



HAL
open science

Contributions à la conception de systèmes ambiants pour l'aide aux personnes fragiles

Christophe Lohr

► **To cite this version:**

Christophe Lohr. Contributions à la conception de systèmes ambiants pour l'aide aux personnes fragiles. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Bretagne Occidentale, 2024. tel-04616444

HAL Id: tel-04616444

<https://hal.science/tel-04616444v1>

Submitted on 18 Jun 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Habilitation à Diriger des Recherches

de l'Université de Bretagne Occidentale

Contributions à la conception de systèmes ambiants pour
l'aide aux personnes fragiles

Présentée par

Christophe LOHR

Le 28 mai 2024

Devant le jury composé de :

Christelle URTADO – IMT Mines Alès – Professeure	Rapporteure
Dan ISTRATE – UTC – Professeur	Rapporteur
Patrick REIGNIER – IMAG – Professeur	Rapporteur
Anthony FLEURY – IMT Nord Europe – Professeur	Examineur
Frank SINGHOFF – UBO – Professeur	Examineur
Jean-Yves ANTOINE – Université Tours – Professeur	Examineur
Pierre DE LOOR – ENIB – Professeur	Examineur

Table des matières

Table des matières	1
Introduction	5
1 Services relationnels et TV connectée	7
1.1 Démarche de co-conception	7
1.2 Caractériser le contexte et formaliser les besoins	8
1.2.1 Constituer un réseau de partenaires	8
1.2.2 Identifier les structures d'accueil de personnes âgées	8
1.2.3 Identifier les attentes et les besoins	9
1.2.4 Traduire les besoins en gamme de services	10
1.2.5 Formuler des choix techniques	13
1.3 Développement de la solution technique	14
1.3.1 Boîtier TV	14
1.3.2 Télécommande	15
1.3.3 Serveurs et architecture informatique	17
1.3.4 Ergonomie de l'interface télé	19
1.4 Un outil d'expérimentation préalable : le living'lab	22
1.5 Expérimentation du prototype technique	23
1.5.1 Identifier les expérimentateurs	23
1.5.2 Mettre en place l'expérimentation	24
1.5.3 Suivre l'expérimentation	25
1.6 Analyse des usages	26
1.6.1 Messagerie	26
1.6.2 Albums photos	27
1.6.3 Services d'information ciblées	28
1.6.4 Services de repérage dans le temps	30
1.6.5 Rapport à la technologie	30
1.7 Dispositions économiques	31
1.8 Bilan et perspectives	34
2 Gestion de services et communications multimédias	37
2.1 Accès multiples et politiques de routage de flux multimédias	38
2.1.1 L'émergence de la téléphonie sur IP	38
2.1.2 Des stratégies de routage au moindre coût	39
2.1.3 Infrastructure réseau supportant des politiques de routage	40
2.1.4 Le serveur de politiques de routage et prise de décision	43
2.1.5 Bilan des études sur la gestion des accès multiples	47
2.2 Diffusion distribuée de contenus	49
2.2.1 Plate-forme de distribution décentralisée de contenus	50
2.2.2 Bilan des études sur la diffusion distribuée de contenus	53

2.3	Joignabilité en mobilité réseau et accès multiples	55
2.3.1	Critères et objectifs pour la mobilité	55
2.3.2	Revue des solutions pour la mobilité Internet	57
2.3.3	Proposition pour la mobilité réseau et le multiaccès	64
2.3.4	Bilan des études sur la joignabilité en mobilité et accès multiples	67
2.4	Bilan et perspectives	69
3	Systèmes ambiants et habitat intelligent	73
3.1	Services d'aide à la vie quotidienne	73
3.1.1	De la domotique à l'actimétrie	74
3.1.2	Autoengagement et recommandations	76
3.1.3	De l'accompagnement au mentorat	78
3.1.4	Un bouquet de services ambiants axé sur l'autonomie active	80
3.2	Systèmes ambiants interopérables, l'approche xAAL	80
3.2.1	L'architecture de xAAL	81
3.2.2	Schémas de description des équipements xAAL	84
3.2.3	La spécification du type d'un équipement sous forme de schéma	85
3.2.4	Le protocole de communication xAAL	86
3.2.5	Alternative Home Automation Protocols over IP	90
3.2.6	Bilan des études sur l'interopérabilité des systèmes ambiants	93
3.3	Analyse de données et intelligence ambiante	95
3.3.1	Méthodes d'apprentissage supervisées pour la reconnaissance d'activités humaines	96
3.3.2	Bilan sur l'analyse de données et l'intelligence ambiante	102
3.4	Bilan et perspectives	103
4	Conclusion	107
5	Projets	113
5.1	Aides à la conception de systèmes embarqués	113
5.1.1	AMIGOS (GET, 2006-2007)	113
5.1.2	SPaCIFY (ANR, 2007-2009)	113
5.2	Services de communication et distribution de contenu	114
5.2.1	Companym@ges (FUI, 2007-2009) - Sous-projet MONA	114
5.2.2	Vipeer (ANR, 2010-2013)	114
5.2.3	TMS (FUI, 2011-2014)	115
5.3	Assistance aux personnes fragiles	115
5.3.1	M@LIS (SFR, 2006-2007)	115
5.3.2	Companym@ges (FUI, 2007-2009) - Sous-projet AIPA	116
5.3.3	SIGAAL (FUI, 2009-2012)	117
5.3.4	Mazadoo 2.0 (DGCIS, 2010-2012)	117
5.3.5	AMALYS (ANR, 2011-2013)	118
5.3.6	PRECIOUS (FP7, 2014-2016)	118
5.3.7	VITAAL (CPER, 2015-2020)	119
5.3.8	SolSens (IMT, 2017-2018)	120
5.3.9	Chaire M@D (2017-2021, 2022-2024)	120
5.3.10	HIT (PIA3, 2020-2027)	121
5.3.11	HERON (SAD APRE, 2020-2022)	122
5.3.12	e-VITA (H2020, 2021-2024)	122
5.3.13	HARSHEE (ANR Plan France Relance, 2022-2023)	123
5.3.14	Mementop (ANR Plan France Relance, 2022-2023)	124

6	Encadrement de thèses	125
6.1	Thèse de Ali Sajjad MUSHTAQ	125
6.2	Thèse de Molham DARWISH	126
6.3	Thèse de Pratibha MITHARWAL	127
6.4	Thèse de Samia BENFERHAT	128
6.5	Thèse de Linda VALLÉE	129
6.6	Thèse de Damien BOUCHABOU	130
6.7	Thèse de Cédric LE BONO	131
6.8	Thèse de Florian SZCZEPANIAK	132
6.9	Thèse de Nacer DJERADA	132
7	Publications	135
7.1	Aides à la conception de systèmes embarqués temps-réels	135
7.2	Services relationnels et télé connectée	136
7.3	Communication et distribution de contenu	137
7.4	Systèmes ambiants et habitat intelligent	138
7.5	Robotique d'assistance	141
7.6	Thèses co-encadrées	142
8	Bibliographie	145

Introduction

Ce document synthétise mon activité de recherche scientifique depuis mes travaux de thèse, mais aussi de mes activités en matière d'enseignement. Il fournit, plus avant, les éléments qui constitueront mon projet scientifique dans les années à suivre.

J'ai soutenu ma thèse, menée au LAAS à Toulouse, en décembre 2002 : «Contribution à la conception de systèmes temps-réel s'appuyant sur la technique de description formelle RT-LOTOS». Les contributions, théoriques mais aussi prototypées, portent, d'une part sur l'aide à la conception grâce à un profil UML dédié au temps-réel, et d'autre part, sur les techniques de validation par traduction des contraintes temps réel dans cette algèbre de processus RT-LOTOS, par la construction de graphes d'états temporisés, le calcul d'horloges, l'analyse de traces. Lors de mon service militaire en tant que scientifique du contingent à l'ENSICA en 2003, j'ai eu la chance de pouvoir poursuivre en partie ces travaux. J'ai par la suite effectué une année de postdoctorat à l'université de Concordia à Montréal et qui avait pour sujet «Early Validation of Deployment and Scheduling Constraints for MSC Specifications». Si le formalisme et les outils diffèrent, les objectifs scientifiques et les contributions sont dans la continuité de mes travaux de thèse ; pour résumer, les propositions portaient sur des modifications de l'algorithme Floyd-Warshall pour introduire un calcul symbolique sur les horloges et exhiber les conflits entre les contraintes temps-réel.

J'ai été recruté en février 2005 en tant que maître de conférence au Département Informatique de l'ENST Bretagne à Brest, établissement devenu par la suite Télécom Bretagne, puis IMT Atlantique. Ce recrutement répondait à deux objectifs : d'une part combler des besoins grandissants en enseignement en informatique et réseaux, et d'autre part contribuer à la constitution d'activités de recherche dans le département. La recherche s'y articulait alors essentiellement autour de trois pôles : les télécoms et les réseaux d'opérateurs (du fait des liens historiques avec le CNET), le génie logiciel et la conception de systèmes distribués (une thématique portée par le recrutement récent de jeunes collègues), et, enfin, une thématique plus appliquée, liée aux usages des nouvelles technologies pour l'aide aux personnes fragiles. Du fait de la jeunesse de la structuration de la recherche dans le département informatique, et d'un mode de recherche quasi exclusivement par projets, il existait une grande porosité entre ces différents pôles, et le positionnement thématique des membres de l'équipe évoluait au fil des opportunités de projets. J'ai moi-même mené des activités de recherche autour de ces trois pôles avant de me consacrer plus avant aux systèmes ambiants pour l'aide aux personnes fragiles. Ce glissement vers une polarisation thématique s'est fait en parallèle d'une structuration plus globale de la recherche sur le territoire et du renforcement d'UMR CNRS : d'un côté l'IRISA localisé sur la Bretagne-centre et intégrant notamment les thématiques de certains de mes collègues sur le génie logiciel et les réseaux, et d'un autre côté le Lab-STICC localisé sur la Bretagne océane et intégrant une thématique humain-systèmes ainsi qu'un axe transverse sur l'aide aux personnes fragiles dans lequel je m'investis. C'est une thématique avant tout appliquée, mais mes activités se nourrissent de l'expertise et des résultats scientifiques développés dans les autres thématiques. En parallèle, cette structuration de la recherche a connu quelques autres évolutions, comme la recomposition des UMR sur une logique de territoire plutôt que thématique, la dissolution des équipes de recherche de l'école au profit de celles des UMR, et

maintenant une forme de désengagement progressif du CNRS vis-à-vis des UMR où il se positionne comme partenaire secondaire. Pour autant, mes activités de recherche m'amènent à avoir naturellement des collaborations étroites avec mes collègues, tant à l'échelle de l'établissement, de l'IMT, que de l'UMR.

Mes activités d'enseignement portent essentiellement sur l'initiation à la programmation, la programmation système, les systèmes d'exploitation, et les réseaux IP. J'enseigne en tronc commun ainsi qu'en formation spécialisée, que ce soit en formation initiale, formation continue, formation d'ingénieur généraliste, formation en alternance, mastères spécialisés. Au fil des ans, le positionnement du profil d'ingénieur de l'école a évolué. Historiquement l'école était sur un profil d'ingénieur spécialisé en télécom, on y enseignait les diverses disciplines qui composent cette spécialité (informatique, réseau, électronique, radio, optique). Le spectre s'est élargi, pour viser un profil d'ingénieur "généraliste en télécom", pour afficher aujourd'hui un profil d'ingénieur "généraliste". Ce glissement au fil des ans des formations d'ingénieurs spécialistes vers généralistes s'est observé dans de nombreux établissements à l'échelle nationale, espérant attirer des étudiants se tournant habituellement vers des établissements prestigieux parisiens. Au-delà de cela, j'attache une grande importance dans mes enseignements à la réflexion et la prise de recul, mais aussi à une technicité pointue, à l'enseignement pratique, sur bancs de test ou en ateliers, ainsi qu'à la pédagogie par projets.

