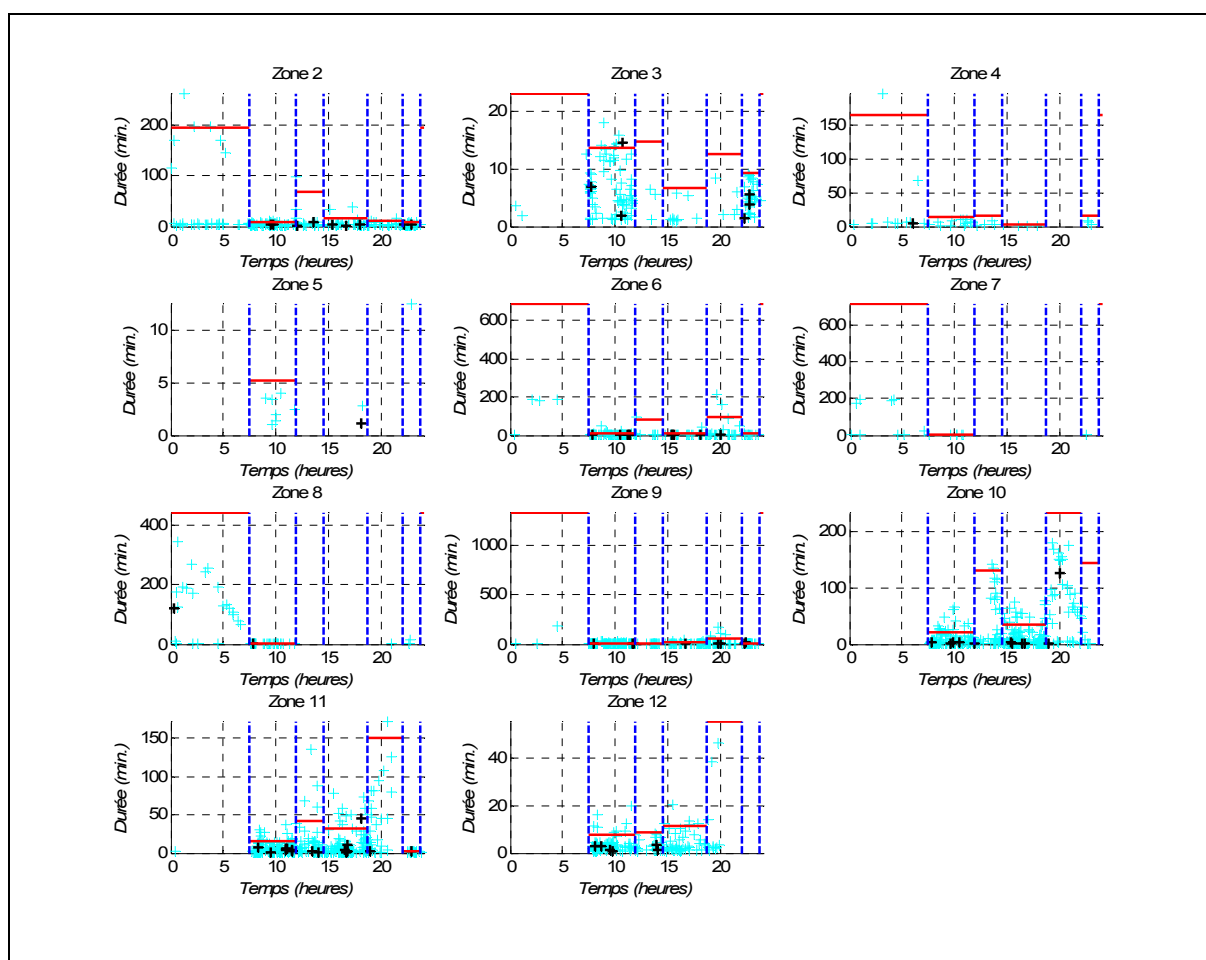


Figure 78 : Temps de séjour par tranches horaires en fonction des zones.

Nous pouvons observer que seulement 2 événements dépassent les seuils de référence de quelques minutes tandis que l'ensemble des valeurs reste inférieur et très proche des seuils.

iii) Agitation

L'analyse statistique selon le critère d'agitation est présentée figure 79. Les valeurs d'agitation inférieures à 5% sont ignorées car seules les valeurs hautes entrent en considération dans la détection d'incidents notamment l'agitation excessive. La figure 79 présente le seuil maximal calculé (lignes rouges) pour la journée du 27/03/2006 à partir des variations de l'agitation observées durant les 30 jours précédents (points bleus) ainsi que les valeurs d'agitation constatées durant ce jour (points noirs).

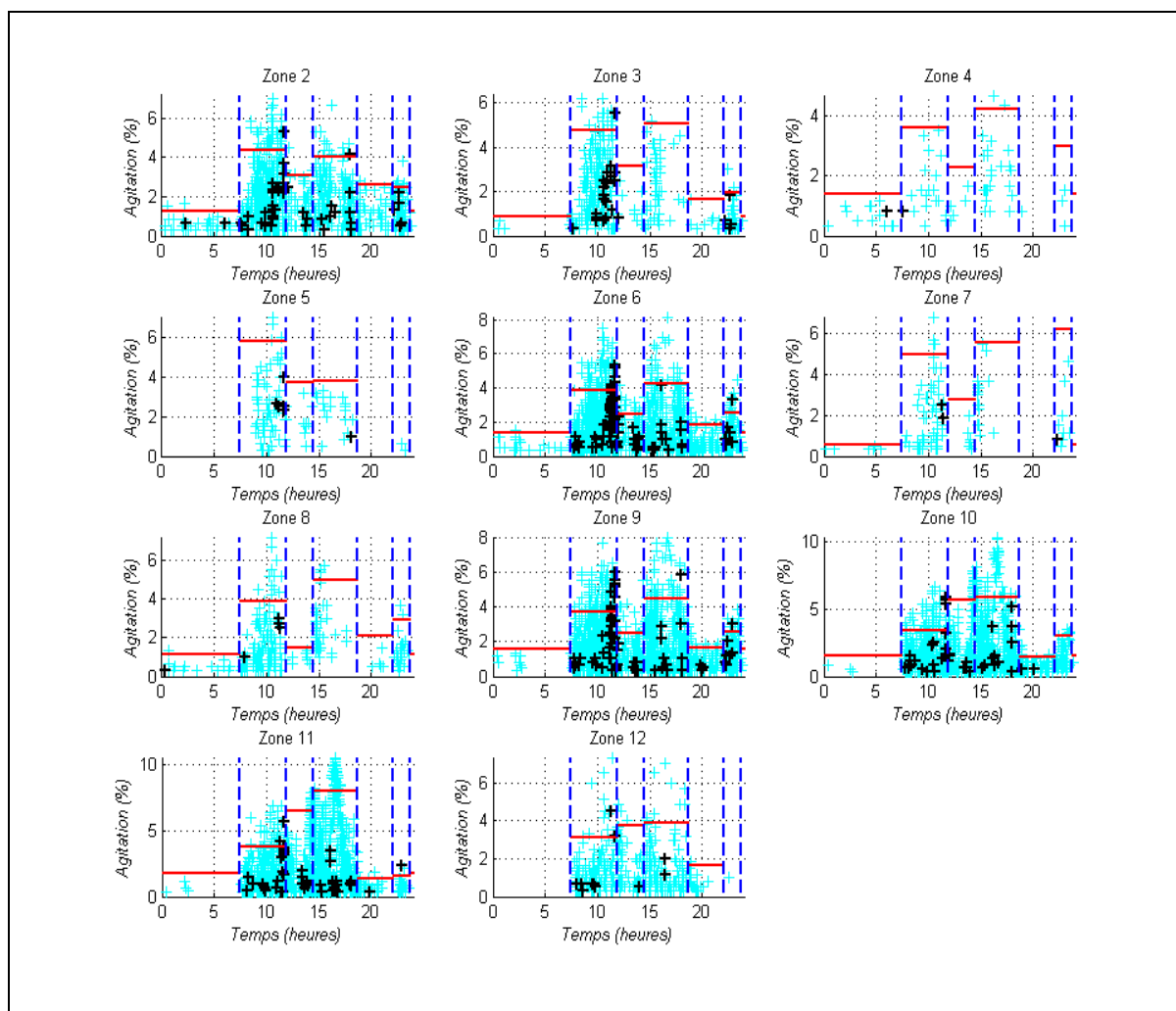


Figure 79 : Agitation par tranches horaires en fonction des zones.

Si l'ensemble des valeurs est en dessous des seuils de référence, de nombreuses valeurs sont supérieures pour la plupart des zones entre 11h et 14h : cela provient probablement des aides ménagères et des aides soignants intervenant régulièrement (tous les 3 jours) chez cette personne. Ces valeurs interférentes, pourraient être filtrées avec une fonctionnalité d'identification des personnes.

iv) Distance

L'analyse statistique selon le critère de distance relative est présentée figure 80. Les distances relatives parcourues par l'utilisateur cumulent les déplacements effectués par l'utilisateur. La figure 80 présente les seuils minimum (lignes vertes) et maximum (lignes rouges) calculés pour la journée du 27/03/2006 à partir des distances relatives calculées pour les 30 précédents jours (barres bleues) ainsi que les distances relatives parcourues par l'utilisateur durant la journée (barres vertes).

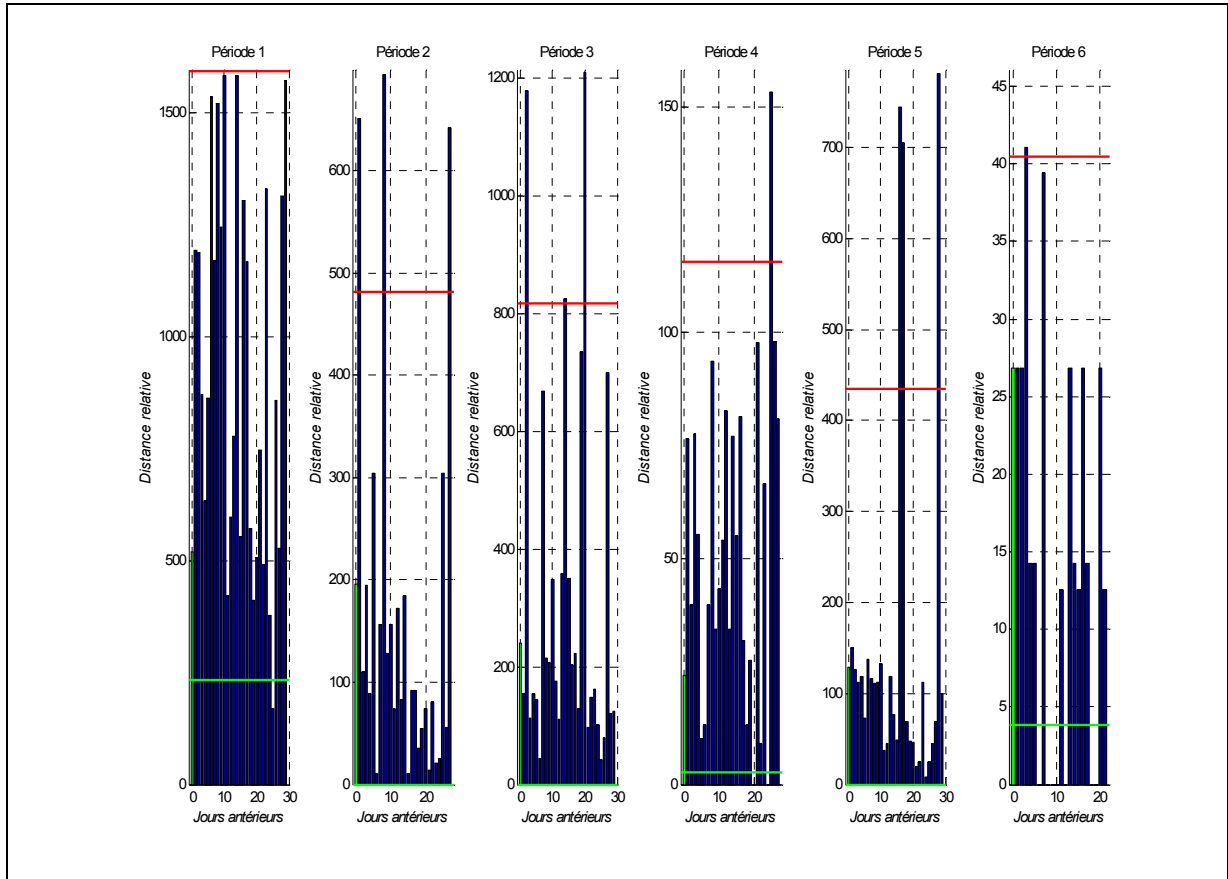


Figure 80 : Distances relatives par tranches horaires.

L'axe des ordonnées représente la notion de distance, selon la méthode d'estimation présentée section IV.4.3.g , et l'axe des abscisses correspond à l'historique des distances parcourues pour les jours précédents. Les distances sont homogènes pour chaque période de la journée et les seuils de référence sont en adéquation avec les valeurs limites observées puisque lorsque l'écart type est important, les seuils sont proches des valeurs extrêmes, et lorsqu'il plus faible, les seuils restent proches des valeurs moyennes.

v) *Vitesse*

L'analyse statistique selon le critère de vitesse relative de l'utilisateur est illustrée figure 81. Elle présente les seuils minimum (lignes vertes) et maximum (lignes rouges) calculés pour la journée du 27/03/2006 à partir des vitesses relatives moyennes calculées pour les 30 jours précédents (points bleus) ainsi que les vitesses relatives effectuées par l'utilisateur durant cette journée (points noirs).

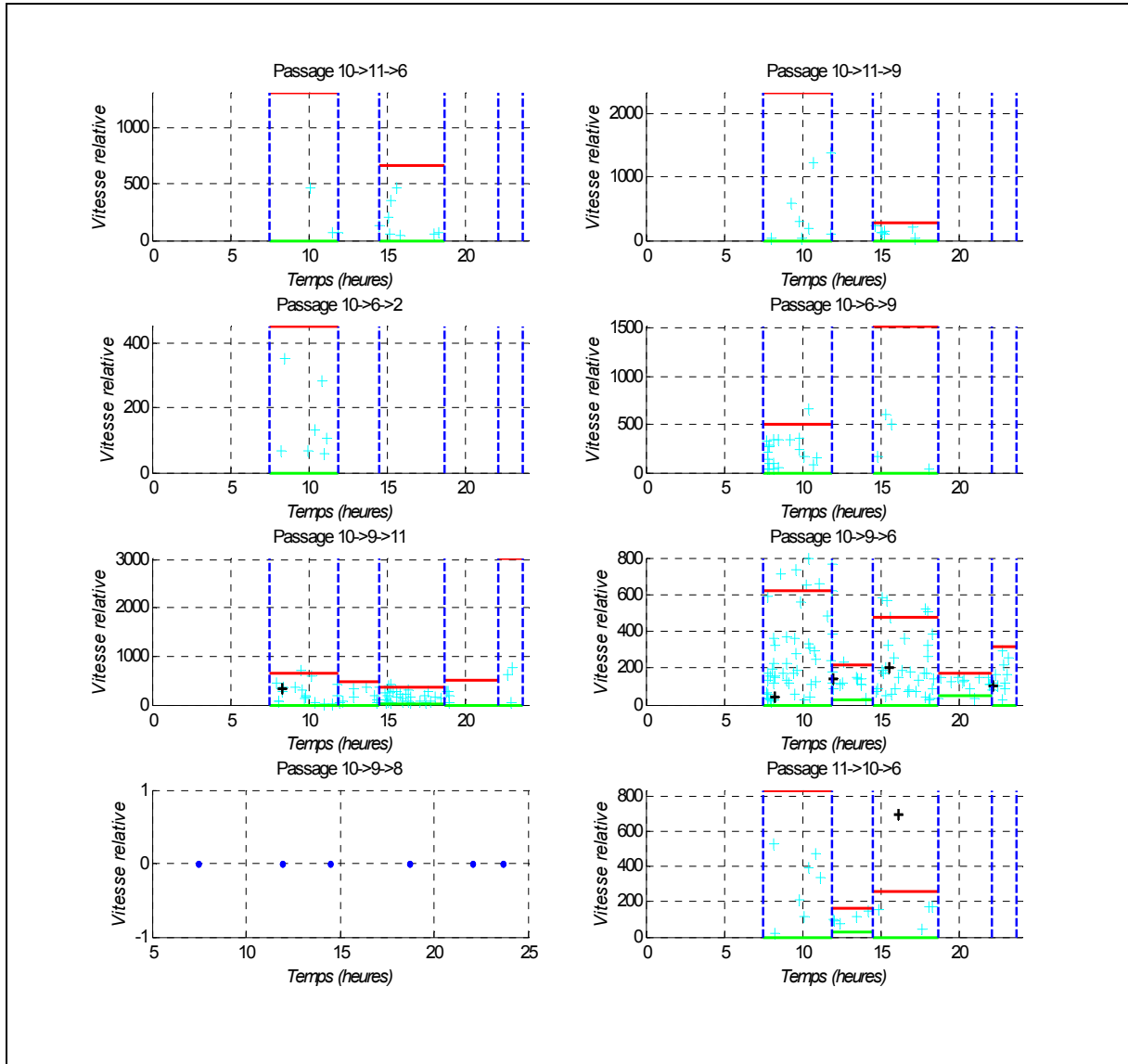


Figure 81 : Vitesses relatives par tranches horaires en fonction des trajectoires.

Mises à part entre 12h et 14h en raison notamment des visites des aides ménagères, les valeurs des vitesses se situent dans les zones de normalités.

IV.4.5.b Identification d'une chute

Durant l'expérimentation, nous avons observé une immobilité le 01/02/2007 correspondant à une situation de chute (information fournie par GTS ultérieurement) « sans gravité apparente ». Durant cette période, le système était en phase de mise point et l'historique des jours précédents était incomplet. Cette situation a tout de même pu être exploitée pour obtenir les informations devant être prises en compte par l'algorithme de détection de chute. Cette situation de chute représentée dans la figure 82 montre la durée d'immobilité observée après la chute réelle et le seuil calculé par le système dans la tranche horaire concernée.

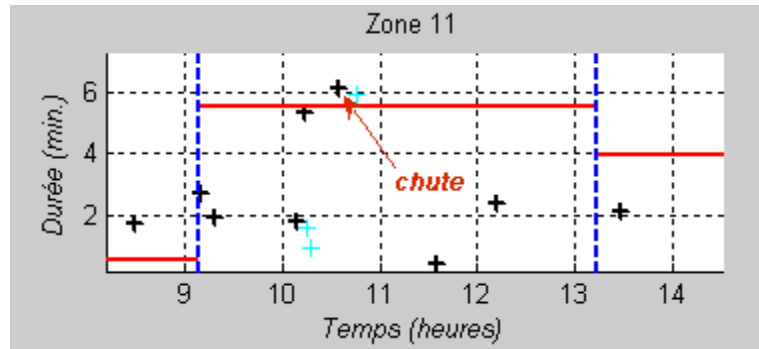


Figure 82 : Situation de chute.

Cet événement a ainsi permis de valider une première estimation des valeurs du critère d'immobilité à considérer pendant une situation de chute. Evidemment, le paramétrage plus précis d'un système de détection d'incidents, basé sur des techniques statistiques, nécessiterait de prendre en compte plusieurs situations de chute dans les échantillons de référence (situations que nous ne souhaitons pas voir se produire...) mais l'objectif de PROSAFE est d'appliquer un principe de prévention des risques ce qui invite à prendre une marge de sécurité.

IV.4.6 Evaluation des performances

Les performances de « PROSAFE étendu » ont été mesurées par comparaison aux performances de l'algorithme original de détection de chute (sans découpage horaire) en comptabilisant le nombre de fausses alarmes émises sur une même période donnée. Les résultats mesurés à partir d'un échantillon de données de 115 jours montrent que la modélisation des habitudes par la localisation et le découpage temporel réduit significativement le nombre de fausses alarmes (voir figure 83).

Si le principe de détection de chute par l'immobilité fait apparaître de nombreuses fausses alarmes (74 pour PROSAFE-étendu et 109 pour PROSAFE original), l'avantage majeur est que les seuils de détection sont très proches des valeurs limites quotidiennes des activités de l'utilisateur (de l'ordre de quelques minutes pour les zones usuelles et parfois une centaine de minutes pour les zones très peu fréquentées en période nocturne) contrairement aux performances de l'algorithme original dont les seuils sont de l'ordre de quelques heures.