La suite de ce document expose les travaux que j'ai menés pour aborder la problématique des «Systèmes ambiants pour l'aide aux personnes dépendantes». Il s'agit d'un sujet pluridisciplinaire qui m'a amené à explorer différents champs de l'informatique et des réseaux, mais aussi à toucher du doigt les questions de sociologie des usages. En effet, même si ma personnalité me pousse à apprécier la beauté de la technologie en tant que telle, il s'agit avant tout de proposer des solutions qui marchent et qui servent. Les différents champs disciplinaires technologiques évoqués ici ont trait à : l'architecture logicielle, les systèmes distribués, les protocoles réseau, la sécurité, les interfaces humain-système, l'ergonomie, l'analyse de données. Leur présentation au fil de ce document se veut pédagogique, de manière à introduire chaque domaine, retracer les résultats produits, mais à exposer aussi comment ces domaines se combinent.

Le chapitre 1 présente le contexte, celui des personnes fragiles, en situation de dépendance et leur besoin d'autonomie. Il s'agit de comprendre nos utilisateurs, leurs besoins, leurs usages et habitudes. Il est alors possible d'élaborer une proposition technique. Dans nos travaux, l'angle choisi a d'abord été celui de services relationnels sur télé connectée, avant de s'ouvrir aux autres objets connectés du quotidien. Le chapitre 2 explore certains aspects liés à l'infrastructure Internet pour la fourniture de services de communication et de contenus multimédias. Le chapitre 3 retrace différentes approches visant à offrir un cadre de vie et un habitat plus "intelligent". Enfin, le chapitre 4 conclut ce mémoire et dresse des perspectives pour la poursuite des travaux de recherche.

Chapitre 1

Services relationnels et TV connectée

Le vieillissement de la population est une préoccupation très forte dans les pays occidentaux. L'augmentation significative de l'espérance de vie conduit à se préoccuper de l'amélioration de la qualité de vie des personnes âgées. «Les Français vivent de plus en plus longtemps, mais le gain de ces années à vivre n'est pas toujours associé à des années de vie en bonne santé.» [166].

Il existe un lien étroit entre le vieillissement et la solitude. Ce sentiment caractérise les personnes qui ne communiquent pas avec leur famille et leurs amis immédiats, et dont le nombre de contacts sociaux a considérablement diminué. Les enquêtes qui mesurent l'isolement social en France attestent que les personnes âgées sont nettement plus exposées que tous les autres groupes de populations au risque de «repli chez soi et sur soi» [124], en lien notamment avec des événements de rupture qui peuvent bouleverser le quotidien ou encore des phénomènes d'empêchement qui freinent les interactions sociales (départ à la retraite, éloignement des enfants, déménagement ou placement en centre de soin, décès du conjoint ou d'un proche, maladie, perte de mobilité, dépendance, sentiment de dévalorisation, etc.). En 2020, on estime que plus du tiers (36%) des personnes âgées 70 ans et plus sont isolées[181].

L'innovation numérique est aujourd'hui un enjeu majeur pour améliorer la qualité de vie, l'autonomie et la vie sociale des personnes fragiles [132]. Grâce à des plates-formes techniques adaptées et personnalisables, il semble possible d'améliorer la qualité de vie des personnes âgées vivant à domicile ou en maison de retraite en préservant, en améliorant ou en recréant du lien social.

1.1 Démarche de co-conception

La démarche de co-conception se définit comme une méthode de travail qui implique l'utilisateur final lors du processus de développement et de conception d'un produit ou d'un service.

Observant l'écart entre les usages prescrits et usages effectifs, les usages détournés, les ruses et bricolages mis en œuvre pour adapter les dispositifs selon les besoins [78], plusieurs travaux sur l'usage des objets techniques ont montré combien les usagers peuvent prendre place dans les processus d'innovation [90, 101].

Aussi, l'une des volontés de nos projets est d'intégrer le point de vue des usagers dans la conception afin d'élaborer le dispositif le plus approprié. Pour mener à bien cette tâche, nous avons sollicité nos collègues sociologues de l'Université de Bretagne Occidentale, spécialistes notamment des questions liées au vieillissement. Il s'agit de cerner au mieux les besoins exprimés et effectifs des usagers, de leurs aidants, de leur tissu relationnel. Sur cette base, une première proposition technique peut être imaginée par les équipes techniques, et soumise au regard d'usagers volontaires et par la médiation des sociologues. Puis, par des allers-retours successifs, une définition de solution se bâtit. Lorsqu'une proposition de solution fait consensus, elle peut alors être prototypée concrètement, puis déployée et expérimentée en situation réelle auprès

d’usagers volontaires. Dans le cadre de ces projets de recherche, le travail sociologique sur lequel nous nous sommes adossé répondait à trois objectifs : l’identification des services et des dispositifs techniques, le suivi de l’expérimentation et l’évaluation des usages.

Par cette approche de co-conception nous souhaitons nous inscrire dans un modèle de production coopérative en confrontant les points de vue des différents acteurs : les personnes âgées, leur entourage familial et amical, les professionnels qui côtoient ces personnes âgées, les acteurs locaux, politiques et institutionnels en lien avec les questions relatives aux personnes âgées. Par ailleurs, il importe d’éviter deux écueils typiques : le manque de prise en compte de l’usager au moment de la conception par le biais de représentations et d’a priori de besoins supposés, et des a priori selon lesquels l’âge ou les fragilités des personnes seraient un facteur limitant l’usage des technologies.

Nos projets d’innovation menés selon cette démarche conjuguant réalisation technique et proximité avec les usagers mettent en œuvre ces phases : identifier les besoins, développer la solution technique, expérimenter le prototype en situation réelle, analyser les usages constatés.

1.2 Caractériser le contexte et formaliser les besoins

1.2.1 Constituer un réseau de partenaires

Il s’agit dans un premier temps de rassembler autour du projet divers acteurs institutionnels, politiques, locaux, associatifs. Ainsi nous avons pu trouver des interlocuteurs volontaires au sein des structures suivantes :

- la mairie de quartier de Bellevue (projets TAPA, Companym@ges-APIA, Mazadoo), la mairie de Chevilly-Larue (projet SIGAAL),
- les Centres Communal d’Action Sociale (CCAS) des villes de Brest, Lannion, Chevilly-Larue,
- le Centre Départemental d’Action Sociale (CDAS) à Brest,
- les Centres Locaux d’Information et de Coordination gérontologique (CLIC) de Brest et de Chevilly-Larue,
- le Conseil Général 29 (pôle Personnes Agées / Personnes Handicapées),
- la Région Bretagne,
- les Caisses Régionales d’Assurance Maladie (CRAM) de Bretagne et du Centre-Ouest (CRAMCO),
- les Amitiés d’Armor (association gérant neuf maisons de retraite en Finistère),
- l’association Quêteurs de mémoire,
- l’association Office des Retraités de Brest (ORB),
- l’association TV Résidence
- l’Union des Associations de Retraités et Personnes Âgées du Finistère (UDARPA 29).

Ce large panel d’acteurs permet d’appréhender les différentes facettes du grand âge sur le territoire, les préoccupations et le regard que porte chacun sur ces questions. Concrètement, cela se traduit par des réunions de présentation des projets au démarrage et à différents points d’étape, réunions conduites par l’équipe de sociologues, mais avec l’accompagnement de l’équipe d’informaticiens.

1.2.2 Identifier les structures d’accueil de personnes âgées

Au-delà de cet ensemble de partenaires, intégrer les personnes âgées et leur entourage est essentiel dès le commencement de chaque projet. Il s’agit, d’une part, de les questionner en début de projet sur leurs besoins et, d’autre part, de constituer une cohorte de volontaires pour les tests qui suivront.

La structure d'accueil où sera conduite l'expérimentation doit être motivée par le projet, le personnel prêt à s'investir et la direction prête à laisser du temps au personnel pour s'y investir. Par ailleurs, s'il est fréquent que le personnel en charge des animations soit très enthousiaste, le personnel médical de son côté se montre traditionnellement plus circonspect (nécessité de s'appuyer sur un protocole de soins établi et validé). L'implication du médecin-référent de l'établissement est donc un plus, pour accréditer et valider l'intérêt du projet auprès du personnel médical.

La localisation géographique est également un élément important, car notre équipe technique doit pouvoir se rendre facilement sur les lieux pour les mises à jour et la maintenance du prototype déployé. Il convient également de s'assurer de la qualité du raccordement à Internet de l'établissement (p.ex. le réseau Mégalis en Bretagne), et des possibilités techniques pour sa distribution dans les chambres des résidents. À ce propos, les établissements même les plus récents n'étant pas pourvu de câblage Ethernet en interne, plusieurs technologies ont été déployées au cours de nos projets : WiFi, ADSL indoor sur le réseau téléphonique interne, CPL sur câble TV.

À ces critères pour identifier une structure, s'ajoute la question de l'inclusion des testeurs pour les expérimentations. Il convient d'abord de définir le niveau de dépendance des personnes âgées qui doivent constituer notre échantillon. Si nous retenons des personnes en situation de handicap, elles doivent avoir les capacités cognitives pour donner leur consentement éclairé pour leur participation à une telle expérimentation et, d'autre part comprendre à minima les services proposés. Pour apprécier le niveau de dépendance de personnes fragiles, les professionnels du domaine et les services de l'état s'appuient sur un référentiel, la grille AGGIR (Autonomie Gérontologie Groupe Iso-Ressources). Les participants inclus pour les expérimentations à domicile étaient généralement en GIR 3 (personnes ayant conservé leur autonomie mentale, partiellement leur autonomie locomotrice, mais qui nécessitent plusieurs fois par jour des aides pour leur autonomie corporelle), voire en GIR 4 pour les expérimentations en établissement de soin (personnes n'assument pas seules leur transfert pour le levé, qui doivent parfois être aidé pour la toilette et l'habillage, ou pour les activités corporelles et les repas).

Il y a enfin la question de la taille de notre échantillon. Le nombre de personnes accueillies dans l'établissement doit être suffisant pour que le nombre de résidents intéressés et prêts à participer au projet ne soit pas trop faible. Nous avons cherché à constituer des échantillons de 12 personnes en moyenne pour les projets s'adressant aux personnes âgées en résidence (Companym@ges-AIPA, Mazadoo, AMALYS, cf. 5.3.2 5.3.4 5.3.5). Sur la durée des projets, environ un tiers des participants se sont retirés.

Concernant les projets ciblant les personnes âgées à domicile (T@PA, SIGAAL, cf. 5.3.3), la même question se pose pour identifier le lieu des expérimentations et les participants. En revanche, l'interlocuteur est alors naturellement le bailleur social de la zone géographique ciblée. Il s'est agi de la mairie de quartier de Bellevue à Brest pour le projet T@PA, et de la mairie de Chevilly-Larue pour SIGAAL (et en lien avec ICADE). En revanche, les contraintes de déploiement technique chez des particuliers imposaient de limiter la cohorte à seulement deux participants en moyenne. Nous avons dû également faire ce choix pour les projets Lannilis et M@LIS (cf. 5.3.1). La stratégie étant d'accumuler les expériences acquises par chaque projet. Une faible cohorte ne permet évidemment pas une généralisation des résultats et observations obtenus, mais permet de valider les fonctionnalités du service et son acceptabilité [83, 93, 159].

1.2.3 Identifier les attentes et les besoins

Cette phase a pour objectif de définir les services que devra offrir la plate-forme, les services destinés aux personnes âgées, ainsi qu'à leur entourage, familial, amical et professionnel. Il s'agit pour cela de mettre à jour et de croiser les différentes représentations que peuvent avoir

les différents acteurs à propos de la technologie, et de favoriser l'imagination. Les sociologues s'appuient sur deux concepts : l'*objet-valise* qui correspond à une étape d'indétermination tant des fonctions que des usages, où toute la gamme de possibles reste ouverte, et l'*objet-frontière* qui est le fait de choix pour lever les ambiguïtés, dissiper les confusions, passer de l'utopie à la réalité, de l'abstraction à la concrétisation [94].