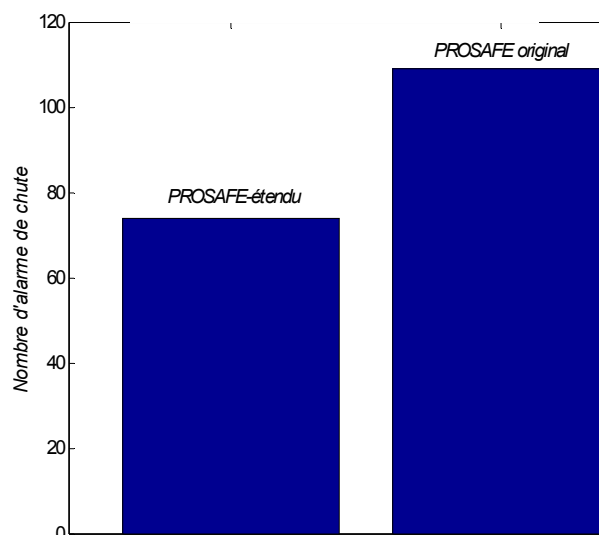


Figure 83 : Comparaison des performances des algorithmes PROSAFE.

IV.5 L'aide au diagnostic médical

IV.5.1 Principe

Basé sur de nouveaux critères intégrés à une modélisation fine des habitudes destinée à détecter les incidents en temps-réel, le système PROSAFE est également un outil d'aide à la décision pertinent pour tout diagnostic médical, acte préventif ou thérapeutique, en proposant des métriques objectives (sans interprétation, sans incertitude), centrées sur le suivi continu des activités du patient.

Le médecin ou toute personne ayant les compétences appropriées, peut désormais enrichir sa stratégie thérapeutique en exploitant de nouvelles connaissances : une description plus précise de l'état du patient par les critères d'activités, et la caractérisation automatique des déviations et troubles du comportement. Le système PROSAFE exploite en effet les critères d'activités, témoins des capacités physiques du patient, pour surveiller et suivre avec précision les problèmes rencontrés par les personnes âgées vivant seules : chute, dégradation du comportement (fugue, malaise, perte de mobilité, changements d'habitudes, etc.) et pathologies chroniques. Les informations physiologiques mises à la disposition du médecin, contribuent ainsi à l'amélioration de ses décisions thérapeutiques grâce à l'intégration de nouvelles connaissances médicales et paramédicales dans le processus de décision médicale destiné à identifier les pathologies émergentes par l'interprétation de ses symptômes. Il s'agit d'identifier, d'une part, les variations significatives des critères d'activités par la mesure de la déviance, et d'observer, d'autre part, l'évolution des critères sur le long terme.

IV.5.2 La mesure de la déviance

Nous avons présenté section IV.4.4 , le principe de détection d'incidents sur la base de l'anormalité observée par rapport aux habitudes. Sur le même principe, nous proposons une quantification de la déviance permettant à l'utilisateur de visualiser l'amplitude de la déviance et pour en évaluer son éventuelle gravité. Nous avons vu section I.7.2.b , que la notion de déviance était représentée à l'origine par les variations de chaque critère d'activité pris sur une échelle temporelle donnée. Nous avons également vu section IV.4.3 , que la modélisation des habitudes, issue d'un découpage temporel et local, peut s'avérer fastidieuse à interpréter. Nous proposons ainsi une représentation homogène de la déviance par une quantification de la notion d'anormalité en fonction de l'écart mesuré par rapport au seuil de référence. La figure 84 illustre une réalisation supérieure à un seuil de référence pour un critère d'activité quelconque.

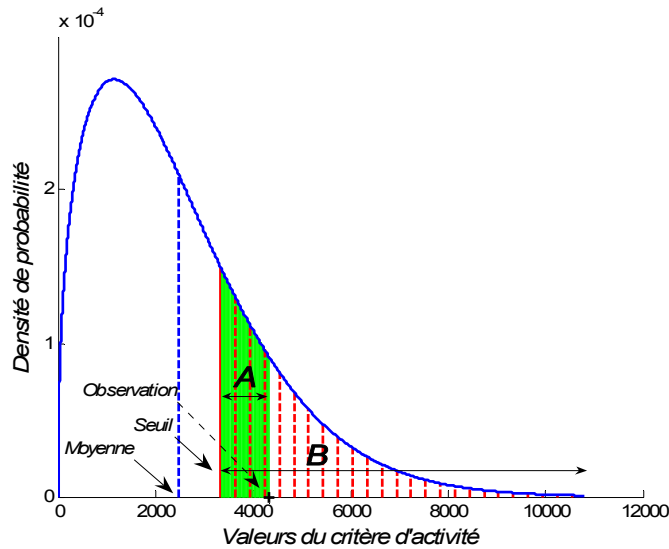


Figure 84 : Principe de calcul de la déviance.

La quantification de l'écart est donnée par l'équation 2 :

| <i>Formule</i> | <i>Paramètre</i> | <i>Description</i> |
|--|--------------------------|---|
| $\frac{\text{Déviance} = p(X \geq \text{Seuil}) - p(X \geq \text{obs})}{p(X \geq \text{Seuil})}$ | $p(X \geq \text{Seuil})$ | Représentée par l'aire 'B' de la figure 84 |
| | $p(X \geq \text{obs})$ | Représentée par la différence 'B'-'A' de la figure 84 |

Équation 2 : Calcul de la déviance

La notion de déviance est normalisée : plus l'écart par rapport aux habitudes est important, plus la déviance tend vers 1. La figure 85 présente les mesures de déviances obtenues pour les critères de séjour, d'immobilité et d'agitation durant une journée. La colonne de gauche illustre l'ensemble des réalisations effectuées durant la journée : les points bleus correspondent aux observations qualifiées de 'normales' (inférieures aux seuils de référence) et les points rouges correspondent aux observations

‘anormales’ (supérieures aux seuils de référence). La colonne de droite illustre le niveau de déviance correspondant à chaque observation anormale.

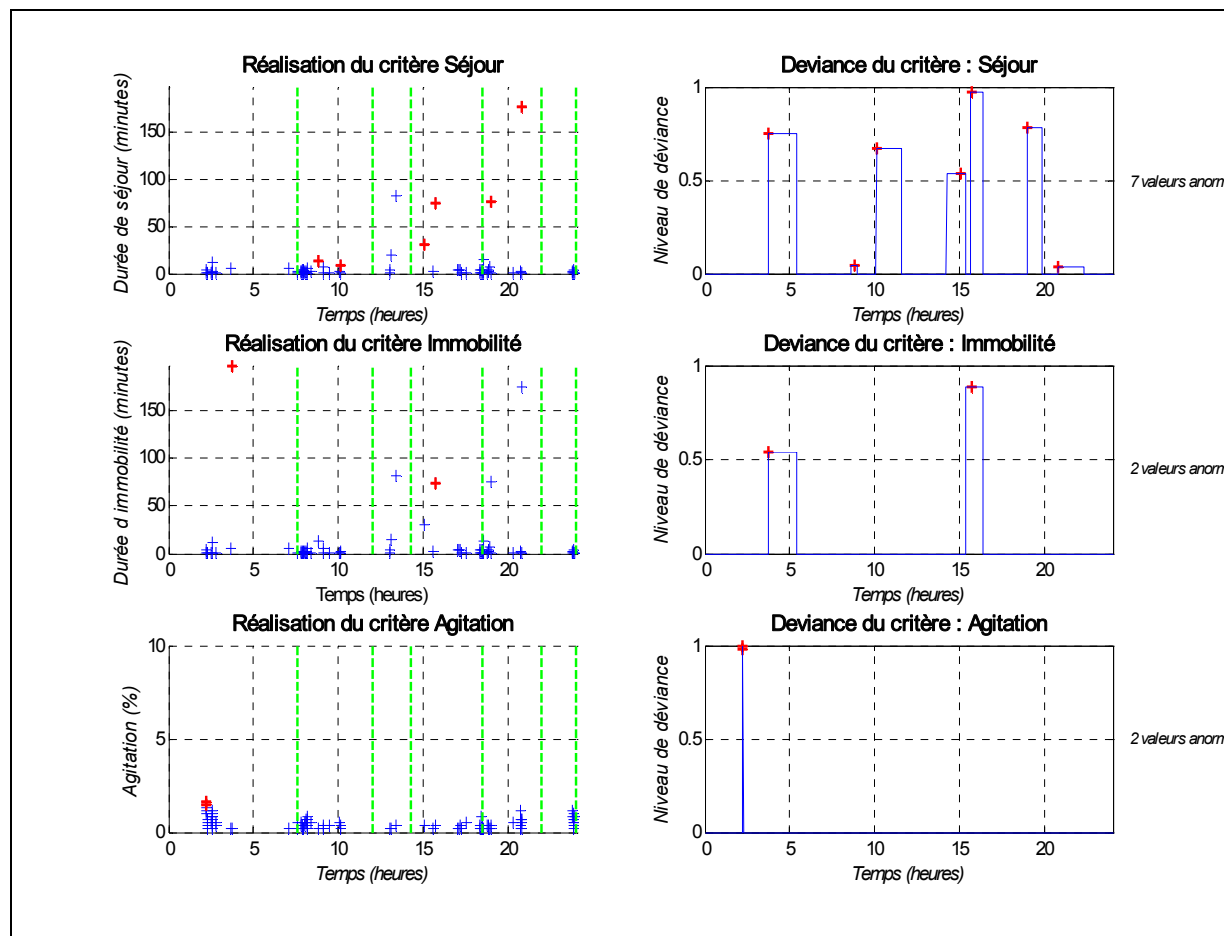


Figure 85 : Déviance du comportement calculé sur une journée.

Nous pouvons ainsi observer l'amplitude de la déviance rapportée à chacun des critères et constater que : pour le critère de séjour, 5 situations de déviance importantes sont constatées, pour le critère d'immobilité 2 événements anormaux ont été observés durant la nuit et en début d'après midi, pour l'agitation un événement anormal important est également constaté durant la nuit. Les activités observées durant cette nuit résultent d'un lever, suivi d'une déambulation passive dans l'appartement, puis une somnolence « anormale » dans l'entrée. Cette représentation homogène des critères d'activités déviantes facilite l'interprétation des événements et de l'état physique de la personne durant une période donnée.

IV.5.3 Les témoins des capacités physiques

Les critères d'activités retenus pour l'étude des capacités physiques du patient sur le long terme sont :

- l'immobilité : témoignant des activités marquées par une grande passivité,
- l'agitation : permettant de quantifier l'intensité des activités,
- le séjour : représentant les durées passées dans une zone de l'appartement,

- la vitesse sur un point de localisation : témoignant de l'évolution des capacités physiques de déplacement,
- la distance parcourue sur l'ensemble de l'appartement : témoignant des capacités physiques de déplacement durant une journée.

Le diagnostic de certaines pathologies, ou déclin physiques dus au vieillissement, s'effectue par une analyse des critères d'activités, effectuée sur le long terme (semaine, mois, année), dont l'évolution et la gravité sont évaluées par le médecin. Une analyse mensuelle, ou annuelle, des activités quotidiennes du patient permet donc au médecin de suivre l'évolution des capacités physiques, l'aidant d'une part, à l'élaboration des diagnostics médicaux et d'autre part, au suivi des traitements prescrits affectant le comportement.

Pour simplifier l'interprétation, nous procédons à un découpage temporel de la journée en 4 périodes (matinée, après-midi, soirée et nuit). La figure 86 présente l'évolution des critères d'activités moyennés par jour sur une période de 86 jours. L'évolution des critères d'activités d'immobilité, d'agitation, de séjour et de distance est représentée par une tendance significative.

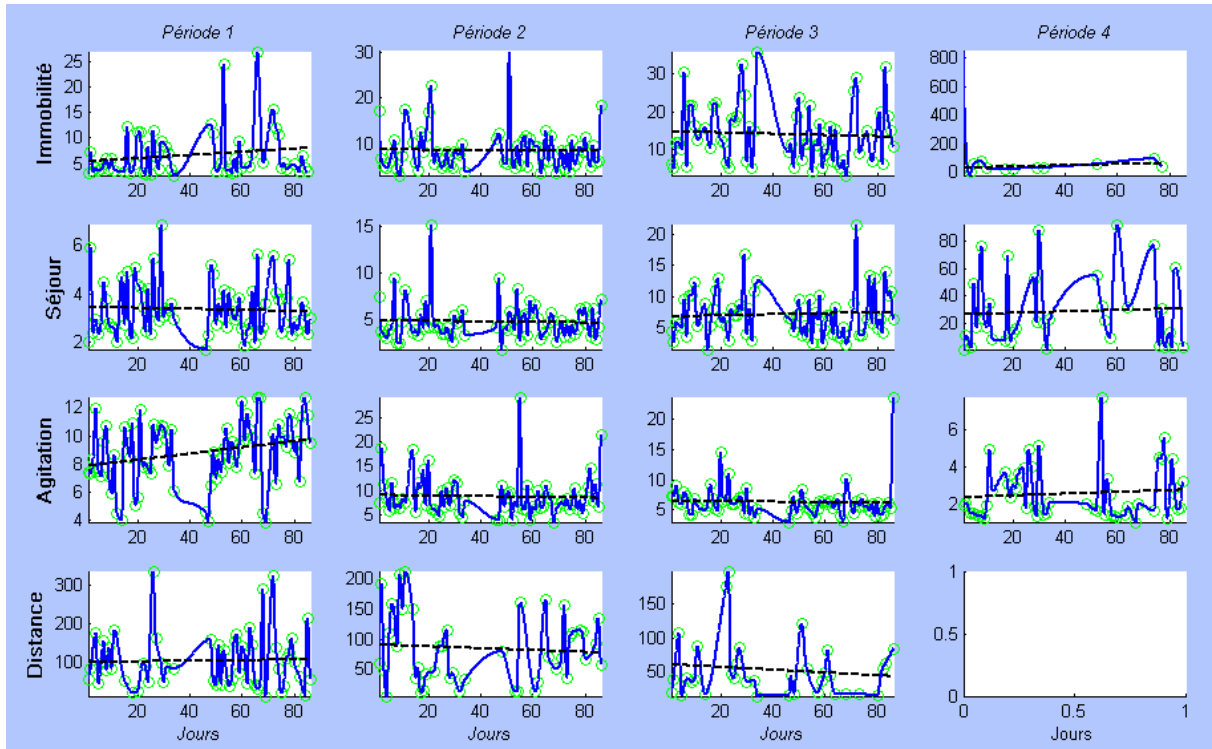


Figure 86 : Evolution des critères d'activités en fonction du temps.

Les périodes 1, 2, 3 et 4 correspondent respectivement à la matinée, l'après-midi, le début de soirée et la nuit. Nous pouvons par exemple observer que l'agitation augmente significativement durant les matinées, alors que l'immobilité, l'agitation et le temps de séjour restent relativement constants (périodes 2, 3, 4), et que les distances parcourues par l'utilisateur diminuent globalement au cours du temps.

IV.6 Conclusion

Ce chapitre était consacré à l'extension du concept PROSAFE vers la surveillance d'une personne isolée vivant seule en appartement et non plus dans une chambre en institution. Nous avons voulu d'abord montrer que les mêmes concepts basés sur la modélisation des habitudes restent valables dans cette configuration nouvelle puis trouver des critères étendus.

Cette expérimentation sur site habité s'est déroulée à Orléans, dans le cadre d'une collaboration entre EDF et la ville d'Orléans : nous avons installé dans les appartements (30m² de type F1-bis) des capteurs de présence « sans fil » de nouvelle génération ainsi qu'un système de collecte associé à une surveillance locale et à un système de renvoi Internet au LAAS. L'installation du système dans l'appartement est simplifiée (nécessite 30 à 60 minutes maximum) et le coût matériel complet du système est de l'ordre de 1500 euros. Nous avons pu aussi rassembler plusieurs mois de données exploitables et appliquer, les traitements « hors ligne ».

Un premier point important a pu ainsi être mis en évidence par l'analyse du nombre détections : des périodes de fortes agitations au levé, dans la matinée et l'après-midi, avec des périodes de calmes après le déjeuner et après le dîner. Cela conforte l'approche d'une modélisation par les habitudes.

Sur cette base nous avons proposé une extension des modes de détections en distinguant les différentes périodes pour lesquels les critères d'activités ont été calculés. En effet, l'évolution du concept PROSAFE vers la surveillance en appartement a montré les limites du système original et orienté les travaux vers une caractérisation plus précise des habitudes, par la localisation et un découpage temporel personnalisé des journées. De nouveaux critères d'analyse pertinents : la vitesse relative de l'utilisateur et la distance parcourue, ont été élaborés dans le but d'évaluer les capacités physiques de l'utilisateur. Ces améliorations dans l'analyse permettent d'établir des diagnostics plus riches sur l'évolution du comportement des personnes et diminuer ainsi le taux de fausses alarmes. Cette modélisation plus précise des habitudes permet de réduire fortement le nombre de fausses alarmes tout en préservant des seuils de détection proches des valeurs critiques. Ce taux de fausses alarmes pourrait encore être diminué par une analyse combinée des différents critères d'activités (travail en cours).

La question reste ouverte de l'implication ERGDOM/PROSAFE dans un ensemble complet de gestion de l'habitat : l'approche la plus rationnelle est de définir un réseau de capteurs pour la localisation permanente des occupants. Elle était limitée technologiquement par la difficulté d'identifier chacun des occupants. Probablement, que dans les prochaines années, les nouvelles étapes franchies notamment dans les technologies RFID, permettront de nouvelles possibilités qui rendront cet objectif parfaitement accessible.

CONCLUSION GENERALE

La Domotique apparaissait dans les années 80 comme un domaine d'application privilégié pour l'électronique et les communications. Ces dernières années le concept d' « Habitat Intelligent » s'est enrichi avec des ambitions émergentes visant un développement durable, économe en énergie et respectueux de l'environnement.

La résolution des problèmes posés suppose une mobilisation de toutes les forces scientifiques et techniques dans les très nombreux domaines des matériaux, des composants et des systèmes. Dans le cadre de la thèse, nous situons nos travaux essentiellement dans le champ de l' « Habitat Intelligent » sur des objectifs de gestion de l'énergie et de la sécurité, dans le prolongement de deux grands projets : ERGDOM et PROSAFE, conduit en coopération avec EDF-R&D depuis presque dix années. Au moment où nous avons lancé nos travaux, les principes de base de ces deux approches étaient en place et les premières expérimentations avaient permis de les valider. Notre tâche était donc de confronter ces concepts face à des situations plus complexes, au sens :

- de gérer l'intervention simultanée des nombreux actionneurs hétérogènes domotiques : climatisation, éclairages, volets roulants, convecteurs, ventilation,
- d'étendre la surveillance des personnes âgées à domicile, au-delà de la pièce unique, vers une surveillance en appartement.

Pratiquement, cette tâche comportait deux grands volets :

- celui de valider et d'améliorer les concepts initiaux dans des environnements plus complexes et plus exigeants,
- celui de mettre en place les méthodes et les outils qui permettront demain de faire les « extensions de complexité » de manière plus rapide et plus efficace avec la volonté de proposer des évolutions qui s'intègrent bien dans le panorama de la Recherche et du Développement rationnel en cette matière.

Nous avons, dans nos travaux, associé recherche méthodologique et expérimentation. Sur le plan méthodologique, nous proposons une méthode de conception descendante partant d'un cahier des charges détaillé duquel sont identifiées toutes les spécifications techniques du projet. Nous formalisons ces spécifications par les différentes représentations offertes par les formalismes UML et SYSML que nous transformons en une représentation HiLes (constituée de blocs, de canaux de communication et de réseaux de Petri) qui détermine la solution logique. Cette solution potentielle est dans sa logique « fonctionnelle » vérifiée par un outil TINA avant d'intégrer la dimension technologique qui définit la solution finale. L'application traitée ici est ERGDOM II pour la gestion du confort toutes saisons. La représentation de la Solution Physique s'effectue par un processus de partitionnement, toujours basé sur le formalisme SYSML, intégrant la dimension matérielle et permettant également une vérification formelle des propriétés et des performances estimées sous HiLes.

Sur les plans du développement technique et de l'expérimentation, nous proposons une évolution de l'algorithme de surveillance PROSAFE pour traiter la surveillance en appartement : nous introduisons de nouvelles variables de surveillance, au-delà de

l'agitation et de la détection de chute. Il s'agit de la vitesse de déplacement et de la distance effectuée par l'occupant mesurées à partir des capteurs de présence. L'intérêt marquant est que ces critères caractérisent fortement les capacités physiques de la personne et peuvent aussi aider au diagnostic médical.

Le détail des résultats a été présenté en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons proposé une revue détaillée des efforts consentis dans le monde pour illustrer le concept d'Habitat Intelligent. On montre que les technologies électroniques et de communication sont pour l'essentiel disponibles : ce sont les aspects systèmes qu'il convient de développer conformément aux attentes des utilisateurs en performances et en coût. Nous avons constaté dans le monde l'émergence de nombreux travaux et démonstrateurs cherchant à répondre aux trois principaux objectifs de la Domotique :

- la gestion du confort optimisée et économe en énergie, caractérisée par de nouveaux services alliant pour la plupart le multimédia, la commande automatisée de l'ambiance et des appareils domestiques, afin de faciliter l'activité quotidienne des occupants,
- la sécurité des personnes, caractérisée par la mise en œuvre de dispositifs assistifs et de détecteurs spécifiques, destinés à la surveillance de certains critères physiologiques souvent associés à des services de soins, ou à la surveillance des activités et la détection de dangers pour la plupart interconnectés à un centre de téléassistance,
- la sécurité des biens, caractérisée par la surveillance de l'environnement et des activités de l'occupant, dont notamment la détection d'intrusion, la détection d'incident, etc.