Cette enquête prend la forme d'une démarche qualitative fondée principalement sur des entretiens, qui débutent sur une présentation formelle du projet, puis enchaînent sur des discussions informelles. Les entretiens de groupe (type *focus group*) permettent de provoquer des discussions ouvertes entre participants. Cette méthode reconnaît aux participants leur qualité d'experts en leur donnant la parole et en favorisant leur implication. La constitution de ces groupes tient compte d'un impératif d'effectif : il convient d'éviter de dépasser la dizaine de participants. On s'attache également à ne pas bousculer la typologie des participants et les sphères de dialogues habituelles : respecter la hiérarchie entre cadres dirigeants des établissements d'une part, et cadres techniques et de soin d'autre part, les personnes extérieures constituant par exemple un conseil de vie sociale de l'établissement, tel que les représentants des familles et des résidents, les adjoints de la mairie en charge de l'action sociale et de la solidarité, etc.

Des entretiens individuels sont également requis, en particulier avec les personnes âgées elles-mêmes. Ces entretiens sont l'occasion d'identifier les pratiques, les représentations qui les sous-tendent, et de comprendre les significations accordées à ces pratiques. On parle ici de pratiques de l'utilisateur pour lui-même au travers de l'objet technique, mais également de pratiques entre l'utilisateur et ses aidants. Ces entretiens visent à répondre à trois types de questionnement : (i) identifier les différentes configurations relationnelles autour de la personne âgée dépendante (familiales, voisinages, amicales, professionnelles), (ii) les attentes de la personne âgée à propos des services que pourrait rendre l'objet technique (d'une part vis-à-vis de sa dépendance, mais aussi vis-à-vis de ses centres d'intérêt, loisir, culture, etc.), et (iii) les connaissances, compétences, motivations, freins et usages au quotidien de la personne âgée concernant les objets techniques déjà côtoyés (télévision, téléphone, téléalarme, etc.).

1.2.4 Traduire les besoins en gamme de services

Les entretiens individuels et collectifs permettent de dresser des cas d'utilisation et des scénarios. Un *cas d'utilisation*, tel que défini en génie logiciel, est un outil qui exprime, voire modélise, les interactions d'un utilisateur avec le système pour une tâche donnée. Un *scénario* est un agrégat de cas d'utilisation. Finalement, l'écriture de ces scénarios permet aux différents acteurs du projet de partager le même objectif et la même définition du système à bâtir.

Cette démarche peut recourir également à des *personas*. Cet outil, initialement formalisé dans les domaines du marketing et de l'ergonomie, a été employé avec succès dans d'autres domaines, comme pour la définition de services aux personnes fragiles [160]. L'idée générale consiste à définir un ou plusieurs personnages fictifs, avec une identité, des traits de personnalités et des caractéristiques sociales ou physiques en rapport avec le domaine d'étude, de telle sorte que le personnage puisse apparaître comme un individu représentatif et crédible d'un groupe d'utilisateurs cibles, car faisant la synthèse des caractéristiques générale du groupe. On peut alors faire jouer ce personnage, lui écrire des scénarios et le mettre en scène dans des usages du système que l'on cherche à concevoir.

Le recours à des *personas* réduit la généralité des cas d'utilisation et scénarios puisque ceux-ci sont alors déroulés pour une personne précise (même fictive), laquelle, cependant, se veut représentative d'un groupe d'utilisateurs. L'avantage dans une démarche de co-conception est que cela permet à l'utilisateur réel que l'on questionne de se projeter sur ce personnage fictif et, indirectement, d'incarner le système en construction. Cela offre une représentation concrète et parlante pour les usagers. En effet, après avoir élaboré ces *personas*, cas d'utilisation et

scénarios sur la base des données collectées en entretiens avec les utilisateurs, il convient ensuite de retourner vers eux pour les leur présenter (prévoir des visuels, maquettes, montages photos et animations), et ainsi faire valider, voire ajuster ces scénarios. Le résultat de ce travail de co-conception est alors un panel de scénarios consolidés.

Une alternative possible pour les projets qui ne peuvent dérouler cette démarche de co-conception consiste alors à produire ces scénarios ex nihilo. En fait, en absence d'utilisateurs à questionner réellement, les expériences personnelles de l'équipe projet, l'expertise accumulée, les représentations, voire les a priori peuvent être exploitées pour produire ces scénarios qui sont à la base de la conception du système à bâtir. Parfois, cela peut être un simple glissement ou transposition de résultats d'autres projets de co-conception. Dans ce type de situation, il convient cependant de bien mesurer le risque potentiel de déphasage avec les attentes réelles.

Dans le cadre de nos projets, les besoins identifiés peuvent être regroupés en quatre catégories principales et qui apparaissent par ordre d'importance comme suit :

- Communiquer avec ses proches – Les entretiens menés lors de nos projets font remonter cette fonctionnalité au premier rang des besoins exprimés. Les personnes fragiles vivant à domicile voient, factuellement, leur tissu social se déliter au fil du temps (arrêt progressif des activités sociales, professionnelles, sportives, culturelles, départ des enfants menant maintenant leur vie d'adulte, etc.). Ce risque d'isolement est également une appréhension supplémentaire qui accompagne l'entrée en institution des personnes âgées, même si dans les faits cela ne s'accompagne pas nécessairement d'une rupture des liens familiaux [102], avec des visites des enfants mensuelles ou parfois hebdomadaires. Pour autant, cela reste une préoccupation pour les personnes âgées. Ces visites, ou ces messages des proches sont très attendus et souvent perçus comme insuffisants. Il y a une réelle attente pour le maintien, voire la réactivation des relations entre la personne âgée et ses proches. Par proches, nous entendons ici les différents réseaux relationnels de la personne âgée, et pas seulement le réseau familial ; d'autant plus qu'il y aurait factuellement certaines limites à faire appel systématiquement et uniquement à la famille.

Les personnes rencontrées évoquent les modalités suivantes :

- Recevoir des messages écrits et des photos de la part des proches par un média numérique peut convenir tout aussi bien qu'en version papier. La complexité des appareils numériques est rarement évoquée et ne semble pas faire l'objet de craintes particulières. En fait, les choix se portent naturellement sur un appareil bien maîtrisé au quotidien : la télévision. Les messages et photos personnels doivent être consultables sur la télévision. Par contre, il importe de permettre aux personnes âgées de répondre à leurs proches, pour que l'interaction et les liens sociaux se fassent réellement.
- Traditionnellement, la téléphonie est le média le plus utilisé pour le besoin de communication avec les proches. Il y a cependant une demande pour le rendre plus simple et plus agréable. Très concrètement, il s'agit d'afficher le nom et la photo des contacts, par exemple sur la télévision, tant pour passer un appel que lors de la réception d'un appel. Notons que l'on parle ici du bon vieux combiné téléphonique ; les rares utilisateurs d'un smartphone disposent déjà de ce type de fonctionnalité.
- La visio-conférence est naturellement évoquée, et fait envie. Cependant se posent alors des questions de pudeur liées au fait d'être filmé dans sa chambre, ou à des moments où la personne âgée n'est pas coiffée, pas apprêtée. Des solutions d'organisation sont alors discutées, par exemple aménager un lieu dans l'établissement, dans des espaces communs, mais avec une certaine intimité, où la personne âgée pourrait se rendre pour faire une visio-conférence, lorsque celle-ci a été prévue à l'avance.
- S'informer, accéder aux informations locales ciblées – Le repli sur soi de la personne âgée est une crainte sérieuse. De fait, l'érosion de la mobilité avec l'âge impacte la manière dont la personne s'inscrit dans la vie et le territoire local. Les déplacements

dans le quartier deviennent sporadiques, limités, et parfois même au seul périmètre du logement. Autant les informations nationales, voire internationales, sont accessibles par les médias traditionnels (télévision, radio, journaux), autant la vie locale du quartier devient inaccessible : travaux de voirie au bout de la rue que l'on entend, mais dont on ne sait finalement rien, réalisations et activités des associations, etc. La dimension locale prend toute son importance. À cela s'ajoute l'envie de ne pas être soumis à l'écoute passive et au bon vouloir de personnes intermédiaires qui relate des informations, mais au contraire d'être acteur de sa prise d'information, et pourquoi pas commentateur : l'envie d'une certaine réintégration dans la vie locale.

Ce besoin s'incarne dans des services concrets que pourrait rendre la plate-forme :

- Informations locales des associations, journal de la mairie de quartier, articles, photos, vidéos ;
 - Accès aux articles du Télégramme (média traditionnel à Brest, et partenaire de plusieurs de nos projets), en lien avec le territoire et les centres d'intérêt de la personne âgée ;
 - Accès aux reportages type "JT Web" réalisés par le Télégramme.
- Notons que si la télévision reste le média plébiscité, cela convient mal à l'affichage de textes ou d'articles de presse, d'autant plus que la déficience visuelle accompagne le grand âge. De ce fait, les technologies de vocalisation automatique suscitent un réel intérêt. Cela vaut également pour les messages écrits envoyés par les proches. Il importe que cette vocalisation soit de qualité, et expressive. Par contre, pour ce public, il apparaît qu'il y a bel et bien un besoin distinct entre la vocalisation automatique d'un écrit, et écouter une personne réelle parlant librement (même enregistrée, vidéo, audio).
- Gérer le quotidien – Les services imaginés autour de cette thématique proviennent avant tout de la part de l'entourage, même si finalement la personne âgée vient à y adhérer. Pour schématiser, il s'agit donc d'expression de besoins de services qui peuvent aider les personnes de l'entourage à gérer le quotidien de la personne âgée, plus que de services qui peuvent aider la personne âgée à se gérer elle-même. Cela est particulièrement flagrant dans un contexte de personnes âgées en institution. Cela est probablement dû au fait que le quotidien fait alors l'objet d'une gestion précise en institution (soins, repas, activités), et que les personnes hébergées relèvent d'un degré de dépendance supérieur.
 - Menus de la semaine, éventuellement accompagnés de la recette, ou d'idées de recettes pour les personnes voulant se préparer leur repas elles-mêmes. Se nourrir est un élément important de l'autonomie. Même si toutes les personnes ne sont plus nécessairement en capacité de se préparer elles-mêmes leur repas, le menu reste un sujet de préoccupation et d'implication dans un certain niveau d'autonomie au quotidien. Il véhicule, plus avant, un aspect psychologique majeur.
 - Planning des activités proposées aux résidents en établissement, ou pour les personnes à domicile, des activités proposées par les services sociaux de la mairie ou des associations. Ce service pourrait être complété par un journal de bord, avec des photos et commentaires des activités passées.
 - Les consignes thérapeutiques, avec des rappels pour la prise de médicaments. Au contraire des deux précédents, ce service serait nécessairement personnalisé. Il s'est posé également la question d'une validation ou confirmation de l'utilisateur lorsqu'il a pris son traitement ; mais cela semble ne pas faire l'unanimité : les gens (âgés ou pas) ayant l'habitude de cliquer sur ok de façon machinale, cette confirmation n'est pas probante. Le service s'étend naturellement à un service d'agenda personnel, avec les visites médicales planifiées, et des rappels.
 - Jouer seul ou à plusieurs – Cette thématique a été initialement suggérée par les équipes d'informaticiens, probablement plus enclins aux consoles, jeux sur ordinateurs, jeux en

ligne. Pour autant, l'idée a séduit rapidement tant les personnes âgées elles-mêmes que le personnel des institutions. Il s'agit de jouer, aussi bien par plaisir ou avec un objectif de (re)stimulation cérébrale ou physique. En institution, des parties se mettent en place régulièrement dans les salles collectives (cartes, dominos). Des jeux de mémoire et de stimulation cognitives, encadrées par un animateur, sont régulièrement proposés aux personnes atteintes ou non de la maladie d'Alzheimer.