Les projets ERGDOM et PROSAFE sont introduits en fin de chapitre par une présentation des concepts de base : instrumentation de l'habitat par des capteurs de présence et modélisation des comportements habituels des occupants pour permettre une commande auto-adaptative de la gestion de l'énergie et pour détecter une anomalie de comportement qui témoignerait d'un danger. Les travaux antérieurs ont été validés antérieurement à la thèse par des campagnes de terrains sur sites : entre 1999 et 2001 pour mesurer l'efficacité et l'acceptabilité du système ERGDOM par les occupants, en 2002 pour valider la pertinence et les performances du système PROSAFE dans une surveillance de nuit des personnes âgées dépendantes. Il est rappelé ici la pertinence des approches mises en œuvre.

Le second chapitre est un chapitre méthodologique qui avec l'exemple de ERGDOM II, fait la proposition d'une démarche complète conduisant à l'établissement de la solution logique et de la solution physique, dans un contexte d'application des recommandations de l'EIA-632. Cette solution logique (logico-temporelle) est représentée dans le formalisme HiLes sous la forme de blocs structurels, de blocs fonctionnels et de Réseaux de Petri dont les propriétés dynamiques peuvent être vérifiées formellement par TINA. Elle résulte d'une succession de transformations des modèles UML/SYSML : diagramme de contexte, diagramme des cas d'utilisation, diagramme de séquences, diagrammes d'activité. Nous montrons dans le corps de thèse qu'il est

possible de transformer automatiquement les diagrammes d'activités SYSML en un modèle HiLes à partir de 14 règles appliquées sur les nœuds, les signaux et les structures. Nous montrons ensuite comment intégrer à la Solution Logique la dimension matérielle pour aboutir à une représentation de la Solution Physique. Celle-ci résulte d'une succession des diagrammes des blocs, des diagrammes d'activités et des diagrammes internes des blocs pour obtenir une description détaillée des composants, interfaces, fonctions, etc. nécessaire à la réalisation du produit final. La Solution Physique partitionnée et vue comme une activité SYSML intégrant les contraintes matérielles, peut être à nouveau vérifiée formellement par une transformation automatisée sous HiLes.

Cette approche paraît très attractive, et nécessite d'être complétée :

- par une modélisation plus précise de la gestion des données,
- par l'association d'une base de données,
- par une procédure « meet in the middle » (association des approches ascendantes et descendantes) pour définir la Solution Physique. Cette procédure doit s'appuyer sur une bibliothèque de fournitures, et réaliser l'association entre blocs fonctionnels et fournitures. Cette étape terminale est ici de complexité maîtrisable car les composants possibles restent en nombres limités,
- par une nouvelle étape permettant le passage de la conception à la réalisation afin d'expérimenter le système sur site réel ou par simulation.

Le troisième chapitre traite de l'algorithme de commandes assurant la gestion de l'ensemble avec un cahier des charges complet qui intègre la climatisation, la ventilation, l'éclairage et l'énergie solaire. Cet algorithme est un arbitrage qui s'appuie sur les règles résultant :

- des normes qui cadrent le périmètre d'utilisation des différents actionneurs,
- les objectifs de la commande en termes de critères de consommation d'énergie et de priorité accordées,
- la perception que l'utilisateur a du confort.

Notre proposition est de définir une modélisation de cette perception de manière à limiter la complexité de la commande et la ramener à un tableau de règles expertes : c'est notre proposition fondamentale. Au-delà de la logique de commande, nous chiffrons également les influences relatives des différentes sources d'énergie pour évaluer le niveau de priorité des règles proposées par rapport à l'ensemble des solutions de commandes possibles. Nous montrons, en particulier, en procédant par simulations physiques, la sensibilité vis à vis des questions liées d'une part, au rafraîchissement par ventilation et une gestion « intelligente » des occultants en période d'été, et d'autre part, au niveau d'inconfort limite provoqué dans le cas d'une gestion inadaptée des ressources énergétiques naturelles.

Les différents paramètres du confort qui ont été identifiés ouvrent des nouvelles perspectives d'enrichissement du modèle de confort par la gestion de : la luminosité, la vitesse de l'air, la lassitude sensorielle, etc. Le concept ERGDOM représenté par une grille logique de décisions modulaire peut dès lors être enrichi facilement de la

gestion de nouvelles sources renouvelables : puits canadiens, etc. Sur ce dernier point, il peut être intéressant d'intégrer de nouveaux modèles d'évaluations et de suivi des performances pour élargir la gamme des services proposés vers la gestion des consommations énergétiques, la maintenance, etc.

Le quatrième chapitre montre comment peuvent être étendus les concepts PRO-SAFE du niveau de la pièce unique au niveau de l'appartement. La modélisation des habitudes telle qu'elle était proposée antérieurement est apparue insuffisante pour la surveillance des personnes autonomes en appartement dont les habitudes de vie sont plus riches et plus complexes qu'en Institution. Nous proposons une nouvelle modélisation des habitudes de vie basée sur un découpage de l'appartement en zones privilégiées de surveillance. Un résultat important est que ce découpage peut être adapté aux habitudes des occupants en appartement par une procédure automatique de classification temporelle et locale. L'expérimentation a été conduite dans deux appartements dans une résidence foyer-logements pour personnes âgées à Orléans. La mise en place de l'expérimentation et l'exploitation de plusieurs mois de surveillance a permis :

- de tester et valider l'adéquation des détecteurs de présence « sans fil » conçus spécifiquement pour PROSAFE,
- de proposer de nouveaux critères d'activités en particulier la vitesse de déplacement et la distance parcourue par l'utilisateur,
- de prouver l'intérêt d'un suivi long terme, sur plusieurs mois, de la déviance de certains critères d'activités dont notamment le déclin constaté de la mobilité,
- d'augmenter la réactivité du système par une nouvelle méthode de détection d'incidents dont les seuils de détection sont plus proches de la réalité constatée, notamment pour la chute.

L'amélioration de la modélisation des habitudes par des caractéristiques comportementales, des habitudes temporelles et des sites de vie peut contribuer à augmenter la fiabilité des détections des incidents par une fusion multicritères des données.

Notre ambition était à l'origine d'étendre les possibilités de ERGDOM et PRO-SAFE pour la recherche performante dans les environnements plus complexes : actionneurs multiples pour ERGDOM, de la pièce unique à l'appartement pour PRO-SAFE. Cette première étape est franchie, même si des vérifications opérationnelles doivent encore être appliquées.

Notre ambition allait au-delà et voulait intégrer les deux services en une version intégrée de « Domotique Intelligente » pour bénéficier des éléments communs (matériels, méthodes, modèles, etc.) au travers d'une procédure d'intégration des deux services fédérateurs : confort et sécurité. Ce point reste encore ouvert : il reste un objectif de recherche amont rendu encore plus actuel avec les perspectives d'une intelligence ambiante basée sur les technologies de localisation de type RFID.

Cette intégration est nécessaire et irréversible pour ne pas multiplier les coûts : par exemple il est essentiel de partager les capteurs communs aux deux applications.

C'est la raison de l'attention que nous avons portée à cet aspect des choses. Sur ce point voici les recommandations pour une extension de nos travaux :

- revoir la réflexion générale sur la localisation des personnes qui est à la base de nos concepts de confort et de sécurité. Les systèmes de comptage de personnes et de localisation continue indoor/outdoor devraient bénéficier des larges développements dans le domaine des capteurs infrarouges (thermopiles, bolométriques) et des nouvelles technologies de communication RF, satellites, etc. associés à des méthodes d'apprentissages et des algorithmes avancés,
- approfondir la réflexion méthodologique et algorithmique pour réduire la complexité des représentations,
- dégager les outils CAO plus proches des opérations terrains.

BIBLIOGRAPHIE

- [Acce] <http://www.accessfrance.com/a.f/A.F.Sécurité/telealarme.htm>
- [Adam03] A. M. Adami, T. L. Hayes, M. Pavel, « *Unobtrusive monitoring of sleep patterns* » – in Proc. 25th Annual International Conference of the IEEE EMBS, 17-21 Sept. 2003, pp. 1360-1363, Cancun (Mexico)
- [Adla04] T. Adlam, R. Faulker, R. Orpwood, K. Jones, J. Macijauskiene, A. Budraitiene, « *The installation and support of internationally distributed equipment for people with dementia* » – IEEE Transaction on Information Technology in Biomedicine 8(3), 2004, pp. 253-257
- [Agei07] 5 Fév. 2007, <http://www.un.org/esa/socdev/ageing/agewpop1.htm>
- [Aiel06] M. Aiello, « *The role of Web services at home* » – in Proc. IEEE Intern. Conf. on Internet and Web Appli. and Serv., 2006, pp. 164-170
- [Alle96] B. Allen, « *An integrated approach to smart house technology for people with disabilities* » – Medical Engineering and Physics 18, 1996, pp. 203-206
- [Ando04] H. Andoh, K. Watanabe, T. Nakamura, I. Takasu, « *Network health monitoring system in the sleep* » – in Proc. SICE Annual Conference in Sapporo, 4 – 6 Aout 2004, pp. 1421-1424, Japon
- [Ash89] « *ASHRAE Fundamentals (chap. 24, 26, 27)* », 1989
- [Ashr04] « *ASHRAE. AINSI/ASHRAE Standard-62.1-2004 : Ventilation for acceptable indoor air quality* » – American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2004, Atlanta
- [Ashr92] « *ASHRAE. AINSI/ASHRAE Standard-55-92 : Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* » – American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1992, Atlanta
- [Bail97] N. Bailly, D. Estève, « *Brevet AVIS : « Procédé de gestion d'énergie auto-configurable pour l'habitat »* » – INPI n°9706870, EDF / CNRS, 4 Juin 1997
- [Bake85] J.E. Baker, « *Adaptive selection methods for genetic algorithms* » – In John J. Greffenstette, editor, Proceedings of the First International conference on Genetic Algorithms, 1985, pp. 101-111, Hillsdale
- [Bake87] J.E. Baker, « *Reducing Bias and Inefficiency in the Selection Algorithm* » – in Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms and their Application, 1987, pp. 14-21, Hillsdale
- [Barn98] N. M. Barnes, N. H. Edwards, D. A. D. Rose, P. Garner, « *Lifestyle monitoring technology for supported independence* » – Computing and Control Engineering Journal 9(4), 1998, pp. 169-174
- [Baue00] K. A. Bauer, « *The ethical and social dimensions of home-based telemedicine* » – Critical Reviews in Biomedical Engineering, 28(3&4), 2000, pp. 541-544
- [Bena04] F. Benard, N. Bailly, D. Estève, E. Campo, « *Capteur de présence bi-fonctionnel, système et procédé de gestion mettant en œuvre de tels capteurs* » – Brevet n°EP1482464A1 et n°FR2855641, EDF-R&D/LAAS-CNRS, 1 Déc. 2004, 17p.
- [Bonh06] S. Bonhomme, E. Campo, D. Esteve, M. Chan, « *Conception d'un dispositif de capteurs dédié au comptage des personnes dans un habitat* » – Rapport LAAS No06643 - Contrat EDF, Mars 2006, 66p.
- [Broo97] R. A. Brooks « *The intelligent room project: Cognitive technology* » – in Proc. 2nd Int. Cognitive Technology Conf. Aizu Wakamatsu, 1997, pp. 271-278, Japon
-

- [Brow01] S. J. Brownsell, D. A. Bradley, R. Bragg, P. Catling, J. Carlier, « *An attributable cost model for a telecare system using advanced community alarms* » – Journal of Telemedicine and Telecare, 7, 2001, pp. 63-72
- [Brum02] B. Brumitt, B. Meyers, J. Krumm, A. Kern, S. Shafer, « *EasyLiving: Technologies for intelligent environments* » – Handheld and Ubiquitous Computing, Sept. 2000
- [Camp02] E. Campo, M. Chan, C. Escriba, S. Bonhomme, and D. Estève, « *Real-Time Monitoring of elderly people to detect abnormal behaviour* » – Actes de 18th National Conference on Artificial Intelligence, Workshop on Automation as Caregiver: The Role of Intelligent Technology in Elder Care, AAAI 2002, 29 Jul. 2002, pp. 8-12, Edmonton – Canada
- [Camp03a] E. Campo, J.P. Scotto Di Rinaldi, D. Estève, N. Bailly, F. Benard, « *Développement d'une nouvelle génération de gestionnaire d'énergie auto-configurable pour l'habitat : le concept ERGDOM* » – Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, ISSN: 1270-9840, n°2, pp. 43-49, Août 2003
- [Camp04] E. Campo, M. Chan, « *Diagnostic system based on learning habits in high-risk situations for the elderly* » – in Proc. 10th Intern. Conf. on Information Systems Analysis and Synthesis, 2004, pp. 364-368, Orlando, USA
- [Camp08] E. Campo, M. Chan, C. Escriba, S. Bonhomme, and D. Estève, « *Intégration multifonctionnelle pour un habitat intelligent : Apport des STIC au maintien à domicile* » – Revue française d'informatique TSI, Ed. Lavoisier, Paris, 2008
- [Candas] V. Candas, « *Confort Thermique* » – (BE 9085), www.techniques-ingenieur.fr
- [Cell94] B. G. Celler, T. Hesketh, W. Earnshaw, E. Ilsar, « *An instrumentation system for the remote monitoring of changes in functional health status of the elderly at home* » – in Proc International Conference IEEE-EMBS, 1994, pp. 908-909, New York
- [Cell95] B. G. Celler, W. Earnshaw, E. D. Ilsar, L. Betbeder-Matibet, M. F. Harris, R. Clark, T. Hesketh, N. H. Lovell, « *Remote monitoring of health status of the elderly at home. A multidisciplinary project on aging at the University of New South Wales* » – International Journal of Bio-Medical Computing 40, 1995, pp. 147-155
- [Chan] M. Chan, D. Estève, C. Escriba, E. Campo, « *Technologies for the elderly at home: home automation and smart home to support elderly independent living* », Computer Methods & Programs in Biomedicine, accepted for publication.
- [Chan02] M. Chan, E. Campo, E. Laval, and D. Estève, « *Validation of a remote monitoring system for the elderly : application to mobility measurements* » – Technology and Health Care, vol. 10(5), 2002, pp. 391-399
- [Chan03] M. Chan, E. Campo, D. Estève, « *PROSAFE, a multisensory remote monitoring system for the elderly or the handicapped* » – in Independent Living for Persons with Disabilities and Elderly People, IOS Press, 1st International Conference On Smart homes and health Telematics (ICOST'2003), Sept. 24 – 26, 2003, pp. 89-95, Paris – France
- [Chan04] M. Chan, E. Campo D. Esteve, « *L'apprentissage des pratiques et des habitudes de vie, une clef de l'automatisation domotique* » – Revue « Signaux », 2004
- [Chan04] M. Chan, E. Campo, D. Estève, « *Classification of elderly repetitive trajectories for an automatic behaviour monitoring system* » – in Proc. Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering “Health in the Information Society” (MEDICON 2004), 31 Jul.– 5 Aout, 2004, 4p, Naples –Italie
- [Chan05] M. Chan, E. Campo, D. Estève, « *Assessment of activity of elderly people using a home monitoring system* » – International Journal of Rehabilitation Research 28(1), 2005, pp. 69-76
- [Chan06] M. Chan, D. Estève, C. Escriba, E. Campo, « *Technologies for the elderly at home: home automation and smart home to support elderly independent living* » – Computer Methods & Programs in Biomedicine, 2006
- [Chan08] M.Chan, D.Estève, C.Escriba, E.Campo, « *A review of smart homes—Present state and future challenges* » – Elsevier, Computer methods and programs in biomedicine, 3 Fév. 2008

-
- [Chan95] M. Chan, C. Hariton, P. Ringear, E. Campo, « *Smart house automation system for the elderly and the disabled* » – in Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 2, 1995, pp. 1586-1589
- [Chan99] M. Chan, H. Bocquet, E. Campo, T. Val, J. Pous, « *Alarm communication network to help carers of the elderly for safety purposes: a survey of a project* » – International Journal of Rehabilitation Research 22(2), 1999, pp. 131-136
- [Char03] K.Charles, J.T. Reardon, R.J. Magee, « *Qualité de l'air intérieur et confort thermique dans les bureaux à aire ouverte* » – CNRC-NRC, Déc. 2003, <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/ctus/ctu60f.pdf>
- [Cherr96] A. D. Cherry, P. A. Cudd, M. S. Hawley, « *Providing rehabilitation integrated systems using existing rehabilitation technology* » – Medical Engineering and Physics 18, 1996, pp. 187-192
- [Como07] 16 Nov. 2007, <http://www.comodalarm.com>
- [Coop96] M. Cooper, D. Keating, « *Implications of the emerging home systems technologies for rehabilitation* » – Medical Engineering and Physics 18, 1996, pp. 176-180
- [Corn02] A. Cornuéjols, L. Miclet, « *Apprentissage Artificiel* » – Eyrolles. Isbn :2-212-11020-0, Aout 2002
- [Cost86] « *COSTIC - Le calcul simplifié des charges de climatisation : les conditions de base* » – Promoclim, Fév. 1986
- [Coul99] C. Coulon, J. M. Grégoire, P. Simon, K. S. Ang, « *Télésurveillance en hémodialyse* » – Etude préliminaire, RBM News 21, 1999, pp. 84-92
- [Cour05] « *Création d'emploi : le marché des services à la personne* » – in Le Nouveau Courrier, Chambre de Commerce et d'Industrie de Paris. n° 127, Juil.-Août 2005
- [Das02] S. K. Das, D. J. Cook, A. Bhattacharya, E. O. Heierman, T. Y. Lin « *The role of prediction algorithm in the MavHome smart home architecture,* » – IEEE Wireless Communications 9, 2002, pp. 77-84
- [Deaf07] 21 Aout 2007, http://www.deafblindinternational.org/standard/review1_h.htm
- [Demi06] G. Demiris, D. P. Oliver, K. L. Courtney, « *Ethical considerations for the utilization of telehealth technologies in home and hospice care by the nursing profession* » – Nursing Administration Quarterly, 30(1), 2006, pp. 56-66
- [Demi07] G. Demiris, D. P. Oliver, K. L. Courtney, « *Electronic home healthcare: concepts and challenges* » – International Journal of Electronic Healthcare 1, 2007, pp. 4-16
- [Dieg05] O. Diegel, « *Intelligent automated health systems for compliance monitoring,* » – Proc. IEEE Region 10 TENCON, Nov. 2005, pp. 1-6
- [EIA99] « *EIA-632 – Processes for Engineering a System* » – Electronic Industries Alliance, Janv. 1999
- [Edf06] 25 Sept. 2006, <http://etrebienchezsoi.edf.fr>
- [Edf06a] F. Benard, N. Bailly, D. Estève, E. Campo, « *Système expert ERGDOM toutes saisons pour assistance à l'occupant dans la gestion de son confort en toutes saisons : définition des simulations et choix de l'architecture matérielle dans les logements* » – Rapport EDF-R&D CRE/13/06/015/1,
- [Edf06b] F. Benard, N. Bailly, D. Estève, E. Campo, « *Extension d'ERGDOM : système expert pour assistance à l'occupant dans la gestion de son confort en toutes saisons* » – Rapport EDF-R&D CRE13/06/009,
- [Elge98] G. Elger, B. Furugren, « *SmartBO an ICT and computer based demonstration home for disabled* » – in Improving the Quality of Life for the European Citizen, Technology for Inclusive Design and Equality Assistive Technology Research Series, IOS Press, vol. 4, 1998, pp. 392-395
- [Elit07] 28 Mars 2007, <http://www.elite-care.com>
-

- [Escr05] C. Escriba, « *Conception, Réalisation et Caractérisation de capteurs infrarouges à thermopiles : Application à la détection de présence passive dans l'habitat* » – Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2005.
- [Eso] <http://www.essonne.fr>
- [Este07] Jeff A. Estefan, « *Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies* » – Technical report, INCOSE MBSE Focus Group, 25 Mai 2007,
- [Este87] D. Estève, « *Questionnement sur l'organisation de la recherche et de l'action de terrain dans le développement des soins à domicile* » – in Rapport LAAS, Mars 1987,
- [Este97] D. Estève, « *Conclusions de la commission d'experts "Habitat Intelligent"* » – CNRS-SPI, Développement des Soins à Domicile, Mars 1997
- [Eyse01] G. Eysenbach, « *What is e-health* » – Journal of Medical Internet Research 3, 2001
- [Fiol03a] E. Fiolleau, M. Chan, E. Campo, D. Estève, « *Procédé autonome de détection de situations anormales encourues par des individus* » – Brevet n°FR2828317, EDF-CNRS, 07 Fév. 2003
- [Fiol03b] E. Fiolleau, M. Chan, E. Campo, and D. Estève, « *Emergency detection alarm for elderly compares sensor activity with learned* » – FR Patent 2828317, International classification G08B21/04; G08B21/00; (IPC1-7): G08B21/04, 7 Fév. 2003
- [Forr85] S. Forrest, « *Documentation for PRISONERS DILEMMA and NORMS Programs that use the Genetic Algorithm* » – Unpublished manuscript, 1985, University of Michigan
- [Ftel07] 16 Nov. 2007,
http://www.agence.francetelecom.com/vf/tel_maison/pages_statiques/visiophonie/fp.php
- [Gerh] GERHOME - CSTB, <http://gerhome.cstb.fr/index.php?id=38>
- [Gold94] D.E. Goldberg, « *Algorithmes génétiques* » – Addison-Wesley, 1994, Paris (France),
- [Guer94] P. Guerette, E. Sumi, « *Integrating control of multiple assistive devices* » – Revue Assistive Technology 6, 1994, pp. 67-76
- [Guil02] S. Guillén, M. T. Arredondo, V. Traver, J. M. García, C. Fernández, « *Multimedia telehomecare system using standard TV set* » – IEEE Transactions on Biomedical Engineering 49(12), 2002, pp. 1431-1437
- [Guil07] D. Guihal, « *Modélisation en langage VHDL-AMS des systèmes pluridisciplinaires* » – Rapport LAAS n°07250 Doctorat, Université Paul-Sabatier, 25 mai 2007, Toulouse (France)
- [Gurl] Gurley, R. J., N. Lum, M. Sande, B. Lo et M. H. Katz, « *Persons found in their homes helpless or dead* » – N Engl J Med 334(26), pp. 1710-6, Technical University Saint-Petersburg
- [Ha06] K. N. Ha, K. C. Lee, S. Lee, « *Development of PIR sensor based indoor detection system for smart home* » – in Proc. SICE-ICASE International Joint Conference, 18 – 21 Oct. 2006, pp. 2162-2167, Bexco, Busan, Corée,
- [Hage01] I. Hagen, T. Holthe, P. Duff, S. Cahill, J. Gilliard, R. Orpwood, P. Topo, B. Bjorbe, « *Can assistive technology enable people with dementia?* » – In Assistive Technology-Added Value to the Quality of Life, IOS Press, 2001, pp. 42-47
- [Hamo05] J-C. Hamon, « *Méthodes et outils de la conception amont pour les systèmes et les microsystèmes* » – Rapport LAAS n°05064. Doctorat, Institut National Polytechnique, 1er fév. 2005, Toulouse (France)
- [Handic] M. Mokhtari, « *Global Village initiative* » – HANDICOM Lab., GET/INT
- [Hane97] U.D. Hanebeck, C. Fischer, and G. Schmidt, « *ROMAN: a mobile robotic assistant for indoor service applications* » – in Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol. 2, Issue, 1997, pp. 518-525
- [Harr00] T. L. Harrington, W. J. M. Heys, K. G. Koster, J. Westra, « *Housing, in Gerontechnology Why and How* » – T. L. Harrington, M. K. Harrington, ed Herman Bouma Foundation for Gerontechnology Eindhoven, 2000, Pays-Bas

-
- [Hela03] S. Helal, B. Winkler, C. Lee, Y. Kaddoura, L. Ran, C. Giraldo, S. Kuchibhotla, W. Mann, « *Enabling location-aware pervasive computing applications for the elderly* » – in Proc. IEEE 1st Conf PerCom'03, 2003
- [Hela05] S. Helal, W. Mann, H. El-Zabadani, J. King, Y. Kaddoura, E. Jansen, « *The Gator Tech Smart House: a programmable pervasive space* » – Computer 38, 2005, pp. 50-60
- [Hiles] « *HiLes Designer (TOOLSYS)* » – LAAS-CNRS, <http://www.laas.fr/toolsys/hiles.htm>
- [Holl75] J-H. Holland, « *Adaptation in Natural and Artificial Systems* » – Ann Arbor, 1975, University of Michigan Press
- [Holl98] J-H. Holland, C. Langton, S.W. Wilson « *GENETIC Programming : on the programming by means of natural selection* » – A Bradford Book, 1998, Massachusetts Institute of Technology, MIT Press, ISBN : 0-262-111170-5
- [Humi04] « *Le facteur Humidex* » – Service météorologique de Canada, 2004, http://www.qc.ec.gc.ca/Meteo/Documentation/Humidex_fr.html
- [Inri] <http://www.inria.fr/presse/themes/standardisation/standardisation.fr.html#protocoles>
- [Inse07] 5 Fév. 2007, <http://www.insee.fr>
- [Inte] <http://www.intellon.com>
- [Inti02] S. S. Intille, « *Designing a home of the future* » – IEEE Pervasive Computing 1, 2002, pp. 76-82
- [Iso94] « *Ambiances thermiques modérées – Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique* » – ISO 7730, 1994
- [Iso95] « *Evaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelle de jugements subjectifs* » – ISO 10551. Ergonomie des ambiances thermiques, 1995
- [Isod04] Y. Isoda, S. Kurakake, H. Nakano, « *Ubiquitous sensors based human behavior modeling and recognition using a spatio-temporal representation of user states* » – in Proc. 18th International Conference on Advanced Information Networking and Application (AINA'04), 2004
- [Jong75] K.A. De Jong, « *An analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptative Systems* » – Unpublished Ph.D. Thesis, 1975, University of Michigan
- [Kidd99] C. D. Kidd, R. J. Orr, G. D. Abowd, C. G. Atkeson, I. A. Essa, B. MacIntyre, E. Mynatt, T. E. Starner, W. Newstetter, « *The Aware Home: A living laboratory for ubiquitous computing research* » – in Proc. 2nd International Workshop on Cooperative buildings (CoBuild'99), 1999, pp. 3-10
- [Kobr03] C. Kobryn, E. Samuelsson, « *Driving Architectures with UML 2.0, the TAU Generation2 Approach to model Driven Architecture* », Telelogic, 1 Aout, 2003,
- [Korh98] I. Korhonen, R. Lappalainen, T. Tuomisto, T. Kööbi, V. Pentikäinen, M. Tuomisto, V. Turjanmaa, « *TERVA : wellness monitoring system* » – in Proc. 20th Annual International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, vol. 20(4), 1998, pp. 1988-1991
- [Krum00] J. Krumm, S. Harris, B. Meyers, B. Brumitt, M. Hale, S. Shafer, « *Multi-camera multi-person tracking for EasyLiving* » – in Proc. 3rd IEEE Int. Workshop on Visual Surveillance, 2000
- [Lebe06] G. LeBellego, N. Noury, G. Virone, M. Mousseau, J. Demongeot, « *A model for the measurement of patient activity in a hospital hints* » – IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine 10(1), 2006, pp. 92-99
- [Less99] V. Lesser, M. Atighetchi, B. Benyo, B. Horling, A. Raja, R. Vincent, T. Wagner, P. Xuan, S. X. Q. Zhang, « *The intelligent home testbed* » – in Proc. Autonomy Control Software Workshop, Janv. 1999, 8p.
- [Levi90] P. Levine, J.C. Pomerol, « *Systèmes interactifs d'aide à la décision et systèmes experts* » – Hermes. Isbn : 2-86601-188-0, 1990
-

- [Lin02] Y. L. Lin, H. A. Latchman, and M. Lee, « *A power line communication network infrastructure for the smart home* » – IEEE Wireless Communication, Déc. 2002, pp.104-111
- [Lore04] S. Lorente, « *Key issues regarding domotic applications* » – in Proc. International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, Avr. 19 – 23, 2004, pp. 121-122
- [Ma05] T. Ma, Y. D. Kim, Q. Ma, M. Tang, W. Zhou, « *Context-aware implementation based on CBR for smart home* » – in Proc. International Conference on Wireless and Mobile Computing Networking and Communications (WMOB'2005), Aout 2005, pp. 112-115
- [Mahe07] M. M. Maheu, A. Allen,, 20 Aou. 2007, <http://telehealth.net/glossary.html>
- [Malg05] H. Malgouyres, J.P. Seuma Vidal, G. Motet « *UML 2.0, consistency rules identification* » – In SERP'05 - The International Conference on Software Engineering Research and Practice. CSREA Press, 2005
- [Mats04] K. Matsuoaka, « *Aware home understanding life activities* » – in Proc. Int. Conf. ICOST'2004, Towards a Human-Friendly Assistive Environment, IOS Press, 2004, pp. 186-193
- [Maur05] R. Maurice « *Contribution à la méthodologie de conception système : application à la réalisation d'un microsystème multicapteurs communicant pour le génie civil.* » – Rapport LAAS n°05646 Doctorat, Institut National Polytechnique, 15 déc. 2005, Toulouse (France)
- [Mich] P. Michel, « *Conduite des systèmes climatiques* » – Chaîne de régulation (BE 9420), www.techniques-ingenieur.fr
- [Miha04] A. Mihailidis, B. Carmichael, J. Boger, « *The use of computer vision in an intelligent environment to support aging-in-place, safety, and independence in the home* » – IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine 8, 2004, pp. 238-247
- [Mill90] Millet, « *Convention pour la conception thermique d'été de l'habitat en climatisation naturelle* » – CSTB, 1990
- [Moor99] M. Moore, « *The evolution of telemedicine* » – Future Generation Computer Systems 15, 1999, pp. 245-254
- [Moze98] M. C. Mozer « *The neural network house: an environment that's adapts to its inhabitants* » – in Proc. of the AAAI Spring Symposium on Intelligent Environments, Technical Report SS-98-02, AAAI Press, Menlo Park, CA, 1998, pp. 110-114
- [Nisb96] P. Nisbet, « *Integrating assistive technologies: current practices and future possibilities* » – Medical Engineering and Physics 18, 1996, pp. 193-202
- [Nish00] Y. Nishida, T. Hori, T. Suehiro, S. Hirai, « *Sensorized environment for self-communication based on observation of daily human behavior* » – in Proc. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2000, pp. 1364-1372
- [Nogu02] H. Noguchi, T. Mori, T. Sato, « *Construction of network system and the first step of summarization for human daily action in the sensing room* » – in Proc. IEEE Workshop on Knowledge Media Networking (KMN'02), 2002
- [Nour01] N. Noury, V. Rialle, G. Virone, « *The telemedicine home care station : a model and some technical lusits* » – in Proc. Healthcom, June 2001, L'Aquila (Italie), pp.37-40
- [Nour05] N. Noury et al., « *AILISA : plateformes d'évaluations pour des technologies de télésurveillance médicale et d'assistance en gérontologie* » – Journal Gérontologie et Société, n°113, 2005, p.97-119
- [Orpw01] R. Orpwood, T. Adlam, C. Gibbs, « *User-centred design of support devices for people with dementia for use in smart house* » – in Assistive Technology-Added Value to the Quality of Life, IOS Press, 2001, pp. 314-318
- [Park03] K.H. Park, Z.Z. Bien, « *Intelligent sweet home for assisting the elderly and the handicapped* » – in Proceedings of the 1st International Conference On Smart homes and health Telematics (ICOST'2003), Independent Living for Persons with Disabilities and Elderly People, IOS Press, 2003, pp.151–158

-
- [Park07] Park and all, « *Robotic smart house to assist people with movement disabilities* » – *Autonom. Robot.* 22 (2), 2007, pp. 183–198
- [Perr04] M. Perry, A. Dowdall, L. Lines, K. Hone, « *Multimodal and ubiquitous computing systems : Supporting independent-living older users* » – *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 8(3), 2004, pp. 258-270
- [Peti03] C.Petit, E. Sierkierski, T. Lageat « *Du confort thermique à la caractérisation sensorielle des ambiances* » – EDF-R&D, 2003
- [Pros03] « *PROSAFE project: Système complet de surveillance de personnes âgées* » – RNTS - Réseau National Technologies pour la Santé, 2003, France
- [Pros05a] E. Campo, M. Chan, D. Esteve, S. Bonhomme, C. Escriba, « *PROSAFE : Un Système Complet de Surveillance des Personnes* », *RNTS 2003-2005, n° subvention 03B386*.
- [Pros05b] « *Expérimentation d'une nouvelle technologie au service du 3^{ième} âge* » – La république du centre, 16 Déc. 2005, Orléans
- [Rama] Ramarosan, H., C. Helmer, P. Barberger-Gateau, L. Letenneur et J. F. Dartigues, « *Prevalence of dementia and Alzheimer's disease among subjects aged 75 years or over: updated results of the PAQUID cohort* » – *Rev Neurol* 159(4), pp. 405-11, Paris
- [Rant05] M. J. Rantz, K. D. Marek, M. Aud, H. W. Tyrer, M. Skubic, G. Demiris, A. Hussam, « *A technology and nursing collaboration to help older adults age in place* » – *Nursing Outlook* 53, 2005, pp. 40-45
- [Rial01] V. Rialle, N. Noury, J. Fay, M. Chan, E. Campo, L. Bajolle, and J. P. Thomesse, « *Health "smart" home information systems: concepts and illustrations* » – in *Proc. 3rd International Workshop on Enterprise Networking and Computing in Health Care Industry (Healthcom 2001)*, 29 Juin.-1 Jul 2001, 5p., Aquila – Italy
- [Ried05] D. E. Riedel, S. Venkatesh, W. Liu, « *Spatial activity recognition in a smart home environment using a chemotactic model* » – *Proc. International Conference on Intelligent Sensors Networks and Information Processing*, 5 – 8 Déc. 2005, pp. 301-306
- [Ripp02] H. Rippen, « *A. Risk, e-Health ethics draft code* » – *Journal of Medical Internet research*, 2(1), 2002
- [Robo06] Robosoft, « *Projet RoboDOMO* » – Master MBDS, Université Nice Sophia Antipolis, 2006
- [Romi84] B. Romich, « *Expressive communication, computer access, mobility and environmental control in an integrated package* » – *Proc. 2nd International Conference on Rehabilitation Engineering*, 1984, pp. 43-44, Ottawa, Canada
- [Scot01] J.P. Scotto Di Rinaldi, « *ERGDOM – Documentation technique du logiciel pour le prototype Delta-Dore* » – LAAS-CNRS - EDF-R&D, 2001
- [Sess] <http://www.industrie.gouv.fr/sessi>
- [Shis95] R. Shishko, R.G. Chamberlain, « *Nasa systems engineering handbook. Technical Report SP-610S* » – NASA Center for AeroSpace Information, Juin 1995, <http://snebulos.mit.edu/projects/reference/NASA-Generic/NASA-SP-610S>
- [Soge] <http://www.sogetel.org/teleassistance.htm>
- [Sprin98] « *Home TeleHealth Systems: A Guide for Home Care Providers* » – Home Care Management Associates Ltd., Springfield, PA, 1998
- [Stau91] H. B. Stauffer, « *Smart enabling system for home automation* » – *IEEE Trans. on Cons. Electron.* 37, 1991, pp. 29-35
- [Sysml06] « *Systems Modeling Language* » – OMG-SysML, 6 Mai 2006, <http://www.omgsysml.org>
- [Tamu98] T. Tamura, T. Togawa, M. Ogawa, M. Yoda, « *Fully automated health monitoring system in the home* » – *Medical Engineering and Physics* 20, 1998, pp. 573-579
- [Tang00] P. Tang, T. Venables, « *Smart' homes and telecare for independent living* » – *Journal of Telemedicine and Telecare* 6, 2000, pp. 8-14
-

- [Tapi04] E. M. Tapia, S. S. Intille, K. Larson, « *Voice controlled smart house* » – in Proc. IEEE Int. Conf. Consumer Electronics, Rosemont, IL, A. Ferscha and F. Mattern, Eds. Berlin Heideberg: Springer-Verlag, 2004, pp. 158-175
- [Thom01] J. P. Thomesse, D. Bellot, A. Boyer, E. Campo, M. Chan, F. Charpillet, J. Fayn, C. Leschi, N. Noury, V. Rialle, L. Romary, P. Rubel, N. Selmaoui, F. Steenkeste, and G. Virone, « *Integrated information technologies for patients remote follow-up and homecare* » – in Proc. 3rd International Workshop on Enterprise Networking and Computing in Health Care Industry (Healthcom 2001), 29 Juin.-1Juil 2001, pp. 3-15, Aquila - Italy
- [Thom93] B. Thomé, « *Systems engineering : principles and practice of computer-based systems engineering* » – John Wiley and Sons Ltd., 1993, Chichester, UK
- [Timg] TIMC - IMAG, <http://www.-timg.imag.fr>
- [TINA] « *TINA - Time petri Net Analyzer* » – LAAS-CNRS OLC., <http://www.laas.fr/TINA>
- [Tuom06] M. T. Tuomisto, T. Terho, I. Korhonen, R. Lappalainen, T. Tuomisto, P. Laippala, V. Turjanmaa, « *Diurnal and weekly rhythms of health-related variables in home recordings for two months* » – Physiology & Behavior 87, 2006, pp. 650-658
- [Uml07] « *Unified Modeling Language* » – OMG-UML2.1, 4 Oct. 2007, <http://www.omg.org/spec/UML/2.1.2>
- [Verm97] C. Vermeulen, A. Van Berlo, « *A model house as platform for information exchange on housing* » – in Gerontechnology, a Sustainable Investment of the Future, IOS Press, 1997, pp. 337-339
- [Vhdl] « *1076.1-1999, IEEE Standard VHDL-AMS Analog and Mixed-Signal Extensions – Language Reference Manual* » – IEEE Press, ISBN : 0-7381-1640-8,
- [Viro02] G. Virone, N. Noury, J. Demongeot, « *A system for automatic measurement of circadian activity deviations in telemedicine* » – IEEE Transactions on Biomedical Engineering 49(12), 2002, pp. 1463-1469
- [Weib51] Weibull, « *A statistical distribution function of wide applicability* » – J. Appl. Mech.-Trans. ASME 18(3), 1951, pp. 293-297
- [Will98] G. West, S. Greehill, S. Venkatesh, « *A probabilistic approach to the anxious home for activity monitoring* » – Proc. 29th Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC'05), 2005
- [Wiki07] « *Wikipedia* », 2007, <http://fr.wikipedia.org/wiki>
- [Will98] G. Williams, K. Doughty, D. A. Bradley, « *A systems approach to achieving CarerNet-An integrated and intelligent telecare system* » – IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine 2(1), 1998, pp. 1-9
- [Yama06] T. Yamazaki, « *Beyond the smart home* » – in Proc. International Conference on Hybrid Information Technology (ICHIT'06), 2006, pp. 350-355
- [Yama98] A. Yamaguchi, M. Ogawa, T. Tamura, T. Togawa, « *Monitoring behavior in the home using positioning sensors* » – in Proc. 20th Annual International Conference IEEE Engineering in Medicine and Biology Society 20, 1998, pp. 1977-1979
- [Yerr93] C. Yerrapragada, P. S. Fisher, « *Voice controlled smart house* » – in Proc. IEEE Int. Conf. Consumer Electronics, Rosemont, IL, 1993, pp. 154-155

ANNEXES

| | | |
|------------|---|------------|
| A | EXIGENCES DU CAHIER DES CHARGES..... | 194 |
| B | DESCRIPTION DES CAS D'UTILISATION | 196 |
| B.1 | CAS D'UTILISATION : CONSULTER INFORMATIONS - LES CONSEILS DE GESTION DES OCCULTANTS..... | 196 |
| B.2 | CAS D'UTILISATION : MODIFIER CONSIGNES | 197 |
| B.3 | CAS D'UTILISATION : MODELISER LE CONFORT | 199 |
| B.4 | CAS D'UTILISATION : GERER CONFORT | 199 |
| C | SOLUTION LOGIQUE AVEC GESTION DES DONNEES | 202 |
| C.1 | DIAGRAMMES DES SEQUENCES | 202 |
| C.2 | DIAGRAMMES D'ACTIVITES | 204 |
| C.3 | LE MODELE HiLES | 209 |
| D | MODELISATION THERMIQUE D'UN LOGEMENT | 213 |
| D.1 | ENVIRONNEMENT DE SIMULATION | 213 |
| D.2 | CARACTERISTIQUES DU MODELE | 214 |
| D.3 | MODELE MOZART CLIM2000..... | 214 |
| D.4 | CAPACITE FRIGORIFIQUE DU « FREE COOLING »..... | 217 |
| D.5 | CAPACITE CALORIFIQUE DU RAYONNEMENT SOLAIRE | 218 |
| E | DESCRIPTION DES ECHELLES DE JUGEMENTS..... | 219 |