La suggestion naturelle consiste donc à adapter ces jeux et exercices à une utilisation interactive, plus individualisée, et sur un écran de télévision. Des jeux dédiés aux personnes âgées existent, mais nécessitent un ordinateur ou une tablette, supports finalement peu prisés de notre public. La plate-forme du projet offrirait donc un support technologique déjà apprécié et maîtrisé à ces jeux, avec comme particularité de proposer une personnalisation : par exemple, des jeux basés sur des photos de famille, ou sur des morceaux de musique ou sujets, choisis par la personne âgée, ou proposés par des proches.

L'autre particularité est que la plate-forme pourrait proposer des jeux à plusieurs, de manière synchrone ou asynchrone, avec des proches, ou comme cela a été parfois suggéré, en équipe entre personnes âgées d'établissement différent, ou entre personnes âgées vivant à domicile et mis en relation par la plate-forme.

1.2.5 Formuler des choix techniques

Les choix techniques découlent des services imaginés. Pour autant, certains aspects des services en question ont été évoqués en ayant en tête une certaine idée de la manière dont ils pourraient être rendus, et donc de certains choix techniques. Ces deux étapes, identification des services et choix techniques, ne peuvent être parfaitement sérialisées ni cloisonnées. Il y a nécessairement une certaine porosité entre les deux questionnements. La stratégie de co-conception accompagne ce phénomène en proposant plusieurs itérations, plusieurs allers-retours entre utilisateurs finaux et équipes techniques.

Par choix techniques, nous entendons en fait l'interface homme-machine : par quels objets techniques l'utilisateur va pouvoir accéder aux services. Pour le reste, l'architecture du système, les problématiques réseau, logiciels, serveurs, bases de données, etc. sont quant à elles étudiées ultérieurement.

Très rapidement est apparue la nécessité impérieuse de s'insérer avec discrétion dans les habitudes de vie. Les personnes âgées, comme le reste de la population, ont certes leurs routines et un cadre de vie qu'elles se sont forgés, mais acceptent parfaitement les changements et la nouveauté, contrairement à ce que voudraient les stéréotypes sur le grand âge. L'enjeu étant de trouver le cadre dans lequel cela peut s'inscrire, et ne pas rentrer dans les zones d'inconfort. Cela passe par des éléments très concrets. Par exemple, il n'est pas envisageable d'opérer des réaménagements dans le lieu de vie : ainsi l'installation d'un ordinateur implique l'aménagement d'un "coin bureau". Toujours sur la question de l'ordinateur, notre population a certes connu l'ordinateur, mais très rarement dans un cadre de loisir, toujours dans un cadre professionnel, avec son lot de contraintes sur lesquelles notre public a tourné la page. La tablette numérique a, entre temps, connu son heure de gloire, suscitant l'intérêt avec sa promesse d'un usage simple et intuitif, et sa connotation moderne qui motive également les personnes âgées. Pour autant, la tablette a des contraintes : si elle convient bien pour des usages ponctuels, un usage prolongé génère une fatigue dans les bras et les poignets (elle peut se révéler lourde, et nécessiter l'aménagement d'un support type pupitre pour les poser), et il faut penser à la recharger régulièrement, avec des connecteurs petits et peu commodes à raccorder notamment en cas d'arthrose ou de troubles visuels. Sur le marché existent quelques appareils proposés spécifiquement à destination des personnes âgées, avec une ergonomie et des adaptations qui, fonctionnellement sont

pertinents, mais qui, revers de la médaille, deviennent stigmatisants, marqueur de la vieillesse ou du handicap, et qui renvoient cette image tant aux yeux de l'entourage que de l'utilisateur lui-même ; bref, qui posent des questions d'acceptabilité.

Ainsi, les discussions ont conduit à se tourner vers un dispositif technique déjà présent au domicile, installé dans un environnement confortable, souvent central dans le quotidien et l'habitat, et bien maîtrisé par nos usagers : la télévision. La plate-forme de service doit donc utiliser comme terminal utilisateur la télévision, raccordée à un boîtier dédié (après tout, il est classique d'ajouter des périphériques à la télévision : lecteur VHS, DVD, décodeur de chaînes payantes, console de jeux, etc.). Il convient de proposer un boîtier discret (faible encombrement, silencieux, et ne faisant pas penser à un PC ou un ordinateur de bureau). Une attention particulière est portée au choix et à l'ergonomie de la télécommande, qui est finalement le seul objet tangible de la plate-forme de service, et donc le point d'entrée de l'acceptabilité du système. Pour quelques services, le téléphone (autre objet technique déjà présent et bien maîtrisé) est exploité par la plate-forme. Reste la problématique du câblage : on ne veut pas avoir des fils partout (tant par esthétisme que par peur de se prendre les pieds dedans) ; on privilégie donc des technologies type WiFi ou CPL.

1.3 Développement de la solution technique

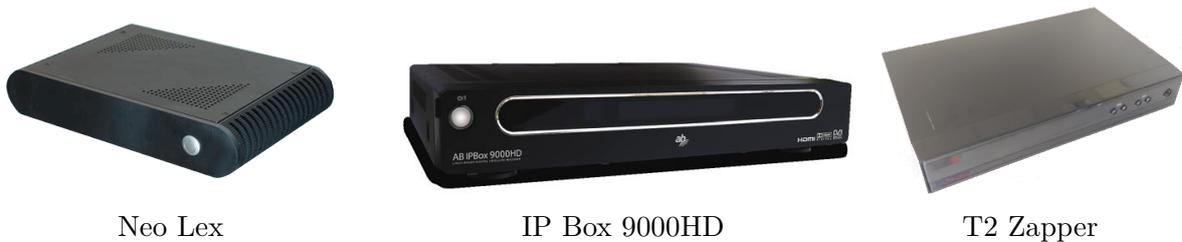
Les utilisateurs finaux retiennent comme choix de terminal d'accès : la télévision, rare dispositif technique à être parfaitement intégré dans le quotidien et les usages de la population visée, une réponse légère et non invasive. Concrètement, cela implique : un boîtier TV, une télécommande adaptée, des pages web pour les personnes de l'entourage, des serveurs.

1.3.1 Boîtier TV

Pour mettre en œuvre ce choix du terminal TV, il convient en premiers lieux de choisir un équipement, typiquement un boîtier informatique disposant d'une sortie vidéo à raccorder à la télévision de l'utilisateur, et sur lequel nous puissions déployer nos logiciels. Autres critères : cet équipement doit être discret, peu encombrant (il n'y a pas forcément beaucoup de place autour de la télévision dans le salon de nos usagers ni l'envie de chambouler l'aménagement de son intérieur), non bruyant (pas de bruits de ventilateurs ou de disque dur comme sur un ordinateur de bureau), et ne pas faire penser par son esthétisme à un ordinateur de bureau justement (rappelant le monde du travail). Pour autant, cet équipement informatique doit avoir la puissance de calcul suffisante pour exécuter nos applications. En termes de connectivité, cet appareil doit disposer d'une sortie vidéo raccordable à un téléviseur, d'une interface Internet, et d'un récepteur pour la télécommande. Dans certains cas, on peut également s'intéresser à des appareils dotés d'entrées pour recevoir le signal de l'antenne télé ou satellite.

On trouve ce type d'équipement dans le monde des décodeurs télé, chaînes payantes, par l'antenne, le câble, le satellite, et maintenant Internet. On les désigne sous le terme de *Set Top Box* (STB). Pour autant, tous les critères énoncés ne sont pas nécessairement remplis. Bien généralement ce sont des équipements peu, voire pas du tout, ouverts aux logiciels tiers. De plus, pour des raisons de coût, ce sont des équipements aux capacités matérielles réduites au strict nécessaire pour assurer les services pour lesquels ils sont distribués par les opérateurs. La figure 1.1 illustre les différents équipements que nous avons sélectionnés pour nos projets.

Dans le cadre des projets T@PA et M@LIS nous avons opté pour une solution de type mini-PC dédié à de l'embarqué (Neo Fanless de Lex System) : un appareil compact (de la taille d'un gros livre), d'allure robuste (un boîtier en aluminium), sans ventilateur (c'est justement le boîtier qui permet la dissipation thermique passive), et doté des performances comparables à un petit ordinateur portable (CPU Celeron 1Ghz, 1GB RAM, HDD 160Go, Ethernet, USB utilisé



Neo Lex

IP Box 9000HD

T2 Zapper

FIGURE 1.1 – Différents boîtiers TV utilisés dans nos projets

pour ajouter une interface WiFi, RS232 utilisé pour le récepteur infrarouge de la télécommande, et sortie vidéo composite raccordée à la télévision). De fait, cet équipement se configure comme un ordinateur personnel : installation du système d'exploitation et des applications sur le disque dur. Par contre, son usage implique que l'utilisateur commute de source vidéo sur son téléviseur, puis utilise la télécommande dédiée. Pour notifier l'arrivée d'un nouveau message ou photo alors que l'utilisateur regarde la télé, nous faisons clignoter une led présente sur le boîtier du récepteur infrarouge de la télécommande. Il y a donc une certaine séparation entre l'usage de notre dispositif et l'usage de la télé. Cela est parfois souhaité (la distinction est clairement comprise et assimilée par nos utilisateurs), mais cela introduit un certain cloisonnement des usages.

Pour obtenir une meilleure intégration de nos services avec l'usage de la télévision (projet Companym@ges), nous nous sommes intéressés à du matériel dédié (IP Box 9000HD). Ces plates-formes s'apparentent également à des mini-PC, mais disposant de cartes d'acquisition du signal d'antenne télé (ou câble, ou satellite). Le firmware proposé offre un système d'exploitation de type Linux, mais avec des drivers et applications dédiés à la télévision. Il est ainsi possible de zapper de manière fluide entre les chaînes de télévision et les écrans de nos services, et même d'afficher une notification en surimpression par-dessus le flux télé. Ces appareils sont par contre assez encombrants (de la taille d'un gros lecteur de VHS), et impliquent donc un certain aménagement du coin télé chez nos usagers. Dans le cadre des projets suivants (Mazadoo, SIGAAL), et grâce à nos partenaires industriels spécialisés dans la réalisation et la programmation de STB (iWedia, racheté par SmarDTV), nous avons opté pour des équipements plus compacts (de la taille d'un livre) spécialisés pour le *Digital Video Broadcasting Terrestrial* (DVBT) (T2 Zapper STi7105 de PESI.tw, avec le firmware Comedia), intégrant le support matériel pour le décodage des différents signaux TV et formats MPEG. Ces équipements offrent une expérience d'utilisation identique aux produits du commerce.

1.3.2 Télécommande

La télécommande est l'objet concret qui incarne le dispositif aux yeux de nos usagers. C'est le point d'entrée dans les services que l'on propose. C'est un élément incontournable de l'acceptabilité de nos solutions. Il convient donc de porter une attention toute particulière au choix de la télécommande que l'on va intégrer à notre dispositif.

Nos usagers se font une idée très précise des télécommandes : il y a celles qui sont «simples» (comme celle de la télévision, qu'ils utilisent chaque jour et connaissent bien), et il y a celles qui sont «compliquées» (magnétoscope, lecteur DVD, chaîne HiFi, etc. avec trop de boutons, et aux fonctions confuses). À ceci s'ajoute la critique qu'il y a «trop» de télécommandes à la maison ; mais pour autant, les solutions de télécommande universelle (parfois proposées par la famille) ont peu de succès : mis à part qu'il faut quelqu'un d'averti pour les configurer, elles ont également pleins de boutons, c'est une télécommande de plus, et on ne sait jamais trop quel appareil elle est en train de piloter à l'instant t. Bref, introduire notre propre télécommande avec notre système reste une contrainte, mais finalement pas si problématique que cela. Par



FIGURE 1.2 – Différentes télécommandes utilisées dans nos projets



FIGURE 1.3 – Adaptation de la télécommande pour un usager

contre, critère majeur d'acceptabilité : cette télécommande doit être simple, peu de boutons, similaires à une télécommande de télévision. La figure 1.2 illustre les différentes télécommandes utilisées dans nos projets.