A Exigences du cahier des charges

L'analyse du cahier des charges [3,4] consiste, dans cette section, à extraire et référencer les exigences fonctionnelles, matérielles et conceptuelles.

| Exigences Fonctionnelles | | | |
|--------------------------|--|-------|-----------------------|
| Réf. | Exigence | Objet | Description détaillée |
| E1 | Gérer le confort d'été | | |
| E2 | Mettre en place des scénarios de pilotage des occultants, de la ventilation et des générateurs de froid | | |

| Exigences Matérielles | | | |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---|
| Réf. | Exigence | Objet | Description détaillée |
| E3 | Architecture matérielle | Station météo | Contient un capteur de température et de rayonnement + ADR... |
| E3.1 | | | La sonde météo mesurant T°ext doit être à l'ombre |
| E4 | | UC | Acquisition météo |
| E4.1 | | | Communication AVIS |
| E4.2 | | | Pilotage appareils : |
| E4.3 | | | • vmc |
| E4.4 | | | • volets |
| E4.5 | | | • chauffage |
| E4.6 | | | • climatisation |
| E5 | | AVIS | Conseils (gestion des occultants), |
| E5.1 | | | Acquisition (T°int, présence, ADR...) |
| E5.2 | | | Afficher Températures (int et ext) |
| E5.3 | | | Acquérir niveau d'inconfort |
| E5.4 | | | |
| E5.5 | | | La borne avis est placée dans chaque pièce |
| E6 | | Climatisation | Prendre en compte 2 architectures matérielles : |
| E6.1 | | | • climatisation |
| E6.2 | | | • multi-split |
| E7 | | Volets roulant | |
| E8 | | Ventilation | |
| E9 | | Chauffage | |

| Exigences de Conception | | | |
|--------------------------------|--|-----------------------------------|---|
| <i>Réf.</i> | <i>Exigence</i> | <i>Objet</i> | <i>Description détaillée</i> |
| E10 | Utiliser le concept d'apprentissage | Concept ERG-DOM | Le concept ERGDOM exploite 3 modèles pour gérer le confort : un modèle de présence, un modèle thermique et un modèle des préférences de l'utilisateur. Ces modèles sont construits à partir de techniques d'apprentissage. |
| E11 | Algorithme de pilotage | Chauffage et climatisation | Réaliser un décalage des consignes en fonctions de la température extérieure T_{ext} . |
| E11.1 | | | Lors de l'occupation du logement en demi-saison, l'algorithme pilote, soit le chauffage, soit le refroidissement, dans la plage située à $\pm 2^{\circ}C$ autour de la température de non-chauffage du bâtiment. |
| E11.2 | | | Lorsque l'on est en mode chauffage, le mode refroidissement ne doit s'enclencher que lorsque la température extérieure est dépassée de $2^{\circ}C$ la température de non-chauffage. D'une manière homologuée en mode refroidissement le mode chauffage pourra être enclenché lorsque la température extérieure descend de $2^{\circ}C$ en dessous de la température de non-chauffage. Le mode chauffage est enclenché lorsque la température d'air extérieur est élevée et qu'elle redescend $2^{\circ}C$ en dessous de la température de non-chauffage du logement. |
| E12 | | Occultants | Pour l'action des occultants, l'algorithme doit avoir une action anticipative sur la remontée en température du logement provoquée par l'ensoleillement. |
| E12.1 | | | L'orientation géographique du logement, le niveau d'ensoleillement, l'orientation du logement et la luminosité sont des paramètres déterminants pour la gestion des volets roulants. |
| E13 | | Ventilation | L'algorithme de pilotage doit prendre en compte de l'écart de température entre la température extérieure et la température intérieure pour passer ou non la ventilation en mode grande vitesse la nuit. |

B Description des cas d'utilisation

B.1 Cas d'utilisation : Consulter informations - les conseils de gestion des occultants

B.1.1. Identification

| | | | |
|-------------------------|--|----------------------------|--|
| Titre | Consulter informations – les conseils de gestion des occultants | | |
| But | Informier l'usager des manœuvres à effectuer sur les ouvrants afin d'assurer son confort. | | |
| Résumé | L'usager lit (sur la borne AVIS) la manœuvre à effectuer sur les ouvrants puis procède à l'ouverture ou la fermeture de ceux-ci. | | |
| Acteurs | Usager (principal) | | |
| Date de création | | Date de mise à jour | |
| Version | | Responsable | |

B.1.2. Description des scénarios

Pré-conditions

- 1 - Les occultants ne peuvent pas être commandés par le système.
- 2 - L'usager doit être présent dans l'appartement.

Scénario nominal :

Le cas d'utilisation commence lorsque l'ouverture des volets doit être changée manuellement.

Enchaînement (a) Lire le message

L'usager visualise le message sur la fenêtre d'affichage du boîtier AVIS dans la pièce où il se trouve.

Le message contient l'identifiant de la fenêtre considérée, l'angle d'ouverture ainsi que l'heure de l'action à effectuer.

Si l'usager ne souhaite pas suivre le conseil alors il faut exécuter : [Exception 1 : Ignorer le conseil]

Enchaînement (b) Régler l'ouverture des volets

L'usager règle l'ouverture des volets selon l'angle conseillé.

Ce cas d'utilisation se termine lorsque :

- l'usager a procédé à l'ouverture ou la fermeture du volet selon le conseil émis par le système.

Exceptions :

[Exception 1 : ignorer le conseil] : L'utilisateur indique au système (via la borne AVIS) le refus du conseil en appuyant sur un bouton.

Besoins d'IHM

Pour pouvoir réceptionner le conseil, l'utilisateur doit pouvoir lire le message sur un afficheur (boîtier AVIS).

Pour signaler au système la réception du message, l'utilisateur doit appuyer sur un bouton de confirmation (boîtier AVIS).

Exigences non fonctionnelles

| Exigence | Description |
|-----------|--|
| Fréquence | Les conseils d'ouverture des volets pour une même fenêtre ne peuvent se succéder dans une période inférieure à 15 minutes. |

B.2 Cas d'utilisation : Modifier consignes

B.2.1. Identification

| | | | |
|-------------------------|---|----------------------------|--|
| Titre | Modifier consignes | | |
| But | L'utilisateur commande le système pour modifier le confort dans l'habitat | | |
| Résumé | L'utilisateur, lorsqu'il a trop chaud ou trop froid, commande le système pour augmenter ou diminuer la température. | | |
| Acteurs | Utilisateur (principal) | | |
| Date de création | | Date de mise à jour | |
| Version | | Responsable | |

B.2.2. Description des scénarios

Préconditions

1 - Le confort est régulé par le système.

Scénario nominal

Le cas d'utilisation commence à tout moment dès que l'utilisateur souhaite modifier la température de la maison.

Enchaînement (a) L'utilisateur signale au système son intention de modifier l'ambiance. Il envoie le signal ('+') pour augmenter la température, et le signal ('-') pour la diminuer.

Enchaînement (b) L'utilisateur quantifie la variation de température qu'il souhaite obtenir. Trois variations de température sont disponibles :

- niveau 1 = écart exigé de 0,5°C
- niveau 2 = écart exigé de 1°C,
- niveau 3 = écart exigé de 2°C.

Enchaînement (c) La commande est envoyée au gestionnaire de confort.

Enchaînement (d) Le système confirme à l'utilisateur la réception de la commande par un message.

Ce cas d'utilisation se termine lorsque :

- l'utilisateur a envoyé le type et l'écart en température souhaité

Besoins d'IHM

Pour pouvoir exiger une variation de température, l'utilisateur doit commander le système (boîtier AVIS). Le type de variation de température souhaité est pris en compte par les boutons ('+') et ('-') et l'écart de température est proportionnel au nombre de pressions sur l'un des boutons. La validation de la commande s'effectue automatiquement après un certain délai d'attente de 2 secondes.

B.3 Cas d'utilisation : Modéliser le confort

B.3.1. Identification

| | |
|---------------|---|
| Titre | Modéliser le confort |
| But | Reconnaître les conditions de confort et d'inconfort de l'utilisateur. |
| Résumé | Les conditions de confort et d'inconfort ressenties par l'utilisateur sont identifiées de manière automatique en se basant sur un historique de données mettant en évidence les habitudes de l'utilisateur. |

B.3.2. Description des scénarios

Scénario nominal

| |
|---|
| <p><i>Le cas d'utilisation peut commencer à tout moment dès que l'unité de traitements l'ordonne.</i></p> <p>Enchaînement (a) L'unité de traitement récupère 2 jeux de données enregistrées sur un historique de X jours (à définir).</p> <p><i>Le premier jeu de données contient l'historique des ambiances signalées inconfortables par l'utilisateur, et le second contient les ambiances interprétées comme étant confortables.</i></p> <p>Enchaînement (b) L'unité de traitement classe les ambiances confortables et inconfortables.</p> <p><i>Ce cas d'utilisation se termine lorsque :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Les ambiances confortables et inconfortables ont été calculées. |
| <p>Besoins d'IHM</p> <p>Pour pouvoir lire les historiques de données et enregistrer les résultats des calculs, l'unité de traitements doit disposer d'une base de données.</p> |

B.4 Cas d'utilisation : Gérer confort

B.4.1. Identification

| | |
|----------------|---|
| Titre | Gérer le confort dans l'habitat |
| But | Conditionner une ambiance thermique dans l'habitat confortable pour l'utilisateur. |
| Résumé | La gestion du confort, qui dans notre étude se base sur le concept ERGDOM, exploite l'identification des préférences de confort, l'anticipation de la réaction thermique de l'habitat et la prise en compte de la présence de l'utilisateur dans les pièces, pour calculer les commandes des appareils de régulation. |
| Acteurs | Usager (principal) appareils, météo (secondaires) |

B.4.2. Description des scénarios

Scénario nominal

Le cas d'utilisation commence lorsque l'utilisateur déclenche la gestion automatisée du confort.

Enchaînement (a) Le gestionnaire de confort initialise ses sous-systèmes impliqués dans la régulation du confort.

L'initialisation consiste notamment à exploiter des techniques d'apprentissage destinées à paramétrer différents modules (anticipation : présence, ambiance et confort) qui seront exploités dans les enchaînements suivants.

Si l'initialisation échoue, il faut exécuter :

[Exception 1 : ré- itérer l'initialisation]

Enchaînement (b) Le gestionnaire mesure la présence de l'utilisateur dans l'une des pièces de l'appartement par l'exploitation des détecteurs de présence.

Si l'utilisateur est absent, il faut exécuter :

[Exception 2 : anticiper présence]

Enchaînement (c) Le gestionnaire reçoit les préférences de l'utilisateur en fonction de la pièce occupée et/ou de son heure d'arrivée.

Le cas d'utilisation « Modéliser le confort », fournit les conditions d'ambiance à atteindre pour satisfaire de confort de l'utilisateur.

Enchaînement (d) L'unité de traitements récupère les conditions météorologiques.

Le cas d'utilisation « Acquérir conditions météorologiques » renvoie les conditions météorologiques externes.

Si l'utilisateur est absent, il faut exécuter : [Exception 3 : anticiper météo]

Enchaînement (e) L'unité de traitement calcule les consignes de gestion du confort.

En fonction des préférences de l'utilisateur, des conditions météorologiques et de la présence de l'utilisateur, l'unité de traitement calcule les consignes (ambiances pour chaque pièce).

Si l'option 'économie d'énergie' est activée, il faut exécuter :

[Exception 4 : réduire la consommation d'énergie]

Enchaînement (f) Le gestionnaire calcule les commandes des appareils de gestion du confort.

En fonction des consignes et des conditions météorologiques, l'unité de traitement calcule les commandes à appliquer aux appareils pour obtenir l'ambiance souhaitée en se basant sur une grille logique de décision.

Ce cas d'utilisation se termine lorsque :

- l'utilisateur commande l'arrêt de la gestion automatisée du confort.

Exceptions :

[Exception 1 : réitérer l'initialisation] : Le gestionnaire modifie ses paramètres d'apprentissage de modèles tels que : les échantillons de données, les variables intermédiaires, les biais, etc.

[Exception 2 : anticiper présence] : Le cas d'utilisation « Modéliser les habitudes de présence » fournit la probabilité de présence de l'utilisateur dans une pièce à un instant donné de la journée.

[Exception 3 : anticiper météo] : Le gestionnaire anticipe le rayonnement solaire jusqu'à ce que l'utilisateur arrive dans l'appartement.

[Exception 4 : réduire la consommation d'énergie] : L'unité de traitement, en fonction d'un compromis entre la consommation d'énergie et le niveau de confort, calcule les conditions d'ambiance les plus proches possibles des conditions de confort de l'utilisateur et dont la régulation présentera le coût le plus bas. Le gestionnaire exploite les modèles des appareils (calculant coût énergétique ainsi que l'apport thermique) pour construire et sélectionner le scénario de régulation satisfaisant.

C Solution logique avec gestion des données

C.1 Diagrammes des séquences

C.1.1.DS : Démarrer, Arrêter, Modifier consignes

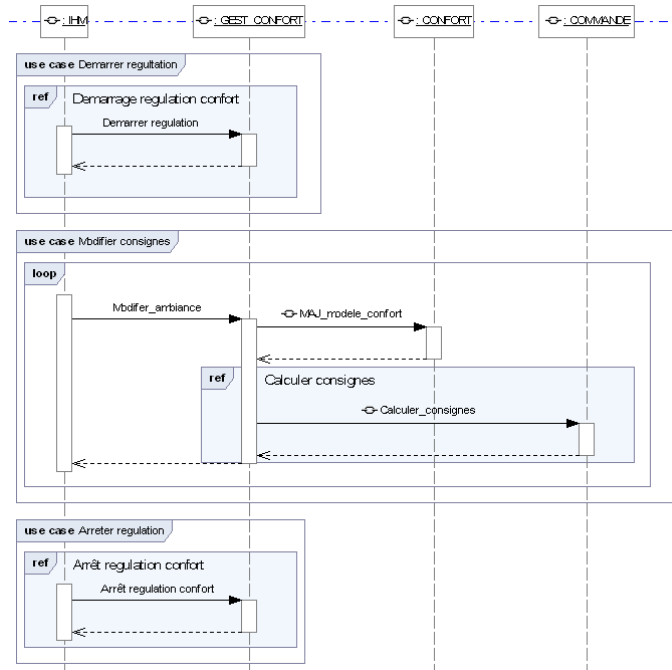


Figure 87 : Séquences : commande utilisateur pour la gestion du confort.

C.1.2.DS : Commander les appareils

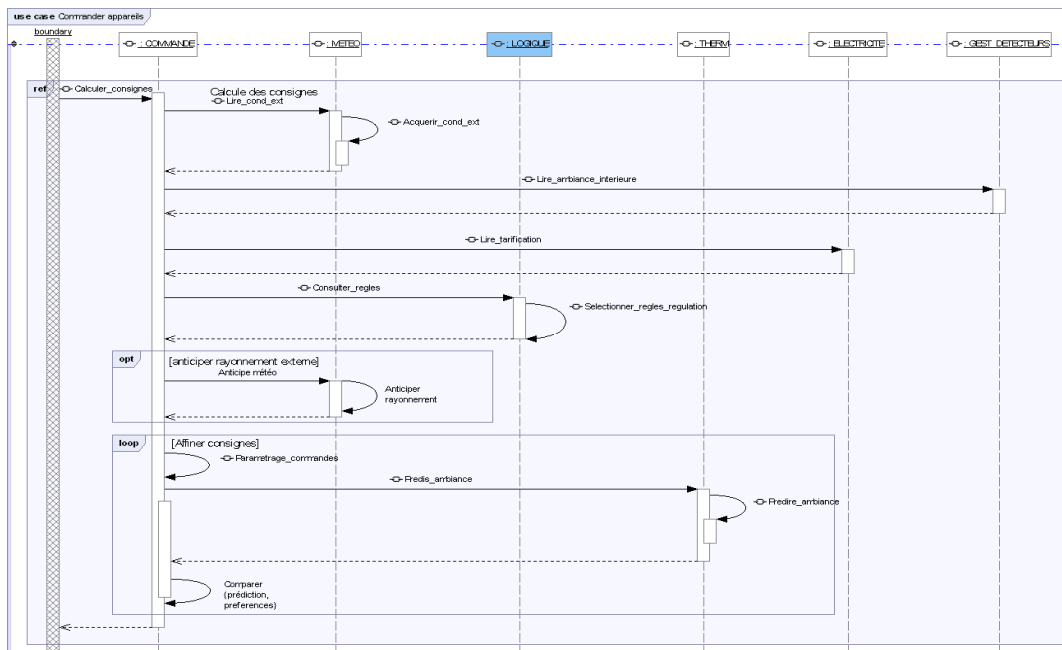


Figure 88 : Séquences : Commander appareils.

C.1.3. DS : Modéliser habitudes confort

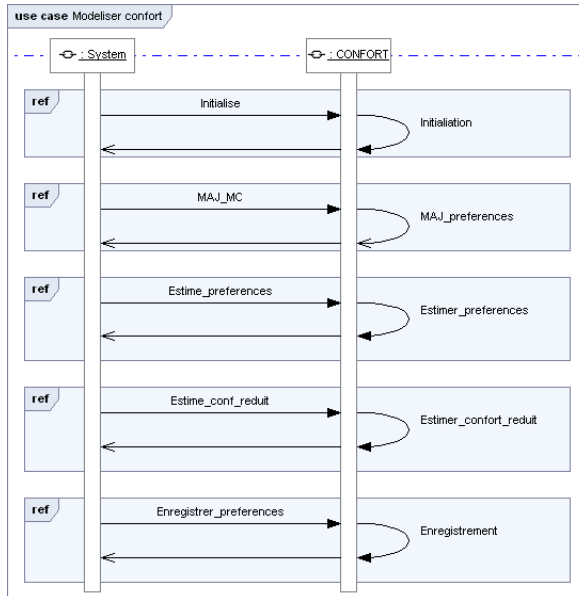


Figure 89 : Séquences : la gestion du modèle de confort.

C.1.4. DS : Modéliser la thermique de l'habitat

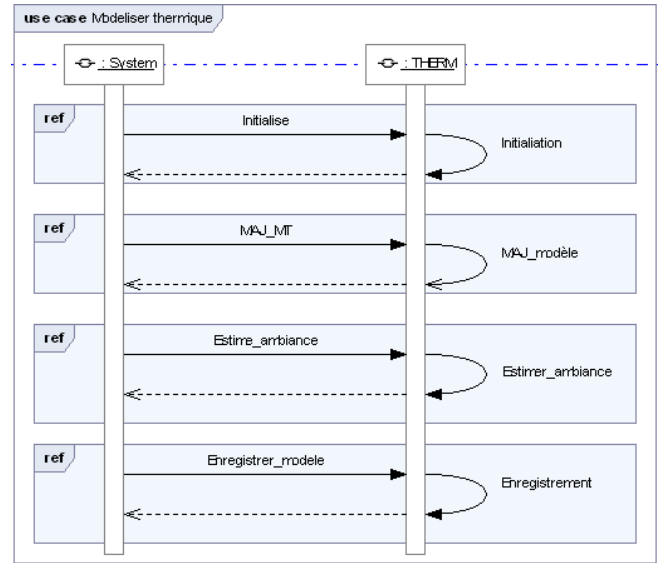


Figure 90 : Séquences : la gestion du modèle thermique.

C.1.5.DS : Modéliser habitudes de présence

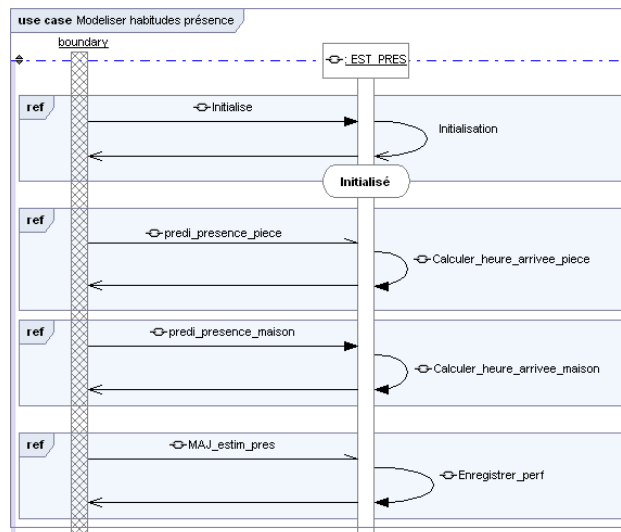


Figure 91 : Séquences : la gestion du modèle de présence.