Dans le cadre des projets T@PA et M@LIS, le mini-PC utilisé n'offrait pas de service TV en lui-même et était dédié uniquement à nos services. La télécommande n'a donc pas besoin des touches nécessaires au visionnage des programmes télé (chaînes, volume). Aussi, celle choisie (Weemote) comportait peu de touches (uniquement les flèches de navigation, le bouton ok, et quelques touches de couleur pour des accès directs à des menus), des touches de formes distinctes, et de grandes tailles. Notons que le fabricant proposait cette télécommande en deux variantes. L'une était supposément dédiée aux enfants avec des couleurs vives (qui séduisent), et une bordure en caoutchouc pour la protéger des chutes (chose qui rassure nos usagers). C'est cette version qui a été choisie par nos expérimentateurs, au détriment du modèle supposément dédié aux seniors qui comportait des couleurs sobres et sombres, esthétique qui ne séduit pas vraiment, et même jugé faisant cliché à propos des goûts supposés des personnes âgées. On peut observer que nos usagers ont deux façons d'utiliser la télécommande : d'une seule main (télécommande calée au creux de la paume, et le pouce seul appuie sur les touches, à condition qu'elles soient toutes accessibles de cette manière, ce qui est le cas avec ce modèle pour la plupart de nos expérimentateurs ; et avec le regard tourné plus volontiers vers l'écran de télé), ou bien à deux mains (télécommande dans une main, l'autre main utilisée pour appuyer sur les touches, modalité adoptée dans le cas de télécommandes plus grandes ; et avec le regard bien souvent porté sur la télécommande pour repérer les touches à sélectionner). Dans le cadre du projet M@LIS, l'un des enfants participants ayant des troubles moteurs, une adaptation a été proposée : la télécommande était fixée à une planchette large et antidérapante qui stabilise la télécommande lorsqu'elle est posée sur la table du salon, et permet à l'enfant d'actionner lui-même les touches avec sa main valide (voir figure 1.3). Cet exemple illustre le besoin de considérer les cas individuels.

Dans le cadre du projet Companym@ges, nous avons opté pour un boîtier télé intégrant la réception du flux TV. Aussi, la télécommande choisie (URC 7210) comporte les touches classiques pour l'usage de la télévision (chiffres pour les chaînes, boutons programme+ programme-, boutons volume+ volume-). Elle comporte en outre quatre touches de couleur standard employées pour la navigation dans les services télétextes (services historiquement proposés avec

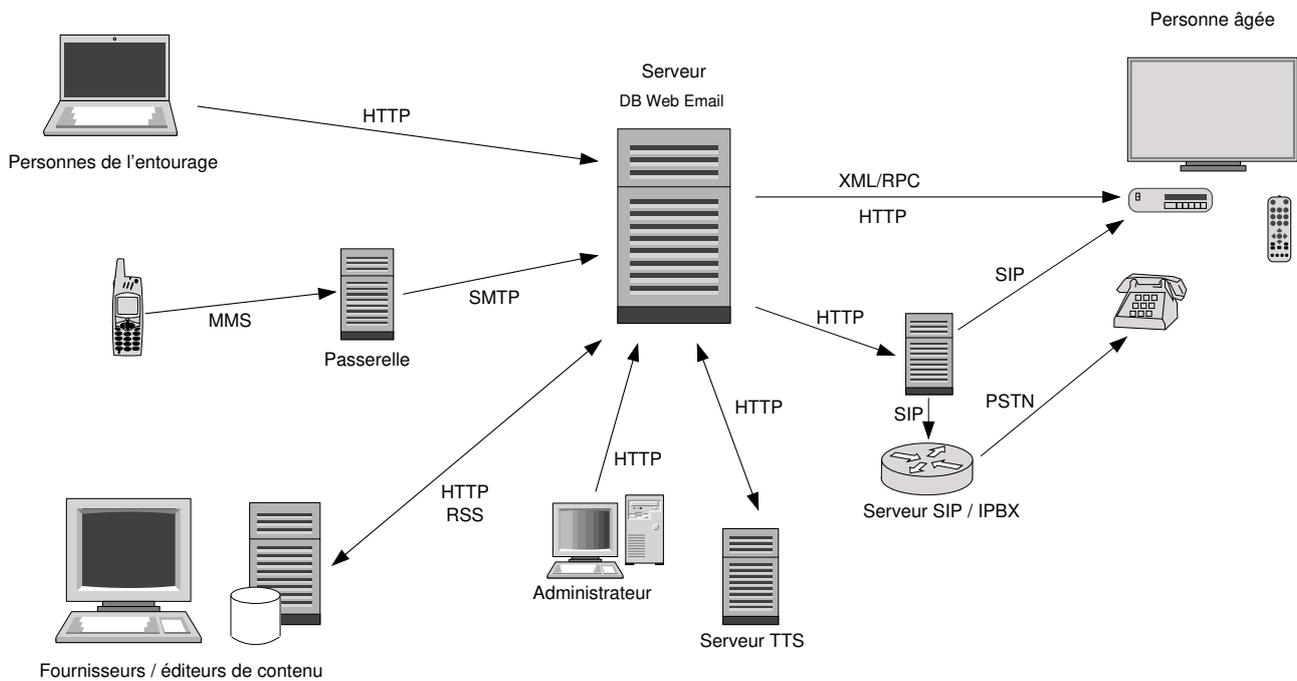


FIGURE 1.4 – Architecture générale de la plate-forme de services relationnels

la télévision analogique, pour le sous-titrage, mais aussi des services comme des horoscopes, des petites annonces, des jeux-concours, la météo, etc.) Pour nos services, nous utilisons ces touches de couleur en plus des touches de flèches pour permettre à l'utilisateur de naviguer dans les menus et pages de nos services. Cette télécommande est appréciée, car les touches sont en relief et très contrastées. De plus, une petite led clignote chaque fois qu'une touche est appuyée, information de retour signifiant aux utilisateurs (qui ont généralement perdu de la sensibilité au bout des doigts) qu'ils ont bien appuyés sur une touche.

Dans le cadre des projets Mazadoo et SIGAAL, puisque nous avons choisi un boîtier télé différent (plus compact, plus performant, mais imposant des contraintes sur le support des protocoles infrarouge RC5 et RC6, sans compter que la précédente télécommande n'était plus commercialisée), nous avons dû sélectionner une nouvelle télécommande (Meliconi Senior2). Cette nouvelle télécommande comporte quelques boutons supplémentaires, qui restent cependant en nombre acceptable, d'autant plus que nous ne les utiliserons pas. Les touches sont également de bonne taille et bien contrastées. Elle comporte aussi une petite led qui indique l'appui sur une touche, ainsi qu'une bordure en caoutchouc.

Tous ces critères sont précieux pour notre public : touches de grande taille, en relief, contrastées, peu nombreuses, indication lumineuse lors de l'appui d'une touche, bordure antichoc. Il est assez surprenant de constater que les constructeurs, qui renouvellent leur catalogue régulièrement, ne gardent pas toujours les choix de conception qui sont appréciés sur les précédents modèles pour les transposer aux nouveaux modèles. Le choix d'une télécommande adaptée est un élément majeur d'acceptabilité et d'adhésion au dispositif.

1.3.3 Serveurs et architecture informatique

Le système envisagé a pour but de mettre en relation des personnes âgées et des personnes de leur entourage par le biais de systèmes numériques et de communication ; bref, des serveurs, des ordinateurs, du logiciel, et Internet.

La figure 1.4 synthétise l'architecture générale du système, tel qu'elle a pu se décliner et se raffiner au fil des évolutions des projets.

Le serveur central propose un portail Web permettant aux personnes de l'entourage de déposer messages et photos. Les envois par MMS sont également possibles (projets T@PA M@LIS) via une passerelle (SFR) qui les encapsule dans des emails avec des adresses spécifiques, et réceptionnés par le serveur central.

Les fournisseurs de contenus sont de nature très divers, et des adaptations spécifiques sont réalisées suivant les modes de fourniture des contenus. Lorsqu'il s'agit de contenus édités spécifiquement pour nos projets (mairie de quartier, associations de bénévoles, animatrices de maison de retraite), les personnes en charge de cette activité disposent d'un portail Web dédié. Certains contenus sont des articles mis en ligne par les éditeurs sur leurs propres sites (Le Télégramme, Âge Village), les contenus sont alors récupérés par notre serveur au moyen de flux RSS. Et, pour récupérer les contenus Facebook, notre serveur utilise les API dédiées.

Le serveur de vocalisation TTS (Text To Speech) est fourni et hébergé par un partenaire (solution Nuance par Alcatel-Lucent pour les projets Companym@ges et Mazadoo, Voxygen pour le projet SIGAAL) et est accessible par une API web (envoi du texte formaté, récupération d'un fichier audio wav).

Les services mettant en jeu le téléphone de la personne âgée nécessitent que notre plate-forme puisse s'interfacer avec la téléphonie analogique classique. Pour les projets déployés en maison de retraite (Companym@ges, Mazadoo), nous avons pu installer un commutateur téléphonique (OXE Alcatel) dans les locaux, et y raccorder les lignes téléphoniques des occupants, en prenant soin de ne pas perturber l'utilisation habituelle de leur téléphone ni les problématiques de facturation. Cet équipement est un IPBX, permettant l'interconnexion entre la téléphonie analogique (PSTN) et la téléphonie sur IP (SIP). De cette manière, notre serveur central peut piloter le déclenchement d'appels et proposer à la personne âgée d'enregistrer un message vocal via son téléphone habituel. De plus, la solution SIP propose, en plus de la téléphonie, un mécanisme de messagerie instantanée que l'on utilise pour pousser des notifications *pop-up* et URL de pages à afficher sur la télévision (la STB intègre agent SIP qui traite ces messages). La solution SIP en établissement implique l'ajout d'un équipement type SBC (Session Border Controller, fourni par le partenaire Comverse) qui va jouer le rôle de pare-feu applicatif.

Dans le cas de déploiement chez des particuliers (projet SIGAAL), l'approche choisie pour la téléphonie est différente en termes d'équipements, mais similaire en termes de fonctionnalités. Le serveur de téléphonie (solution Cipango fournie et hébergée par le partenaire Nexcom) permet de faire le lien entre la téléphonie sur IP et la téléphonie analogique. De plus, il permet de proposer de la visiophonie sur IP directement entre les personnes de l'entourage (utilisation d'un logiciel *softphone* développé par Nexcom et intégré dans le portail Web, et donc utilisable dans le navigateur de l'ordinateur de l'utilisateur) et le poste de la personne âgée (séparation du flux de la webcam de l'interlocuteur affiché sur la télé, et du flux audio sur le téléphone). Il est possible de déclencher des appels, pour mettre en relation la personne âgée avec l'un de ses contacts qu'elle aura sélectionné sur sa télé (fonction dite de *clic-to-dial*), de faire sonner son téléphone pour diffuser un message audio de notification, ou pour lui permettre d'enregistrer et déposer un message à l'attention d'une personne de son entourage. Comme précédemment, les fonctionnalités de messagerie instantanée sont utilisées pour l'affichage de notifications sur la télé (la STP inclue là encore un agent SIP), mais c'est également cette même technologie qui permet d'implémenter le service de navigation conjointe entre personne âgée et personne de l'entourage pour consulter les albums photo. D'un point de vue réseau, l'utilisation du protocole SIP chez les particuliers implique des précautions dans la configuration de leur pare-feu Internet. Les solutions plus récentes autour des mécanismes WebRTC permettraient de s'affranchir de cette contrainte, sans toutefois offrir l'interconnexion avec la téléphonie traditionnelle, mais qui peut se faire sans impacter le réseau Internet chez les particuliers.

Dans notre infrastructure, le serveur central a un rôle d'orchestration global des actions et des flux de données. Pour nos premières réalisations (T@PA M@LIS), le développement de son

logiciel était basé sur la technologie XML/RPC, jugée plus performante que SOAP/WSDL [17]. Il s'agit avant tout de structurer ce logiciel en le décomposant en services, décrits précisément, accessibles et utilisables par les autres composants, éventuellement au travers du réseau. Ces services sont organisés en couches : (i) services support (gestion des données, gestion des utilisateurs), (ii) services utilisateurs (messages, photos, contenus multimédias), et (iii) interfaces publiques (annuaire de services, relais vers les serveurs web et email). Cette approche *composants* s'est poursuivie pour les projets suivants (Companym@ges, Mazadoo, SIGAAL), mais en s'appuie sur la spécification EJB (Enterprise JavaBeans, un cadre logiciel, une architecture de composants logiciels pour serveur) et le serveur d'application JBoss AS, qui d'une part intègre des fonctionnalités de serveur web, et avec lequel les solutions de convergence SIP/HTTP de Nexcom s'interfacent nativement. Dans cette architecture logicielle, les différents services sont constitués en silos (gestion des utilisateurs, messagerie, albums, vidéo, téléphonie), eux-mêmes décomposés en couches (couche de présentation sur TV et PC avec des technologies web Ajax, couche métier, couche de persistance des données). Cette architecture donne à notre application serveur un caractère évolutif pour intégrer de nouveaux services éventuels.

Le logiciel de la box télé a également fait l'objet d'évolutions au fil de nos projets. Les premières réalisations (T@PA M@LIS) utilisaient la technologie XML/RPC côté serveur, technologie où la communication interservices se fait par le réseau, et où les composants peuvent naturellement être déployés et s'exécuter à distance. Ainsi, le logiciel de la box télé est lui-même constitué de services XML/RPC. Il comporte une partie statique, installée sur le disque dur de l'ordinateur, dont le rôle est de télécharger le reste de l'interface graphique à partir du serveur (des composants graphiques Gtk+, associés à un thème d'affichage adéquat pour le téléviseur). Les projets suivants (Companym@ges, Mazadoo, SIGAAL) ont adopté une approche différente pour la box télé, basée sur un client web. La solution préconisée par notre partenaire technique (iWedia SmarDTV) est de s'appuyer sur le standard HbbTV (Hybrid Broadcast Broadband TV), développé par un consortium d'industriels européen pour la diffusion et l'harmonisation de programmes interactifs pour les télévisions connectées, et visant à remplacer d'autres solutions plus anciennes (MHEG-5 dans les pays anglo-saxons avec un modèle à objets très rigide pour décrire ses applications et leur présentation, ou encore DVB-MHP dans quelques pays européens sur la base de composants Java). Le téléviseur, ou la box télé, est alors doté d'un navigateur web et d'un jeu d'instruction permettant d'une part à des flux TV de faire appel à des contenus web, et réciproquement de pouvoir interagir avec le flux TV depuis des pages Web. Ainsi, dans le cadre de nos projets, des firmwares sont développés pour nos box incluant la solution Comedia de notre partenaire, le moteur de rendu HTML WebKit, ainsi qu'un agent SIP (services de visiophonie et de notification décrits précédemment). Le projet SIGAAL incluant des services domotiques, un client xAP a été également intégré à la box télé lui permettant d'émettre des commandes directement aux appareils sur le réseau domotique.

Notre plate-forme est riche en services proposés à l'utilisateur. L'implémentation est complexe. Chaque composant nécessite un haut niveau de technicité, et l'intégration des différents composants entre eux doit être précise et rigoureuse. Il ne s'agit pas de juxtaposer des livrables des différents partenaires techniques du consortium. Cela implique une grande fluidité entre les différents partenaires, chacun se devant d'avoir une connaissance fine des détails techniques des contributions apportées par chacun, bref, une collaboration poussée. De plus, la solution devant être déployée dans le lieu de vie de nos expérimentateurs, et sur de nombreux mois, il est impératif d'avoir un haut niveau d'exigence sur la qualité et la fiabilité de nos prototypes.

1.3.4 Ergonomie de l'interface télé

L'ergonomie des interfaces télé requiert une attention particulière. C'est le point d'entrée des services offerts par la plate-forme pour les personnes âgées. De ce fait, c'est un élément

clef de l'acceptabilité, et donc des usages que l'on veut justement étudier. La difficulté tient au fait que l'on est passé du monde de l'ordinateur au monde de la télévision. Les services que l'on propose sont ceux que l'on pourrait trouver habituellement sur un écran d'ordinateur ou de tablette (avec clavier-souris, voire écran tactile), sauf qu'ici on les propose sur la télévision, avec sa télécommande, et à des utilisateurs qui ont une habitude de la télévision bien supérieure à celui de l'ordinateur. Le critère de référence est la télévision : réactivité (lorsque l'on appuie sur le bouton d'une chaîne, elle s'affiche immédiatement), simplicité (les différentes chaînes portent des numéros, qui se suivent, il suffit de composer le numéro pour accéder au service).

Une première nouveauté issue du monde informatique et qui s'installe dans nos services pour télé interactive est le fait d'afficher du texte, là où la télévision n'affiche habituellement que des images. Pour autant, l'écran de télévision se prête mal à l'affichage de texte : placé à quelques mètres du spectateur, parfois avec des contre-jours, et des choix de réglage de couleur et contraste très divers. Aussi, le recours à des icônes et éléments graphiques est un plus, mais leur codification et interprétation nécessite un apprentissage, alors que les écrits viennent déjà avec une signification connue. Bref, il y a du texte à l'écran, il doit être bien lisible pour notre public.

Un autre élément provenant du monde informatique est le concept de menus, sous-menus, listes de choix. Le principe de base consiste à faire une sélection dans une liste : il faut d'abord se positionner sur un item à l'écran, puis valider son choix. Typiquement on déplace son "positionnement" avec les flèches de la télécommande, puis on valide par le bouton ok. L'élément sur lequel on est positionné doit être clairement identifiable par un affichage différent des autres. Cela implique que, lorsque l'on utilise la télécommande, on ne regarde pas ses doigts sur la télécommande, mais l'écran de télévision avec le résultat des actions que l'on fait. Cette façon d'interagir appartient clairement au monde informatique, et ne va pas nécessairement de soi pour des personnes âgées ayant peu pratiqué l'informatique au préalable. (Le risque, pour les membres des équipes techniques du projet étant de prendre pour acquis leurs propres réflexes et usages, plutôt que de se mettre à la place de l'utilisateur final.) L'apprentissage n'est pas long, mais il faut bien passer par une phase d'apprentissage (démonstration, mise en pratique).

L'affichage même de listes est soumis à une contrainte de taille (taille de l'écran) : on ne peut raisonnablement afficher qu'un nombre limité d'items à la fois sur l'écran. Si la liste de choix comporte plus d'items que le nombre affichable simultanément à l'écran, il faut introduire un principe de défilement. C'est-à-dire que l'utilisateur voit à l'écran son choix courant parmi une liste d'items affichés, mais il faut lui montrer d'une manière ou d'une autre que cette liste d'items affichés n'est qu'une portion de la liste complète des choix possibles qui continue en dehors de l'écran. Pour cela, dans le monde des interfaces graphiques informatiques, on a souvent recours au paradigme de pages, ou de la barre de défilement (ou *ascenseur*). D'autres paradigmes graphiques sont parfois proposés, comme le *carousel*, avec ou sans effet semi-3D selon les capacités de calcul du dispositif d'affichage. Mais tout ceci est également codifié et requiert une phase d'apprentissage (en dépit des revendications d'interfaces supposément *intuitives*), et nécessite une certaine gymnastique intellectuelle.

L'autre point saillant est le principe de navigation dans une arborescence d'écrans aux fonctions diverses. Là encore, cela nécessite une gymnastique intellectuelle : l'utilisateur doit se bâtir une représentation mentale de cette arborescence, savoir s'y repérer, et s'y déplacer. Cette arborescence (liste de listes) comporte une partie statique (liste des différents services offerts par la plate-forme, ainsi que la liste des fonctionnalités pour chaque service), mais aussi une partie dynamique (par exemple, la liste des messages à l'intérieur du service messagerie évolue naturellement avec l'arrivée de nouveaux messages). Il est donc important, pour chaque page affichée à l'écran, d'avoir une information indiquant la localisation courante de cette page dans l'arborescence globale (tout du moins, son titre), et que cette indication soit présentée de manière uniforme d'une page à l'autre. Pour se déplacer dans les choix proposés à l'écran,

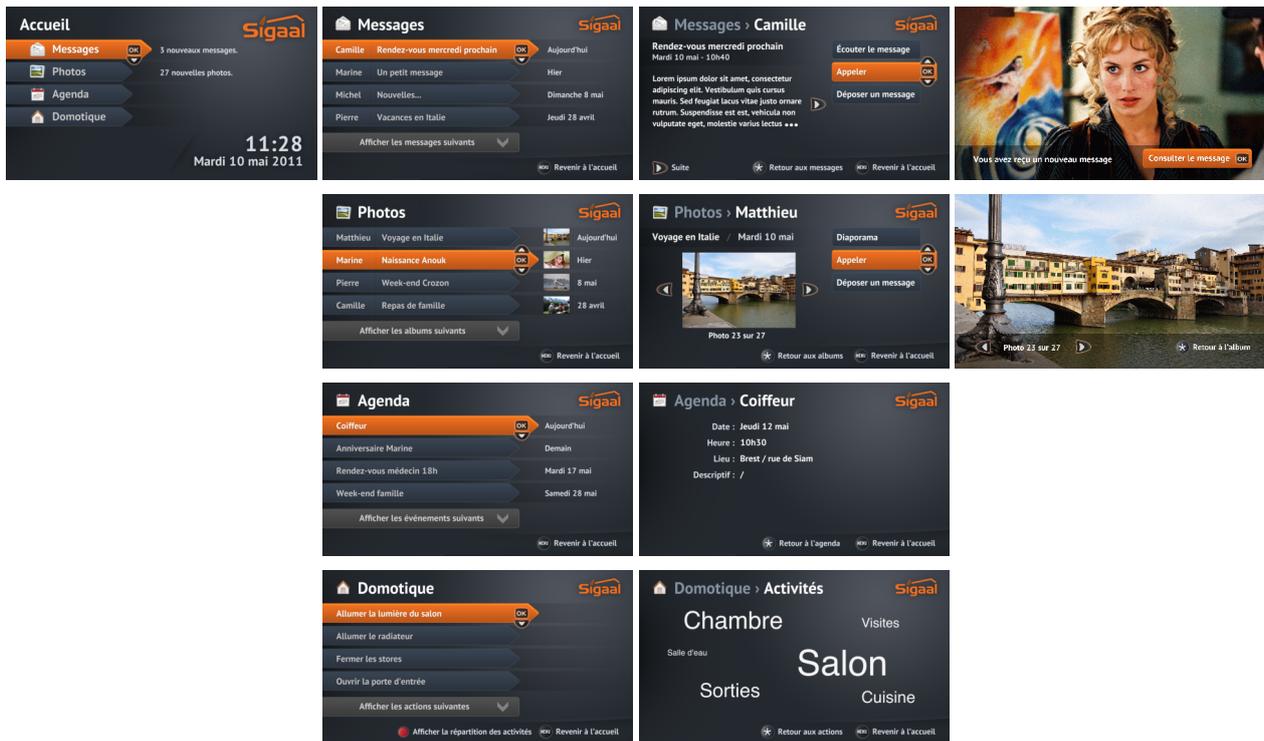


FIGURE 1.5 – Exemple d'écran de l'interface télé

nous utilisons les flèches de la télécommande et le bouton ok pour valider le choix sélectionné, boutons qui sont systématiquement présents. Deux autres fonctions sont nécessaires : remonter d'un niveau, et remonter à la racine de l'arborescence. Sur nos télécommandes, il n'y a pas toujours de boutons clairement identifiés pour cela (contrairement aux flèches et au bouton ok). Il a fallu faire un choix parmi les boutons présents, et l'expliquer à nos utilisateurs (par exemple, en bas de chaque page une petite indication rappelle le rôle de ces boutons). Le bouton pour revenir directement à la racine de l'arborescence n'est pas strictement indispensable (il suffit autrement de cliquer plein de fois sur le bouton retour), mais est très rassurant pour nos utilisateurs qui se sentent parfois perdus dans cette arborescence et qui savent ainsi qu'à tout moment ils peuvent revenir "au début". Tous ces ajustements sont le résultat d'échanges avec les personnes âgées.