C.2 Diagrammes d'activités

C.2.1.DA : Gérer système

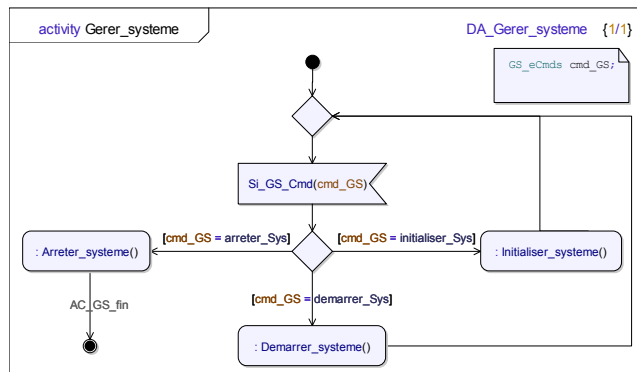


Figure 92 : Activité : « Gérer système ».

C.2.2.DA : Modéliser thermique habitat

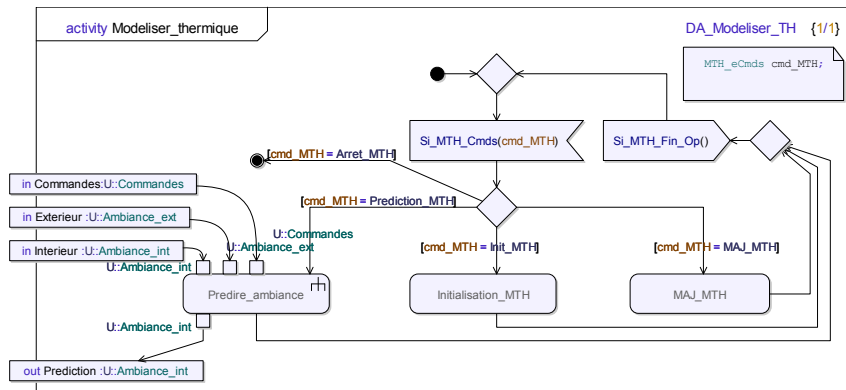


Figure 93 : Activité : « Modéliser la thermique de l'habitat ».

C.2.3.DA : Modéliser habitudes de présence

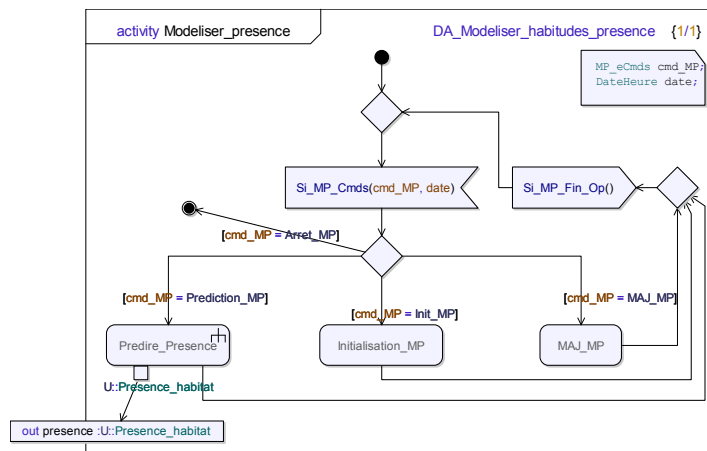


Figure 94 : Activité : « Modéliser les habitudes de présence de l'utilisateur ».

C.2.4.DA : Modéliser habitudes de présence

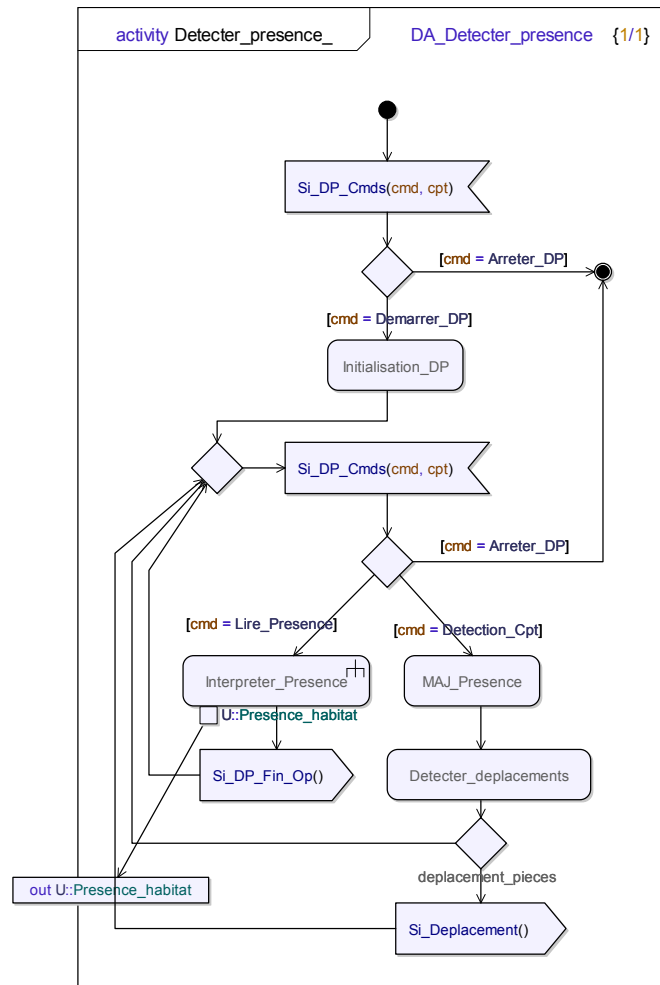


Figure 95 : Activité : « Détecter présence ».

C.2.5.DA : Modéliser confort

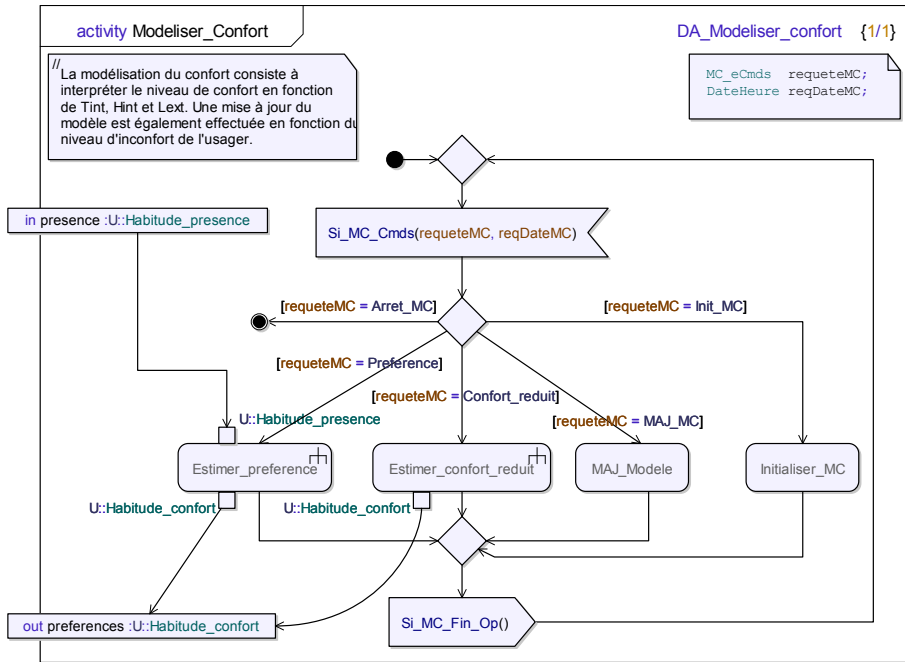


Figure 96 : Activité : « Modéliser le confort de l'utilisateur ».

C.2.6.DA : Logique décisionnelle

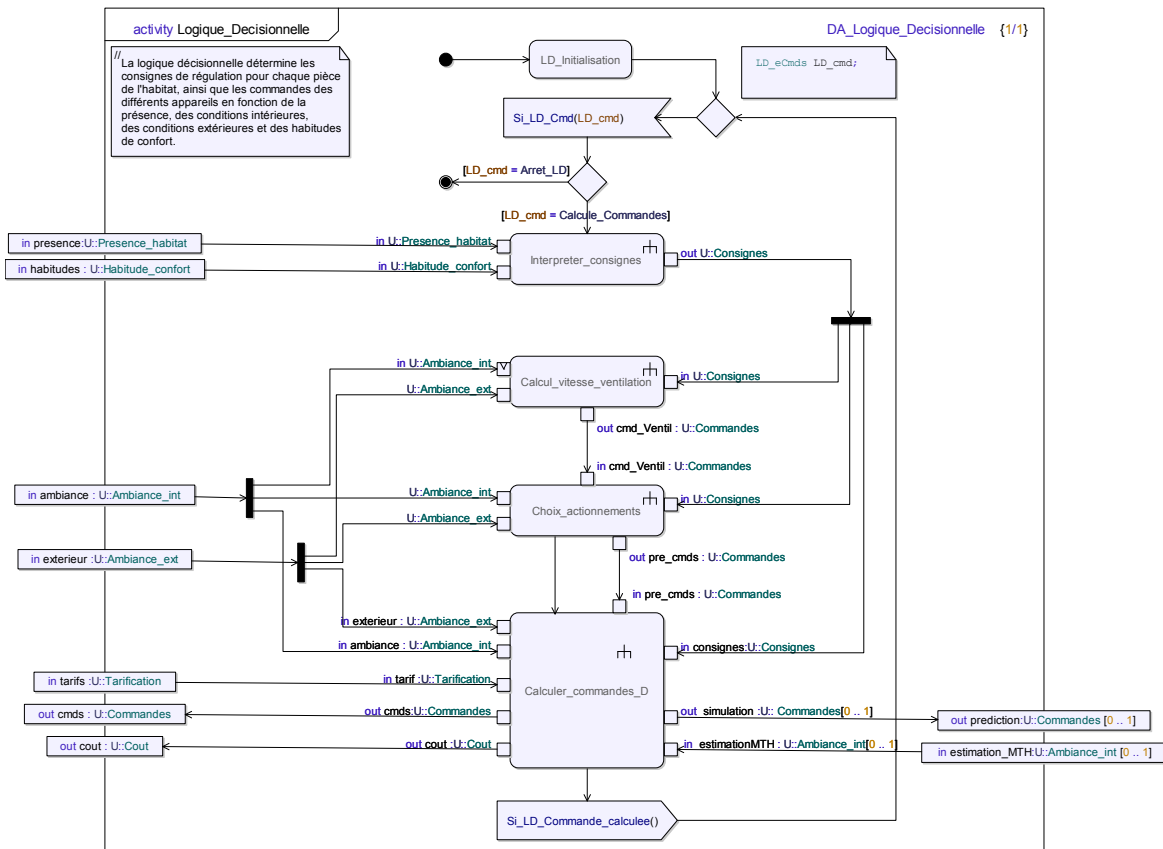


Figure 97 : Activité : « Logique décisionnelle ».

C.2.9. DA : Acquérir conditions extérieures

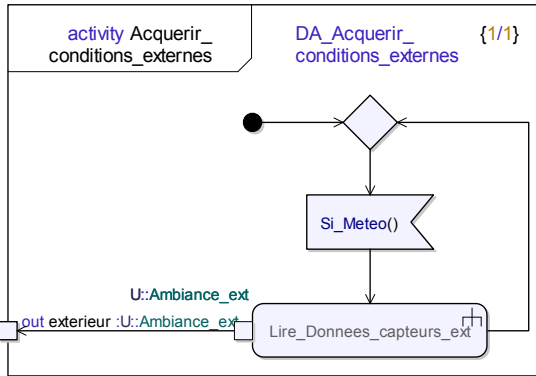


Figure 100 : Activité : « Acquérir conditions extérieures ».

C.2.10. DA : Acquérir conditions intérieures

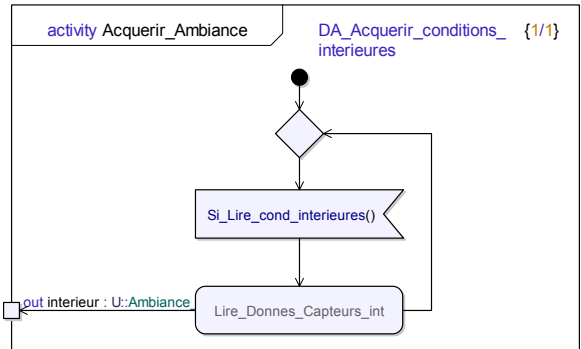


Figure 101 : Activité : « Acquérir conditions intérieures ».

C.2.11. DA : Commander appareils

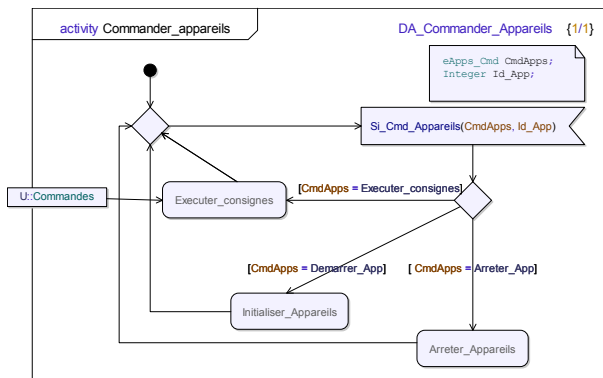


Figure 102 : Activité : « Commander appareils ».

C.2.12. DA : Acquérir Tarification

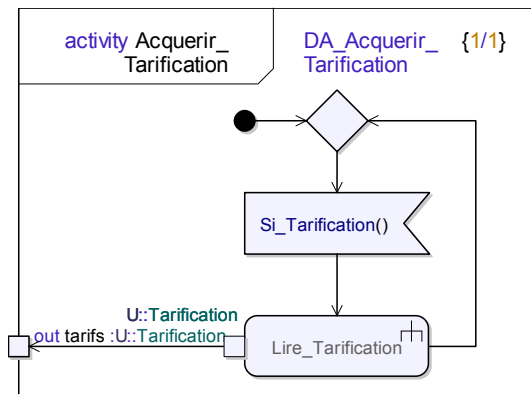


Figure 103 : Activité : « Acquérir tarification ».

C.3 Le modèle HiLes

C.3.1. Abréviations utilisées dans le modèle HiLes

| <i>Nom</i> | <i>Signification</i> |
|-----------------|---|
| <i>MC</i> | Modèle de Confort |
| <i>MT</i> | Modèle Thermique |
| <i>MP</i> | Modèle de Présence |
| <i>DP</i> | Détection de Présence |
| <i>GS</i> | Gestion Système |
| <i>IS</i> | Initialisation système |
| <i>AE</i> | Acquisition des conditions externes |
| <i>AI</i> | Acquisition de l'ambiance |
| <i>TE</i> | Tarifification EDF |
| <i>MC</i> | Modèle de Confort |
| <i>MP</i> | Modèle de Présence |
| <i>DP</i> | Détection de Présence |
| <i>MT</i> | Modèle Thermique |
| <i>LD</i> | Logique décisionnelle |
| <i>GS</i> | Gestion Système |
| <i>GC</i> | Modèle de Confort |
| <i>Nd_inter</i> | Nœud intermédiaire : C'est une place intermédiaire qui doit être créée pour satisfaire les contraintes de l'éditeur HiLes. Elle ne modifie pas le comportement du RdPT. |
| <i>A Nom</i> | Commande « Arrêt » du bloc nommé « Nom » |
| <i>Rc Nom</i> | Réception du signal nommé « Nom » |
| <i>Tr Nom</i> | Transmission du signal nommé « Nom » |
| <i>Dec Num</i> | Nœud décision numéroté |
| <i>FOP</i> | Fin d'une opération |

C.3.2. Bloc « Gestion système »

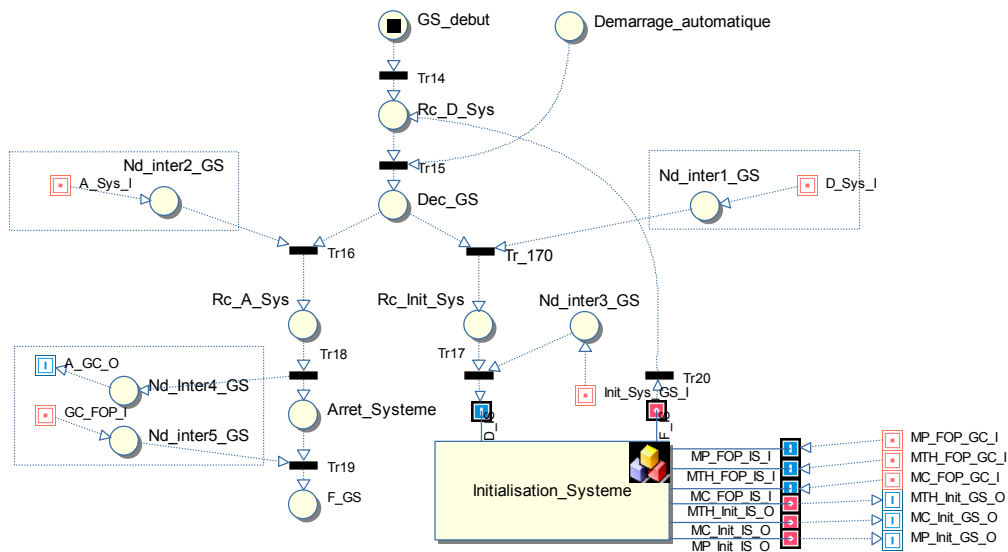


Figure 104 : Bloc : « Gestion système ».

C.3.3. Bloc « Détection Présence »

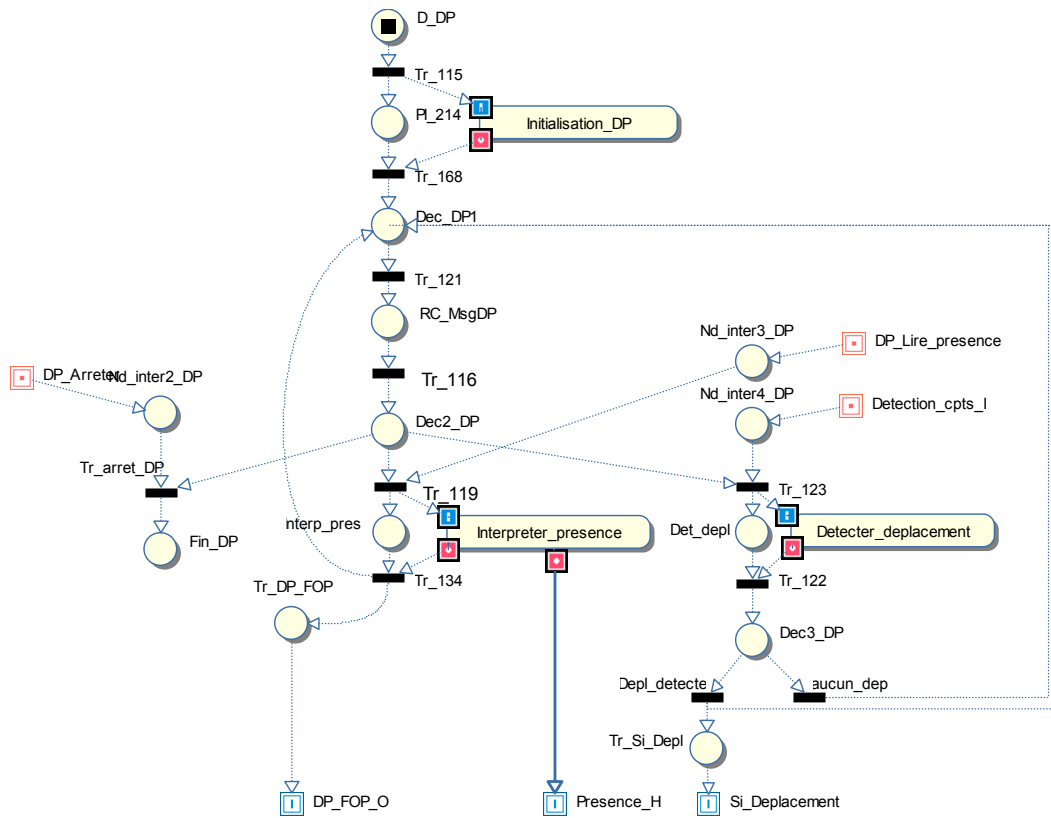


Figure 105 : Bloc : « Détection de la présence ».

C.3.4. Bloc « Habitudes présence »

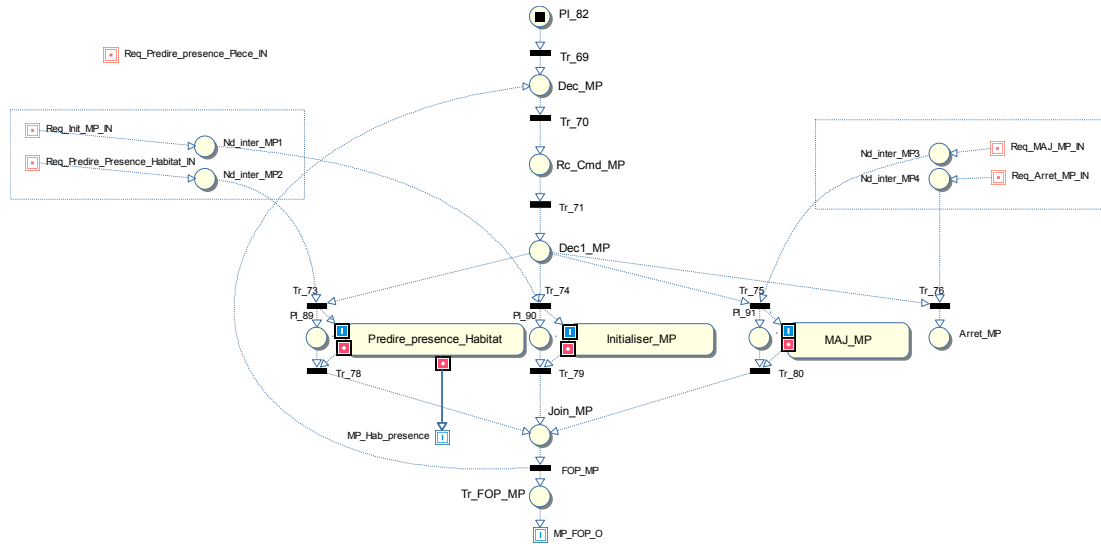


Figure 106 : Bloc : « Habitudes de présence ».

C.3.5. Bloc « Habitudes confort »

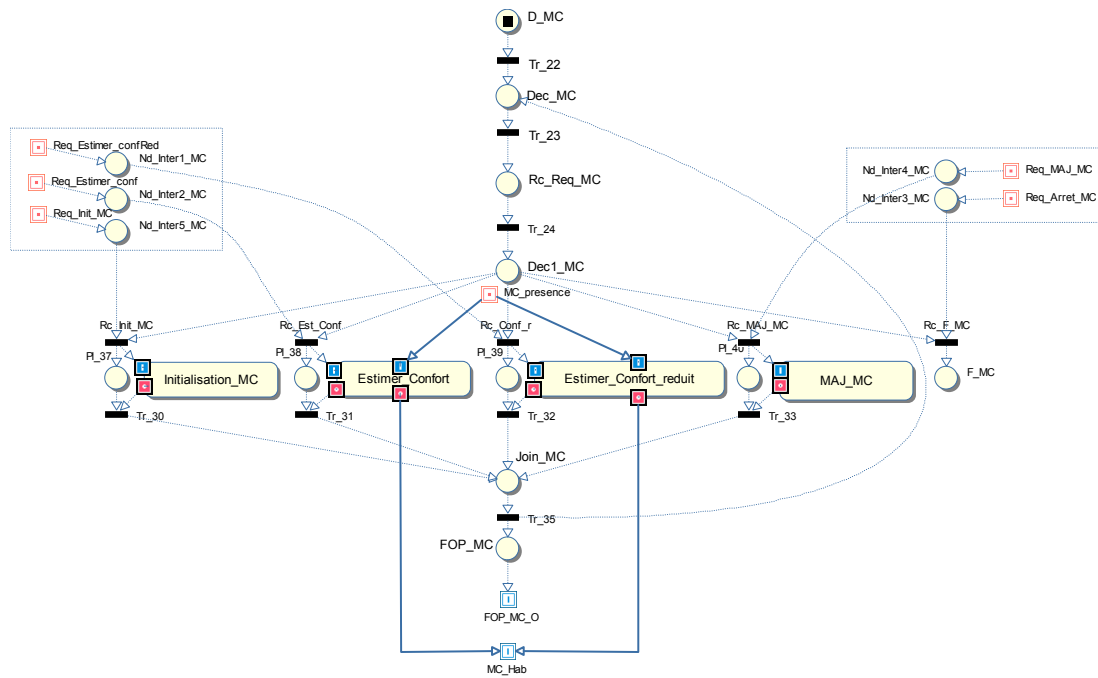


Figure 107 : Bloc : « Habitudes de confort ».

C.3.6. Bloc « Logique décisionnelle »

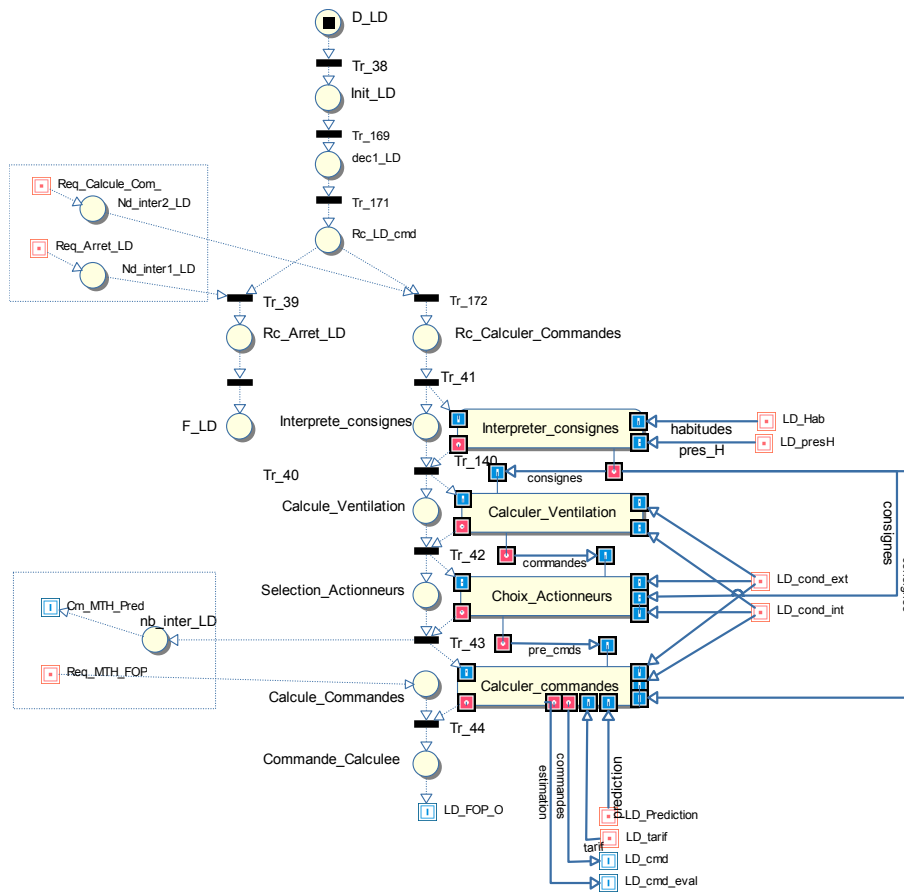


Figure 108 : Bloc : « Logique décisionnelle ».

C.3.7. Bloc « Modèle thermique »

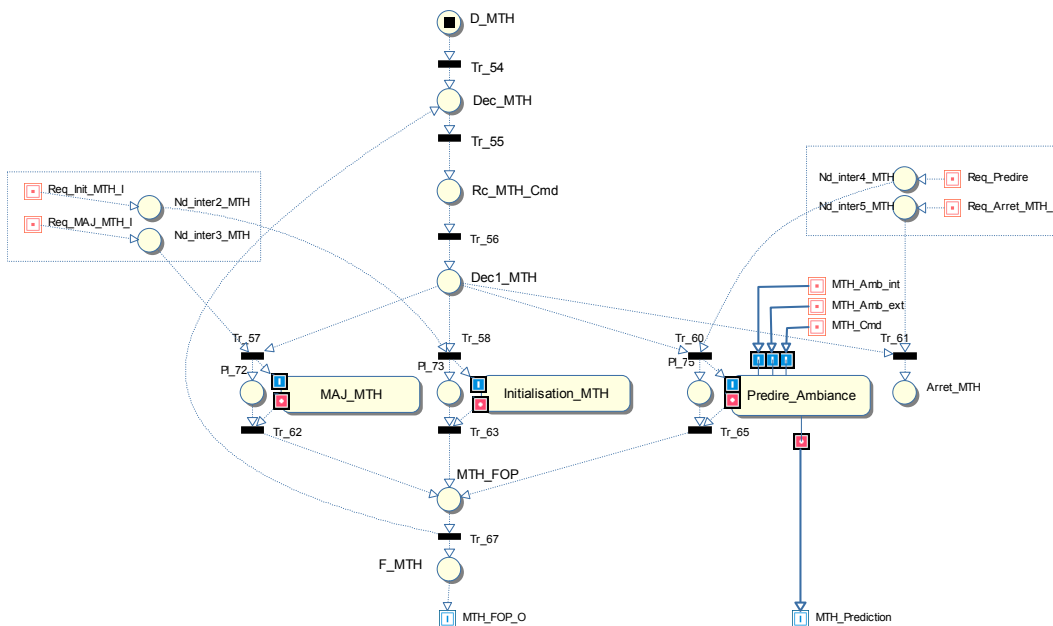


Figure 109 : Bloc : « Modèle thermique ».

D Modélisation thermique d'un logement

Le logement représentatif a été construit à partir des spécifications du logement 'Mozart' (dont les caractéristiques des matériaux sont référencées dans le département ENERBAT). Il comporte quatre pièces, une cuisine et une salle de bain (avec toilettes). Le modèle thermique de l'habitat est élaboré sous Clim2000.

Le respect des exigences, liées aux systèmes de ventilation mécanique contrôlé appliqué au logement 'Mozart', sont représentés figure 110 où les entrées d'air sont représentées en bleu et les sorties d'air en rouge. Les débits d'extraction d'air ainsi pris en compte pour le logement 'Mozart' sont présentés dans le tableau 15 conformément à la réglementation RT2000.

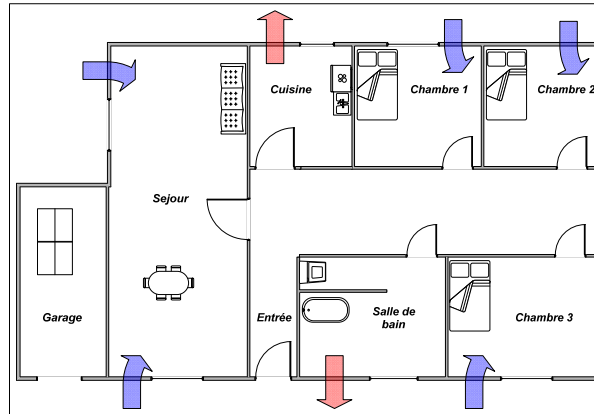


Figure 110 : Logement individuel 'Mozart'.

D.1 Environnement de simulation

Dans l'environnement Clim2000, les extractions d'air sont réglables dynamiquement. Les entrées d'air sont quant à elles auto-réglables en fonction de l'écart de pression. Le modèle thermique ainsi conçu fait apparaître 7 nœuds d'air : le séjour, les trois chambres, l'entrée, la cuisine et la salle de bain. Deux modifications ont été apportées au plan d'origine du logement 'Mozart', pour simplifier la conception et faciliter la résolution des calculs : le cabinet d'aisance est inclus dans la salle de bain, et le garage, inutile dans notre étude, n'est pas présent dans le nouveau modèle Clim2000.

Deux modèles ont été élaborés pour le logement 'Mozart' : un premier modèle a été effectué sous la Clim200 version Windows et un second, sous la version Unix. La version Unix, antérieure à la version Windows, présente l'avantage de gérer sans erreur le rayonnement solaire. Les compositions des parois, pour les murs externes, cloisons, refends, plancher, plafonds, etc., correspondent aux caractéristiques de la réglementation thermique de 1989 telle que spécifiée dans la description du logement Mozart [2]. La figure 111 présente la modélisation sous Clim2000 de chacune des couches élémentaires appartenant à une paroi. Les pièces sont ainsi modélisées de manière indépendante afin de mettre en évidence les différences de température entre celles-ci, et refléter au mieux la circulation de l'air (fenêtres fermées) dans le logement.

D.2 Caractéristiques du modèle

Le modèle thermique conçu sous Clim2000 version Windows gère la température, la pression et l'humidité. Le rayonnement n'étant pas pris en compte, l'exploitation de celui-ci a été abandonnée. Le modèle thermique élaboré sous Clim2000 version Unix gère la température, la pression, l'humidité et le rayonnement (sur les parois et au travers des fenêtres).

Les modules TF168 à loi non linéaire sont utilisés pour les entrées d'air, et les modules TF82 à débit volumique imposé sont utilisés pour les extractions d'air. Les modules TF114 sont utilisés pour modéliser les fenêtres équipées de volets et les échanges convectifs avec l'air extérieur sont pris en compte par les modules TF65 (échanges air-paroi) dont le coefficient d'échange prend en compte la convection et le rayonnement GLO.

L'aération est alors gérée à partir des deux bouches d'extractions d'air, situées dans la cuisine et la salle de bain, dont les débits sont variables. En effet, pour chaque bouche d'extraction d'air, une commande comportant deux vitesses est appliquée : régime permanent (vitesse réduite) et régime forcé.

L'ouverture des volets peut être réglée selon trois positions : volets fermés, volets entre-ouverts et volets ouverts. Une exception est faite pour la salle de bain où la réglementation RT2000 impose une ouverture constante des volets.

D.3 Modèle Mozart Clim2000

- **Modèle Mozart : Clim2000 (Windows)**

La figure 111 illustre la modélisation thermique de la cuisine et de la chambre n°1 dans le logement Mozart avec la version Windows de Clim2000. Le modèle prend en compte la température, la pression et l'humidité.

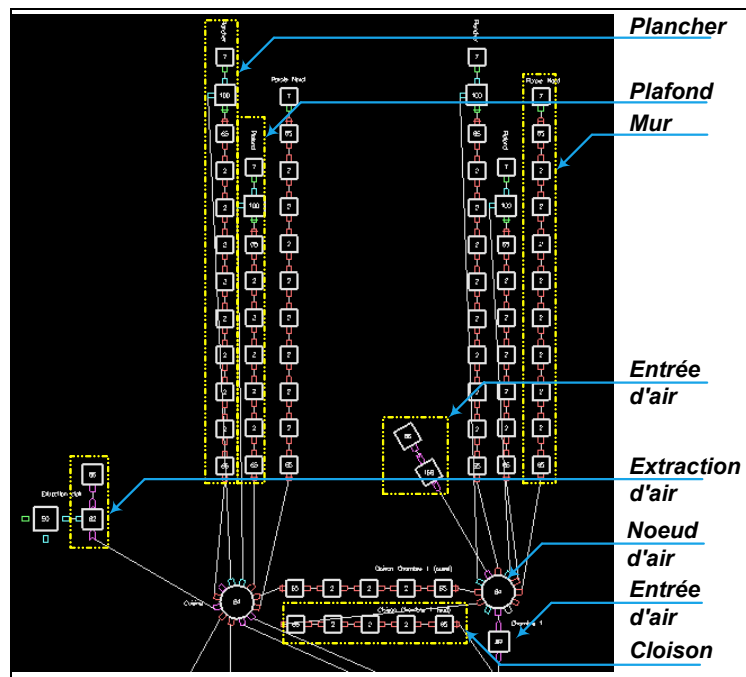


Figure 111 : Description du modèle thermique paroi par paroi.

La figure 112 présente le modèle thermique du logement ‘Mozart’.

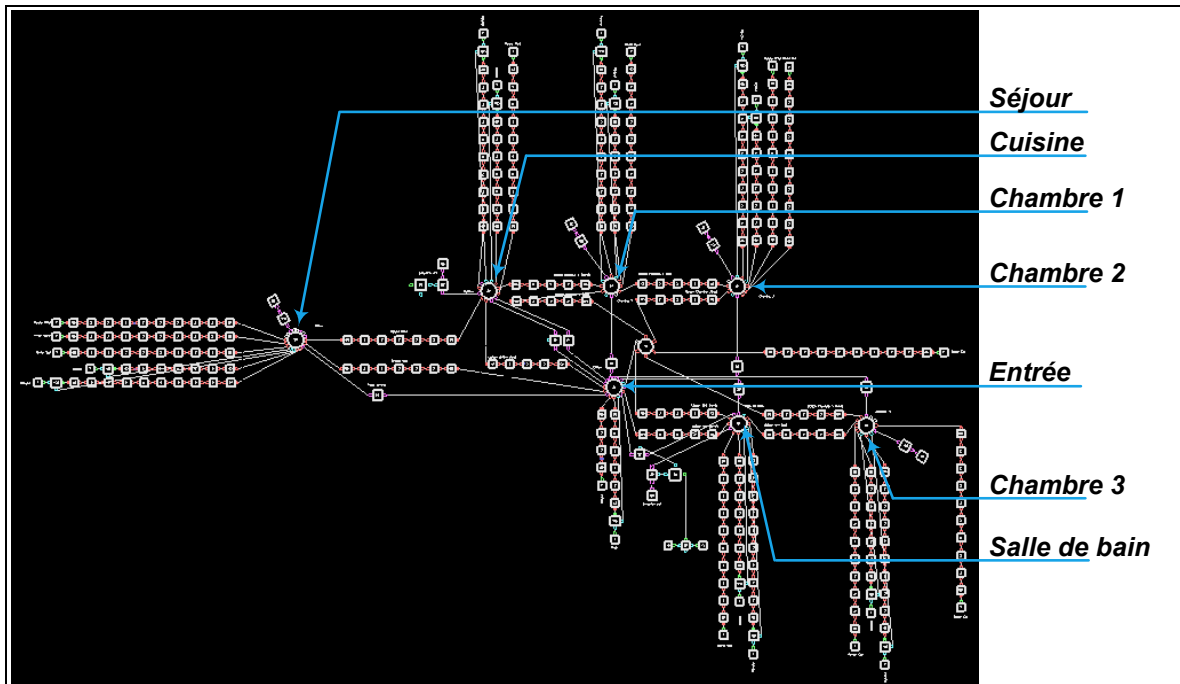


Figure 112 : Modélisation du logement Mozart sous Clim2000 (windows).

- **Modèle Mozart : Clim2000 (Unix)**

La figure 113 détaille le modèle thermique d’une pièce du logement ‘Mozart’ modélisé sous Clim2000 (version Unix). Les fenêtres et les parois éclairées peuvent ainsi être insérées dans la modélisation. Le modèle prend en compte la température, l’humidité, la pression et le rayonnement.

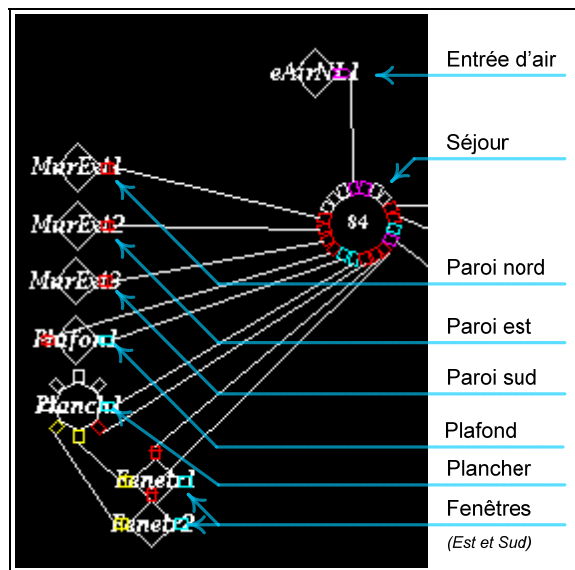


Figure 113 : Modélisation thermique détaillée du séjour.

La figure 114 représente le modèle thermique du logement ‘Mozart’. Les résultats exploités dans cette étude sont issus des simulations de ce modèle. Notons toutefois

que la commande d'ouverture des occultants a été retirée de la figure pour améliorer la lisibilité.