Les questions d'ergonomie se posent aux industriels qui souhaitent proposer des produits impliquant de l'affichage sur télé, ou bien pour des services passant par de l'affichage sur ordinateur à destination de personnes âgées ou mal voyantes. Peu d'études traitent des deux. Ainsi, nous avons dû solliciter des ergonomes pour étudier spécifiquement l'ergonomie des affichages à la fois sur télé, et à destination des personnes âgées. Sur la base d'un état de l'art des dispositifs apparentés à nos besoins (télé interactive d'une part, dispositif informatique pour personnes âgées d'autre part), nous avons prototypé des maquettes, c'est-à-dire un jeu de pages statiques représentatives des services que nous envisageons, et implantées dans une box préparée pour l'expérience. Des personnes âgées sont alors invitées à dérouler des scénarios, et à exprimer leur ressenti face à ces écrans. Il en ressort un certain nombre de préconisations. On préférera un contraste négatif (textes en clair sur fond sombre) à un contraste positif, car plus adapté à une ambiance lumineuse douce et peu intense comme le salon de la maison, et préférée des personnes avec une faible acuité visuelle. De même, le texte doit être de grande taille (viser une taille affichant 60 à 80 caractères par lignes, pour 12 à 15 lignes), avec suffisamment d'espacement entre caractères et entre lignes. Rappelons tout de même que les longs textes ne seront pas lus (seuls les titres), et qu'une solution de vocalisation est bienvenue. On préfère les fontes de caractère sans empâtement, et on évite les changements de fonte de caractères. On peut utiliser 3 à 4

tailles de caractères différents. Les moyens de naviguer dans les listes et menus sont rappelés à l'écran, idéalement avec des éléments graphiques (dessins des touches de la télécommande) et un texte court et signifiant.

La figure 1.5 illustre des écrans d'interface télé qui a ainsi été réalisée sur la base de ses ces préconisations (projet SIGAAL).

Notons que des tests d'ergonomie ont été également menés (projet Amalys, avec le laboratoire LOUSTIC Rennes) concernant le principe du clavier virtuel sur écran de télé, dont les caractères sont sélectionnables avec la télécommande en se déplaçant avec les flèches, puis validés par un ok. Un tel mode de fonctionnement nécessite beaucoup d'allers-retours, ne permet pas de saisir du texte rapidement, bref une expérience utilisateur assez besogneuse et peu appréciée. Il ne peut être utilisé que dans des cas précis et ponctuel, comme des opérations de maintenance ou de configuration, et ne peut raisonnablement pas être proposé à nos usagers. Les services courants s'appuient sur des menus simples à base de listes courtes.

1.4 Un outil d'expérimentation préalable : le living'lab

Nos projets de recherche laissent une grande place à l'utilisateur final, qui est mis à contribution dès les phases amont de co-conception, ainsi que dans la phase d'expérimentation en situation réelle dans son lieu de vie et sur des périodes significatives. Entre les deux, lors de la mise au point du dispositif à l'étude, des échanges sont nécessaires. C'est là que naît le besoin d'un cadre d'expérimentation en environnement contrôlé. Le *living'lab* (dont la traduction littérale serait laboratoire vivant, mais auquel on préfère l'expression *tiers-lieux d'expérimentation*), est à la fois un laboratoire où les chercheurs développent leurs innovations, et à la fois un lieu d'expérimentation qui se veut représentatif de la cible, c'est-à-dire du cadre de vie réelle des usagers. Cette dualité (lieu de vie, mais contrôlé) permet de mettre en situation l'innovation de manière réaliste, tout en contrôlant les paramètres des situations expérimentales. C'est à la fois un outil et une démarche méthodologique. Très concrètement, cela permet de mener deux types d'évaluations. Tout d'abord, des tests fonctionnels, c'est-à-dire s'assurer que ce qui a été prototypé fonctionne bien comme attendu, et avec de vrais utilisateurs représentatifs des usagers ciblés, en allant au-delà des tests en laboratoire habituels lorsque le dispositif est dans les mains des concepteurs eux-mêmes. Dans le même temps, cela permet de procéder aux réajustements nécessaires très rapidement. En second lieu, ce type de laboratoire permet d'effectuer des tests d'ergonomie et de questionner l'acceptabilité des dispositifs : des expérimentateurs sont mis en situation dans un environnement aussi proche que possible de la vie courante, tout en permettant aux chercheurs d'observer et de mesurer la réaction des usagers. Dans une démarche de co-conception (qui place l'utilisateur au cœur de l'action), et pluridisciplinaire (des sociologues et ergonomes sont intégrés, voire embauchés dans l'équipe), le living'lab est un outil précieux.

Dans le cadre du projet SIGAAL, cette démarche nous a été exposée par nos partenaires du CSTB de Sophia Antipolis. Ils disposaient d'un lieu d'expérimentation de ce type, la plateforme GERHOME (2006). Avec leurs conseils, et motivé par notre expérience acquise dans les projets précédents (T@PA M@LIS Companym@ges-AIPA), il nous est alors apparu important de mettre sur pieds une plate-forme comparable dans notre équipe pour expérimenter, auprès de vrais usagers comme nous avons l'habitude de le faire, nos propres approches et dispositifs d'aide au maintien des personnes fragiles à domicile. En 2009, l'école a mis à notre disposition un espace (deux algecos accouplés) que nous avons aménagé comme un petit studio, avec du mobilier courant, des équipements domotiques, et nos solutions de télé interactive. Notre plate-forme baptisée alors Experiment'AAL, tirait son nom, comme SIGAAL, de l'acronyme Ambient Assisted Living. L'année suivante, l'équipe intégrant l'UMR Lab-STICC et fondant l'axe transverse HAAL (Human Ambient Assisted Living), la plate-forme prit le nom d'Experiment'HAAL. En 2012, la location des algecos arrivant à terme, la plate-forme a déménagé dans



FIGURE 1.6 – Expérimentations avec des personnes âgées dans le living’lab Experiment’HAAL

des locaux de l’école laissés vacants par le laboratoire Atol (Aeronautics Technico-Operational Laboratory, un laboratoire cousin, dédié aux facteurs humains et à l’ergonomie, mais des systèmes de mission), qui lui-même déménageait dans un nouveau bâtiment. Notre nouveau lieu, plus spacieux, disposait déjà d’un miroir sans tain et bénéficiait d’un agencement des pièces propice à l’observation des usages.

Dans le même temps, cette démarche méthodologique se structure, et se généralise. Plusieurs laboratoires en France et à l’étranger se dotent de tel outil. Comme l’observe V. Berthou [163], les living’labs peuvent prendre des formes diverses, et certains laboratoires ne se reconnaissent comme living’lab qu’après coup ; mais tous partagent une vision de l’innovation «centrée utilisateur». Fin 2013, Experiment’HAAL obtient la labellisation par le CGEJET (Conseil général de l’économie, de l’industrie, de l’énergie et des technologies) via le Forum LLSA (Living Lab en Santé Autonomie), en même temps que le centre de rééducation de Kerpape. Cette reconnaissance institutionnelle se décline également au niveau de l’Institut Mines Telecom à automne 2014, au travers du projet SHELL (Silver Health & Life Living Lab), permettant de structurer l’action des living’lab de l’IMT (avec notamment le living’lab Evident de Télécom SudParis, le living’lab PROMETEE de Télécom Nancy, etc.).

Notre living’lab a bénéficié d’équipements acquis d’abord sur fonds propres, puis sur financements liés aux projets de recherche successifs. Le CPER VITAAL (Contrat Plan État Région, 2015-2020, cf. 5.3.7), dédié aux financements en investissements, a apporté des fonds significatifs pour équiper le laboratoire en matériel parfois onéreux qu’il aurait été probablement difficile d’acquérir par le biais de projets collaboratifs classiques, qui eux ont plus vocation à financer des ressources humaines. Aujourd’hui, ces investissements, et l’utilisation du living’lab, sont valorisés dans l’exécution de projets collaboratifs (p.ex. le projet européen e-VITA).

La figure 1.6 illustre l’utilisation de Experiment’HAAL. Notons que le living’lab est utilisé dans de nombreuses activités de recherche, pour la mise au point des prototypes ou de campagnes de mesures, mais aussi pour l’enseignement et des projets étudiants.

1.5 Expérimentation du prototype technique

1.5.1 Identifier les expérimentateurs

L’étape précédente de définition des besoins et services a réuni de nombreux acteurs : partenaires institutionnels associatifs politiques, des établissements d’accueils de personnes âgées, des personnes âgées elles-mêmes, des membres de familles. Ces différents acteurs, qui ont exprimé leurs avis et recommandations, sont naturellement sollicités pour participer aux phases d’expérimentations. Certains ne souhaitent pas s’engager plus avant : du côté des établissements cela peut être dû à un manque de ressource, de personnel disponible, ou de réorientation stratégique ; du côté des personnes âgées, cela peut être dû à des évolutions entre temps dans leur santé ou leur parcours de vie, ou simplement par choix.

Pour l’équipe projet, il importe donc d’identifier des terrains d’expérimentations propices. Par expérimentateurs, nous entendons non seulement les personnes âgées elles-mêmes, mais aussi les différents acteurs qui seront en relation avec la plate-forme à expérimenter : les per-

sonnes de leur entourage affectif (conjoint, famille) et professionnel, une partie du personnel pour les projets destinés à être déployés en établissement d'accueil (les animateurs, les soignants, la direction), et les associations qui interviennent régulièrement auprès de notre public.

Les différentes réunions précédentes de présentation du projet et de travail de co-conception ont donc naturellement permis de recueillir les envies des personnes à participer aux expérimentations. Il est à noter que les personnes qui se déclarent intéressées par l'expérimentation de ce dispositif de renforcement du lien social sont les personnes qui disposent d'un réseau relationnel de configuration moyenne et qui en perçoivent justement les limitations ou ressentent un certain manque. À l'inverse, celles qui disposent d'un réseau relationnel très dense ne voient pas ce que le dispositif pourrait leur apporter, tout comme les personnes qui disposent d'un réseau relationnel ténu ou inexistant ne perçoivent pas comment elles pourraient échanger davantage.

1.5.2 Mettre en place l'expérimentation

L'expérimentation se traduit par la mise en place d'un dispositif dans le lieu de vie de la personne volontaire. Une phase préalable d'accommodation et d'accompagnement est nécessaire. Il s'agit d'initier l'utilisateur à l'objet technique, avant d'arriver à un niveau d'usage autonome. La formation des usagers pourrait être réalisée par l'équipe technique du projet, voire par l'équipe sociologique, cependant il apparaît nécessaire d'introduire un rôle spécifique (voire d'une tierce personne) : le médiateur.