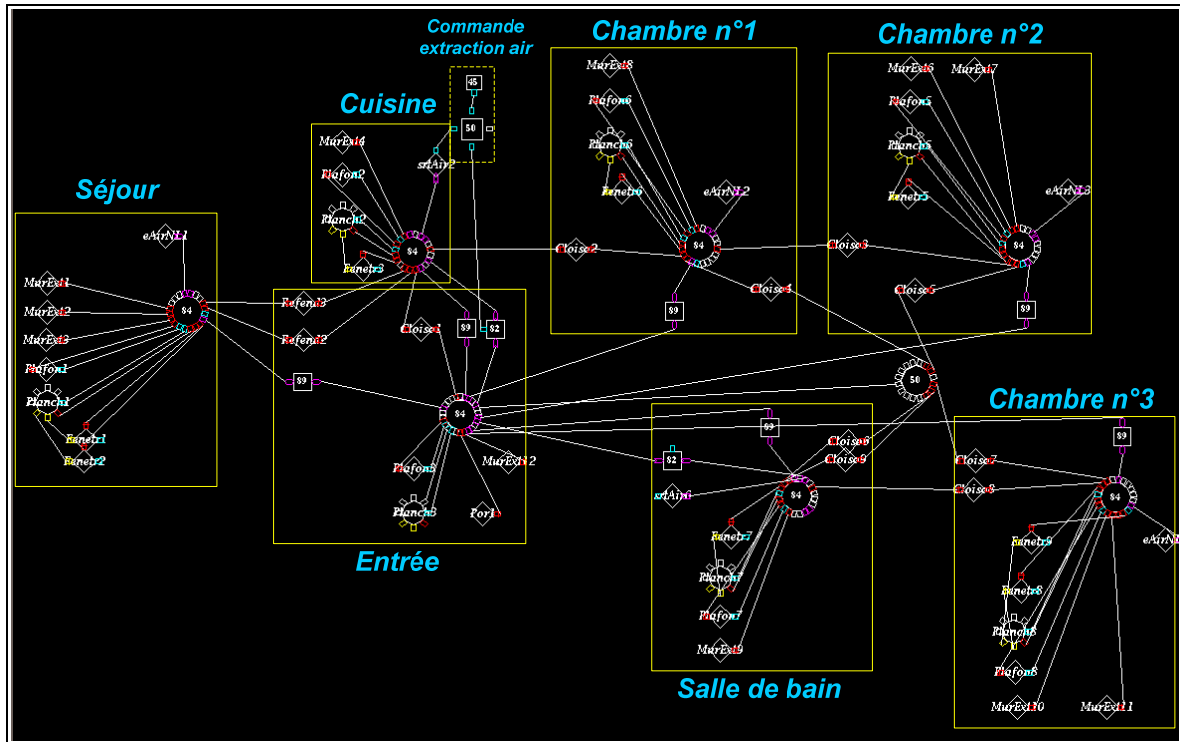


Figure 114 : Modèle thermique du logement Mozart sous Clim2000 (Unix).

D.4 Capacité frigorifique du « free cooling »

- *Trappes – Zone Eb*

| <i>Scénarios comparés au scénario de référence</i> | <i>Gain moyen</i> | <i>Ecart maximal</i> |
|--|-------------------|----------------------|
| Scénario n°2 <i>Régulation RT2000</i> | 0,3°C | 0,8°C |
| Scénario n°3 <i>Ventilation forcée</i> | 0,9°C | 2,5°C |
| Scénario n°4 <i>Ventilation forcée +</i> | 1,7°C | 5,3°C |

- *Agen – Zone Ec*

| <i>Scénarios comparés au scénario de référence</i> | <i>Gain moyen</i> | <i>Ecart maximal</i> |
|--|-------------------|----------------------|
| Scénario n°2 <i>Régulation RT2000</i> | 0,3°C | 0,7°C |
| Scénario n°3 <i>Ventilation forcée</i> | 0,1°C | 2,5°C |
| Scénario n°4 <i>Ventilation forcée +</i> | 2°C | 5,4°C |

- *Nice – Zone Ed*

| <i>Scénarios comparés au scénario de référence</i> | <i>Gain moyen</i> | <i>Ecart maximal</i> |
|--|-------------------|----------------------|
| Scénario n°2 <i>Régulation RT2000</i> | 0,2°C | 0,4°C |
| Scénario n°3 <i>Ventilation forcée</i> | 0,6°C | 1,3°C |
| Scénario n°4 <i>Ventilation forcée +</i> | 1,2°C | 2,8°C |

- *Rennes – Zone Ea – Données météorologiques erronées.*

- *Bilan*

| <i>Scénarios comparés au scénario de référence</i> | <i>Gain moyen</i> | <i>Ecart maximal</i> |
|--|-------------------|----------------------|
| Scénario n°2 <i>Régulation RT2000</i> | [0,2°C - 0,3°C] | [0,4°C - 0,8°C] |
| Scénario n°3 <i>Ventilation forcée</i> | [0,1°C - 0,9°C] | [1,3°C - 2,5°C] |
| Scénario n°4 <i>Ventilation forcée +</i> | [1,2°C - 1,7°C] | [2,8°C - 5,4°C] |

D.5 Capacité calorifique du rayonnement solaire

- **Trappes – Zone Eb**

| Scénarios comparés au scénario de référence | Séjour | | Chambre n°1 | | Chambre n°2 | | Chambre n°3 | |
|---|------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| | Gain moyen | Ecart maximal | Gain moyen | Ecart maximal | Gain moyen | Ecart maximal | Gain moyen | Ecart maximal |
| Volets entre-ouverts | 2,8°C | 4°C | 2,7°C | 3,8°C | 2,8°C | 4,7°C | 3,3°C | 5,1°C |
| Volets ouverts | 5,7°C | 7,9°C | 5,3°C | 7,6°C | 5,6°C | 9,1°C | 6,6°C | 9,8°C |

- **Agen – Zone Ec**

| Scénarios comparés au scénario de référence | Séjour | | Chambre n°1 | | Chambre n°2 | | Chambre n°3 | |
|---|------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| | Gain moyen | Ecart maximal | Gain moyen | Ecart maximal | Gain moyen | Ecart maximal | Gain moyen | Ecart maximal |
| Volets entre-ouverts | 3°C | 3,9°C | 2,8°C | 3,7°C | 3,1°C | 6,2°C | 3,6°C | 7,1°C |
| Volets ouverts | 6°C | 8°C | 5,7°C | 7,6°C | 4,5°C | 9,1°C | 4,9°C | 9,8°C |

- **Nice – Zone Ed**

| Scénarios comparés au scénario de référence | Séjour | | Chambre n°1 | | Chambre n°2 | | Chambre n°3 | |
|---|------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| | Gain moyen | Ecart maximal | Gain moyen | Ecart maximal | Gain moyen | Ecart maximal | Gain moyen | Ecart maximal |
| Volets entre-ouverts | 3°C | 3,9°C | 2,9°C | 3,7°C | 3,1 °C | 4,5°C | 3,6°C | 4,9°C |
| Volets ouverts | 6°C | 7,9°C | 5,7°C | 7,6°C | 6,2°C | 9,1°C | 7,1°C | 9,8°C |

- **Rennes – Zone Ea – Données météorologiques erronées.**

- **Bilan**

| Gain par rapport au scénario de référence | Séjour | | Chambre n°1 | | Chambre n°2 | | Chambre n°3 | |
|---|------------|---------------|-------------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| | Gain moyen | Ecart maximal | Gain moyen | Ecart maximal | Gain moyen | Ecart maximal | Gain moyen | Ecart maximal |
| Volets entre-ouverts | 2,8 - 3°C | 3,9 - 4°C | 2,7 - 2,9°C | 3,7 - 3,8°C | 2,8 - 3,1 °C | 4,5 - 6,2°C | 3,3 - 3,6°C | 4,9 - 7,1°C |
| Volets ouverts | 5,7 - 6°C | 7,9 - 8°C | 5,3 - 5,7°C | 7,6°C | 4,5 - 6,2°C | 9,1°C | 7,1°C | 9,8°C |

E Description des échelles de jugements

La norme européenne NF EN ISO 10551 spécifie des méthodes de mesurage des ambiances thermiques ainsi que la construction et l'utilisation d'échelles de jugement permettant d'obtenir des données fiables et comparables concernant l'évaluation subjective du confort et de l'ambiance thermique.

Cinq échelles sont proposées : trois échelles sont élaborées pour recueillir les jugements et deux supplémentaires pour exprimer l'acceptabilité personnelle.

E.1.1. Echelles de jugements perceptif, évaluatif et préférentiel

E.1.1.a Echelle de perception de l'état thermique personnel

- Caractéristiques : deux pôles (froid, chaud), un degré central et deux fois 3 ou 4 degrés d'intensité croissante.

| Degré | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
|-------------|------------|-------|------------------|-------------------|------------------|-------|------------|
| Formulation | Très froid | Froid | Légèrement froid | Ni chaud ni froid | Légèrement chaud | chaud | Très chaud |
| Pôle | FROID | | | NEUTRE | CHAUD | | |

E.1.1.b Echelle évaluative

- Caractéristiques : un pôle (inconfort), 1 degré d'origine, 4 ou 5 degrés.

| Degré | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------|-------------|--------------------------|---------------|--------------------|---------------------------|
| Formulation | Confortable | Légèrement inconfortable | inconfortable | Très inconfortable | Extrêmement inconfortable |
| Pôle | INCONFORT | | | | |

E.1.1.c Echelle de préférence thermique

- Caractéristiques : deux pôles (préférence de chaud ou de froid), 1 degré central d'indécision, deux fois 3 degré d'intensité croissante.

| Degré | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
|-------------|---------------------|------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|------------|---------------------|
| Formulation | Beaucoup plus froid | Plus Froid | Légèrement plus froid | Ni chaud plus ni plus froid | Légèrement plus chaud | Plus chaud | Beaucoup plus chaud |
| Pôle | PLUS FROID | | | NEUTRE | PLUS CHAUD | | |

E.1.2. Expression de l'acceptabilité et de la tolérance personnelles

Le rejet ou l'acceptation sont exprimés sur un plan personnel et plusieurs facteurs relatifs au contexte sont en relation (exigence de confort, durée d'exposition, etc.). Les formulaires d'acceptabilité et l'échelle de tolérance doivent être appliqués après les échelles de perception et d'évaluation.

E.1.2.a Formulaire d'expression du jugement

- Plusieurs types de formulaire peuvent être proposés avec des propositions de type : « Comment jugez-vous cet environnement (climat local) de votre point de vue personnel ? » : plutôt acceptable, plutôt inacceptable.

- Une échelle peut également être proposée :

| | | | |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|
| Tout à fait acceptable | Tout juste acceptable | Tout juste inacceptable | Tout à fait inacceptable |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|

E.1.2.b Formulaire de tolérance personnelle

- Caractéristiques : un pôle (difficulté de tolérance), 1 degré d'origine indiquant l'absence de difficulté à tolérer, 4 degrés d'intensité croissante.

| <i>Degré</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------|
| <i>Formulation</i> | Parfaitement supportable | Légèrement difficile à supporter | Assez difficile à supporter | Très difficile à supporter | insupportable |
| <i>Pôle</i> | <i>DIFFICULTE A TOLERER</i> | | | | |

L'ensemble des échelles proposées permet à l'utilisateur d'exprimer ses sensations et préférences de diverses manières. Ces échelles peuvent être implantées très facilement dans une interface homme-machine.

GLOSSAIRE

- Domotique La domotique est l'ensemble des technologies de l'électronique, de l'informatique et des télécommunications utilisées dans les habitations et exploitées pour assurer des fonctions de sécurité (comme les alarmes), de confort (comme les volets roulants), de gestion d'énergie (comme la programmation du chauffage) et de communication (comme les commandes à distance). Il s'agit également d'automatiser certaines tâches domestiques par programmation ou commande à distance [Wiki07].
- Electronique Domestique Il s'agit de l'ensemble des appareils utilisant l'électronique et exigeant une certaine programmation occupant un lieu de vie humaine (appartement, maison, etc.). Bien qu'il y ait des convergences avec la domotique, celle-ci est plus adaptée au pilotage des fonctions du domicile lui-même, (régulation thermique, sécurité, etc.), qu'aux travaux et usages ménagers [Wiki07].
- Habitat L'habitat désigne le mode d'occupation de l'espace par l'homme pour des fonctions de logement. On parle ainsi d'habitat individuel, d'habitat collectif, d'habitat groupé, d'habitat dispersé, etc. Et, par extension, l'ensemble des conditions de logement [Wiki07].
- Ingénierie Dirigée par les Modèles L'Ingénierie dirigée par les modèles (IDM) renvoie à l'utilisation systématique de modèles vus comme éléments primaires de conception dans le cycle de vie. L'IDM est un domaine de l'informatique qui met à disposition des outils, des concepts et des langages pour créer et transformer ces modèles
- Ingénierie Système L'ingénierie système est une approche basée sur des moyens interdisciplinaires permettant la réalisation et le déploiement de systèmes réussis. Elle peut être vue comme l'application de techniques d'ingénierie à l'ingénierie des systèmes, aussi bien que comme l'application d'une approche systématisée aux efforts d'ingénierie [Thom93].
- Ingénierie Système guidée par les Modèles L'Ingénierie système guidée par les modèles est une extension des principes de l'IDM appliquée à l'ingénierie des systèmes. Les éléments du système sont représentés par des modèles et les opérations de transformation de modèles sont guidées par les processus de l'ingénierie système.
- Méthode Une méthode définit la manière de réaliser une tâche. Les tâches de processus sont réalisées en utilisant des méthodes. Cependant, chaque méthode est aussi, elle-même, un processus avec sa séquence de tâches à réaliser selon des méthodes particulières [Este07].

- **Méthodologie** Une méthodologie est un ensemble de processus, de méthodes et d'outils coordonnés pour réaliser un produit ou une tâche [Este07].
- **Outil** Un outil est destiné à maîtriser l'application d'une méthode spécifique. Elle permet d'accroître la qualité et l'efficacité de réalisation de la tâche [Este07].
- **Processus** Un processus est caractérisé par une séquence de tâches permettant d'atteindre un objectif. Le processus définit les tenants et aboutissants des tâches sans nécessairement préciser les méthodes associées [Este07].
- **Technique** Une technique est une, ou un ensemble, de méthodes, dans les métiers manuels elle est souvent associée à un tour de main professionnel. La technique couvre l'ensemble des procédés de fabrication, de maintenance, de gestion, de recyclage et, même d'élimination des déchets, qui utilisent des méthodes issues de connaissances scientifiques ou simplement des méthodes dictées par la pratique de certains métiers. On peut alors parler d'art, dans son sens premier, et de science appliquée [Wiki07].
- **Sécurité** La sécurité est l'état d'esprit d'une personne qui se sent tranquille et confiante. C'est le sentiment, bien ou mal fondé, d'être à l'abri de tout danger et risque : il associe calme, confiance, quiétude, sérénité, tranquillité, assurance, sûreté. D'un point de vue collectif (« Gestion d'entreprise » par exemple), la sécurité consiste à garantir la pérennité de l'entreprise par le recours à des moyens permettant de concilier les exigences contradictoires de court terme et de long terme [Wiki07].
- **Sécurité des systèmes d'information** Ce sont les politiques et les procédures qui permettent d'éviter les intrusions (confidentialité), les incohérences (intégrité) et les pannes (disponibilité) des systèmes d'information, et qui définissent les règles d'authentification. La sécurité des systèmes d'information est un domaine particulièrement stratégique de la sécurité, car, à travers les systèmes de contrôle, les systèmes de gestion, et d'une façon générale à travers l'ingénierie des systèmes, elle doit s'intéresser à l'interopérabilité des systèmes, et faire en sorte que la sécurité soit obtenue au travers de standards et de normes de description des structures de données [Wiki07].
- **Système** Un système est un ensemble d'éléments interdépendants (personnes, organismes, procédures, logiciels, équipements, etc.) qui interagissent entre eux de façon organisée vers un but commun [Shis95].

ACRONYMES

A

| | |
|------|--|
| AOP | Aspect Oriented Programming |
| AFIS | Association Française d'Ingénierie Système |

I

| | |
|--------|---|
| IDM | Ingénierie Dirigée par les Modèles |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| INCOSE | INternational COuncil on Systems Engineering |
| IS | Ingénierie Système |

M

| | |
|-----|---------------------------|
| MDA | Model Driven Architecture |
| MDE | Model Driven Engineering |

N

| | |
|------|---|
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
|------|---|

O

| | |
|-----|-------------------------|
| OMG | Object Management Group |
|-----|-------------------------|

R

| | |
|-----|------------------|
| Rdp | Réseaux de Petri |
|-----|------------------|

S

| | |
|-------|---------------------------|
| SysML | Systems Modeling Language |
|-------|---------------------------|

U

| | |
|-----|---------------------------|
| UML | Unified Modeling Language |
| UP | Unified Process |

S

| | |
|-------|----------------------------|
| TauG2 | TAU Generation2, Telelogic |
| TINA | TIme petri Net Analyzer |

X

| | |
|-----|----------------------------|
| XML | eXtensible Markup Language |
|-----|----------------------------|

2

| | |
|------|-------------------------|
| 2TUP | 2 Track Unified Process |
|------|-------------------------|

Publications

- **Revue internationale avec comité de lecture**
S. BONHOMME, E. CAMPO, D. ESTEVE, J. GUENNEC
"PROSAFE-extended, a telemedicine platform to contribute to medical diagnosis"
TeleMed & eHealth 2007, Londres (UK), 26-27 novembre 2007. Journal of Telemedicine and Telecare, vol.14, n°3, pp.116-118, mai 2008.
 - **Revue nationale avec comité de lecture**
E. CAMPO, M. CHAN, S. BONHOMME, C. ESCRIBA, D. ESTEVE
"Intégration multifonctionnelle pour un habitat intelligent : spécifications des détecteurs de présence et perspectives"
Revue française d'informatique TSI, "Apport des STIC au maintien à domicile", Ed. Lavoisier, Paris, 23p, 2008.
 - **Manifestations internationales avec comité de lecture**
E. CAMPO, S. BONHOMME, M. CHAN, D. ESTEVE
"Remote monitoring of elderly in rural zones using multisensors system and satellite communication"
Accepté à International Conference On Smart homes and health Telematics – ICOST2008, Gerontechnology: Enhancing the Quality of Life for Rural Elders, Iowa State University, 28 Juin- 2 Juillet, 2008.
- S. BONHOMME, E. CAMPO, D. ESTEVE, J. GUENNEC
"Methodology and tools for design and verification of complex systems: application for smart home"
Accepté à IEEE International Conference on Intelligent Systems - IS 2008, Methodology, Models, Applications in Emerging Technologies, Varna, Bulgaria, 6-8 Septembre, 2008
- E. CAMPO, S. BONHOMME, M. CHAN, D. ESTEVE
"Learning life habits and practices: an issue to the smart home"
Accepté à 4st International Conference On Smart homes and health Telematic, Smart homes and beyond, ICOST'2006, Smart Homes and Beyond, eds/ C.Nugent, JC.Augusto, IOS Press, ISBN 1-58603-623-8, Belfast (Irlande), pp. 355-358, 26-28 juin 2006.
- S. BONHOMME, E. CAMPO, D. ESTEVE, J. GUENNEC
"An extended PROSAFE platform for elderly monitoring at home"
29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBEc 2007), Sciences and Technologies for Health, Lyon, pp. 4056-4059, 23-26 août 2007.
- E. CAMPO, S. BONHOMME, M. CHAN, D. ESTEVE
"Help to monitoring of elderly by using physical activities criteria"
Accepté à 6th International Conference of International Society for Gerontechnology – ISG'08, Pise, Toscane, Italie – 4-7 Juin 2008.
- M. CHAN, S. BONHOMME, D. ESTEVE, E. CAMPO
"Individual Movement Trajectories in Smart Homes"
Soumis à 13th International Conference on Biomedical Engineering - ICBME 2008, Singapoure, Bulgaria, 3-6 Décembre, 2008

- **Manifestations nationales**

S. BONHOMME

"Proposition d'une solution d'intégration multiservices pour l'habitat intelligent"

Congrès des doctorants, école doctorale EDSYS, Tarbes, 2006.

Méthodologie et outils pour la conception d'un habitat intelligent

RESUME : La réalisation de systèmes complexes de mesures, de contrôle et de surveillance nécessite une méthodologie de conception rigoureuse et des outils adaptés pour aboutir à un système sans faute. La démarche méthodologique proposée vise à aider à la conception d'un système complexe dédié à la gestion intelligente du confort et à la sécurité des personnes au sein de l'habitat. Cette démarche s'intègre dans un processus d'Ingénierie Système et s'appuie sur les standards UML et SYSML, mais également sur le formalisme HiLes, développé par le LAAS et adapté à la conception de modèle commande, la vérification formelle et la simulation numérique. Ces travaux de thèse présentent les méthodes et les outils de conception préconisés pour un habitat intelligent intégrant les objectifs de confort et de sécurité. Deux expérimentations sont décrites utilisant une commande auto-adaptative basée sur l'apprentissage des habitudes des utilisateurs dans leur environnement de vie et implémentés sur site réel.

Mots clés : Habitat intelligent, Systèmes complexes, UML2/SYSML, Conception et vérification systèmes, Habitudes, Confort, Capteurs de présences, Fusion de données

Methodology and tools for the design of an intelligent home

SUMMARY : The realization of complex systems for measurement, control and monitoring requires a rigorous design methodology and adapted tools to get a no-fault system. The methodological approach is designed to assist in the design of a complex system dedicated to the intelligent management of the comfort and safety of persons at home. This approach is part of a System Engineering process and based on the UML and SYSML standards, but also on the HiLes formalism developed by the LAAS and adapted to the design of command model, formal verification and simulation. This work presents methods and design tools suggested for a smart home integrating the goals of comfort and safety. Two experiments are described using a self-adaptive learning based on the habits of users in their living environment and implemented on real sites

Keywords : Smart Home, Complex systems, UML2/SYSML, Design and model checking, Habits, Comfort, Presence sensors, Data fusion