Le rôle du médiateur est de faire le lien entre la personne et le dispositif. Un dispositif technologique, encore aujourd'hui, vient avec l'idée que cela requiert un apprentissage. Le médiateur a une posture de sachant, et rassure l'apprenant. Cela est important au moment de la prise de contact de l'utilisateur avec l'objet technique, mais la présence et la disponibilité du médiateur tout au long du projet est également rassurante. Le médiateur va potentiellement exercer plusieurs tâches : introduire la technologie dans le cadre de vie de la personne, faciliter l'appropriation du dispositif, initier aux différentes fonctionnalités, et parfois procéder à des réglages ou remédier à des dysfonctionnements simples (et pour les dysfonctionnements importants, il saura faire appel aux équipes techniques du projet et expliquer le problème). Notons que ce rôle de médiateur peut être incarné par une seule personne ou par plusieurs auprès de la personne âgée.

Déployer un dispositif technique auprès des usagers nécessite de s'interroger sur son appropriation, et donc de sa médiation. Pour lancer nos expérimentations, il convient donc de recenser les différents médiateurs potentiels. Comme évoqué précédemment, les membres des équipes projet (sociologues, informaticiens) sont naturellement disponibles, mais pas seulement. Cela dépend grandement de la disponibilité des différents acteurs, de leur motivation pour nos projets, et bien évidemment de leur appétence pour les technologies numériques. Le personnel des établissements d'accueil peut participer : animateurs, personnel soignant, personnel technique (dans certains cas employés par la mairie en fait, et partagés entre plusieurs établissements). Dans le cas d'expérimentation au domicile, on a pu recruter le concierge de l'immeuble (projet SIGAAL). Pour nos expérimentations à Brest nous avons pu solliciter des associations, typiquement l'ORB (Office des Retraités Brestois). Et bien évidemment, cela peut être des membres du réseau familial des personnes âgées, notamment les petits-enfants, qui trouvent là un sujet pour converser avec leurs grands-parents et montrer leurs talents. Il importe de se préoccuper de l'acceptation de tel ou tel médiateur auprès de la personne âgée, qui accepte aide et conseils que de la part de personne légitime à ses yeux pour cette tâche ; cela tient à des critères de reconnaissance de la compétence technique, mais aussi à la dimension affective (membre de la famille, personnel de l'établissement particulièrement apprécié, etc.)

Il convient également de s'intéresser à la formation des personnes de l'entourage, qui doivent interagir avec le système pendant l'expérimentation. Pour eux, il est prévu d'utiliser leur ordi-

nateur personnel. Ce public-là est généralement équipé et déjà habitué aux services numériques courants. Mis à part le fait que nos services les mettent maintenant en relation avec leurs aînés, dans les grandes lignes les solutions développées par nos projets ne bousculent pas leurs habitudes : messageries, partage de photos et vidéos, agendas partagés, etc. Ainsi, une documentation classique de nos services suffit.

Cependant, dans le cas précis du projet Mazadoo, des actions de médiation spécifiques ont dû être conduites. En effet, nous avons choisi d'appuyer notre solution sur le réseau social Facebook. Or, ce réseau social est porteur d'une certaine image, de représentations, et vient avec son lot de craintes et d'appréhensions. Notons que ces craintes ne sont pas exprimées par les personnes âgées (qui, après tout, n'ont jamais eu l'occasion d'investir dans un réseau social numérique quel qu'il soit), ni par les petits-enfants (adolescents généralement bien au fait de ces environnements numériques), mais plutôt par les enfants de nos personnes âgées expérimentatrices (typiquement dans la tranche des quadragénaires, qui justement ont entendu beaucoup de choses sur ces réseaux sociaux sans les avoir pratiqués par eux-mêmes, et qui, de fait ont certains a priori). Des séances de formation aux réseaux sociaux ont été proposées, et plus précisément sur Facebook et ses réglages touchant à la confidentialité et à la vie privée. Ces séances, organisées sous le prétexte de former aux aspects techniques (création de compte, paramétrage, utilisation courante, etc.), ont traité très largement ces questions de confidentialité et vie privée. Elles étaient, de ce fait, nécessaires à l'appropriation et l'acceptation du projet.

1.5.3 Suivre l'expérimentation

Sur la durée de l'expérimentation, le suivi se fait autour de deux questions : la technique et les usages. De plus, il convient de distinguer deux catégories de participants : les personnes âgées, et les personnes de l'entourage.

Les personnes âgées reçoivent la visite régulière des sociologues pour recueillir leurs sentiments vis-à-vis de la plate-forme testée (typiquement toutes les deux semaines). Les discussions sont lancées autour d'un outil couramment utilisé par les sociologues en pareil cas : le cahier de suivi. Il s'agit très concrètement d'un cahier, qui est laissé à la main de l'utilisateur qui est invité à y noter de temps à autre ses expériences heureuses ou malheureuses depuis la dernière visite. Sans surprise, ce cahier est complété de manière très variable d'un expérimentateur à l'autre, et très fluctuante au cours du temps. Mais peu importe, c'est un prétexte pour lancer la discussion. Le sociologue y laisse également quelques notes lors de l'entretien. Mais l'essentiel de la matière et des données d'étude sont celles collectées et rapportées par le sociologue au cours de ses visites. Il est à noter que ces visites sont un moment attendu par la personne âgée, source complémentaire de lien social et de bien-être. Par conséquent, cela peut introduire un biais méthodologique en faveur du projet, si l'on n'y prend pas garde. Charge alors aux sociologues de faire la part des choses.

Sur le plan technique, il peut arriver que la personne âgée soit en difficulté avec la plate-forme. Dans ce cas, même si elle possède les coordonnées des équipes techniques qui lui ont été présentées, on constate que la personne âgée attend généralement la visite du sociologue ou du médiateur pour signaler le problème, qui fait alors remonter l'information sauf si le souci peut être réglé directement. Les personnes de l'équipe technique interviennent donc de manière sporadique auprès des personnes âgées. Les sociologues questionnent également cette façon de faire. On peut identifier plusieurs raisons : (i) l'idée que ce n'est finalement pas si grave que cela et que cela peut attendre, (ii) la peur de déranger, et (iii) la crainte d'avoir "mal fait", c'est-à-dire l'idée que ce n'est finalement pas le dispositif qui a un problème, mais que ce serait la faute de la personne âgée qui l'aurait utilisé de manière inappropriée et ainsi provoqué la panne. Ce dernier point renvoie donc à l'image de la technologie, et l'image que les personnes ont d'elles-mêmes sur leurs compétences en ce domaine.



FIGURE 1.7 – Expérimentations avec des personnes âgées dans leur lieu de vie

Du côté des personnes de l’entourage, celles-ci ne reçoivent pas de visites régulières programmées de l’équipe projet. En revanche, elles sont plus enclines à prendre contact par elles-mêmes spontanément, généralement par email, par exemple si elles rencontrent des difficultés techniques. Dans le cas des expérimentations en établissement d’accueil, il y a le cas spécifique du personnel (qui joue également ce rôle de personne de l’entourage) que les sociologues sont amenés à croiser régulièrement à l’occasion de chaque visite auprès des personnes âgées. Au cours de l’expérimentation, les personnes de l’entourage sont questionnées sur leur ressenti vis-à-vis de la plate-forme : (i) juste après sa mise en place pour s’assurer qu’il n’y a pas d’obstacle fonctionnel ou technique, (ii) à la fin de l’expérimentation pour recueillir leur retour d’expériences sur leurs propres usages et bénéfices, ainsi que sur les usages et bénéfices de la personne âgée tels qu’elles les perçoivent, et (iii) suivant la durée de l’expérimentation, lors de points d’étapes intermédiaires.

La figure 1.7 illustre l’expérimentation des dispositifs auprès des personnes âgées dans leur lieu de vie.

1.6 Analyse des usages

Il peut être bien entendu mal aisé de dresser des généralités sur la base d’expérimentations toujours trop courtes (même si certains expérimentateurs ont pu bénéficier de APIA puis de Mazadoo sur presque deux ans), et sur des cohortes toujours trop peu larges. Pour autant, un certain nombre d’observations saillantes peuvent être rapportées, et sur lesquelles peuvent capitaliser les innovations futures.

1.6.1 Messagerie

D’une manière générale, on constate que les services de communication rencontrent un grand succès. Cependant, il convient de prêter attention à deux aspects : la nature des messages, et le rythme des messages.

La nature des messages échangés impacte le lien social et l’outil de médiation. Notre public est habitué à recevoir des messages (électroniques ou non) qui sont personnalisés. Cependant, dans le domaine des réseaux sociaux (cas du projet Mazadoo), il est coutumier d’échanger des billets adressés à un cercle de relations. De tels messages ne sont donc pas personnels, mais globaux. Cette différence, si elle n’est pas explicitée, peut donner lieu à des incompréhensions pour le lecteur qui a l’impression d’avoir reçu un message par erreur, ou d’être immiscé dans des affaires qui ne le regarde pas. Là aussi, une solution technique peut être adoptée (par exemple présenter ces messages dans l’interface avec une icône spécifique), mais le médiateur va alors jouer son rôle. Sur cet exemple, on pense notamment aux petits-enfants, des adolescents. Typiquement, les relations entre grands-parents et petits-enfants se font au téléphone [113], mais ici (projet Mazadoo) via notre plate-forme.

Autre point, bien naturellement lorsque l’utilisateur reçoit des messages régulièrement (c.-à-d. quasi quotidiennement), son intérêt et son engagement se maintiennent. À l’inverse, si les correspondants s’essouffent (pour diverses raisons), la personne âgée va se désintéresser de la plate-forme. Il convient donc d’analyser les raisons qui peuvent amener à cela. La première

raison invoquée est liée à la technique : dans certaines expérimentations, le réseau permettant de raccorder les box des personnes âgées était instable et a nécessité des ajustements et des contournements parfois tardifs. Dans d'autres cas, comme Mazadoo qui reposait sur Facebook, le fait que Facebook change de manière impromptue et récurrente le contenu et la logique de ses interfaces sans prévoir de compatibilité ou de versionnement a nécessité des adaptations constantes et non anticipables.

La seconde raison est liée à la capacité à envoyer des réponses, élément important pour le maintien du lien social. Dans les premières versions, le dispositif télé-télécommande ne proposait pas à la personne âgée de moyen pour répondre à un message reçu. Dans les évolutions suivantes, nous avons introduit la possibilité de répondre en laissant un message vocal enregistré via le téléphone de la personne âgée. Ce service est apprécié, cependant il propose des échanges asymétriques (textuels dans un sens, vocaux dans l'autre) ; ce qui est non coutumier. Le recours au service de visio-conférence ou de téléphonie peut être un moyen, mais c'est également un canal différent. Pour rester dans une modalité d'échange de messages, d'autres astuces ont été proposées, comme la possibilité de retourner des réponses préformatées (comme cela est proposé sur certains réseaux sociaux), mais sans susciter de véritable intérêt et qui donc n'a pas été implémenté.

Un autre élément est la capacité à initier un échange de messages : les dispositifs développés dans nos projets permettent de recevoir des messages textuels, parfois d'y répondre, mais pas d'en initier. Sans l'emploi d'un clavier (dispositif plutôt rejeté par les personnes âgées), il reste le recours à des listes de messages prédéfinis (solution techniquement faisable, mais qui n'a pas suscité d'intérêt), ou la reconnaissance de la parole (solution qui aurait été appréciée, mais qui malheureusement est techniquement encore assez approximative, notamment pour reconnaître la voix de personnes âgées, et qui suscite de grandes frustrations quant aux erreurs de reconnaissance et au besoin de corriger). Là encore, la solution de contournement consiste à recourir à des échanges asymétriques : la conversation est d'abord initiée par un appel téléphonique (ou visio-conférence), puis des messages sont émis par les personnes de l'entourage via leur propre PC et clavier. Cette asymétrie dans les moyens d'échange, pourtant connue et assumée depuis la conception des services, a malgré tout un impact sur l'intensité et la durabilité de l'échange par messages ; de nouvelles habitudes jouant justement sur cette asymétrie se sont parfois installées, mais pas systématiquement. Il y a donc là un point à approfondir, tant sur le plan technique (rédiger des messages sans clavier ni souris, possiblement uniquement par la voix, voire grâce à de la reconnaissance vocale si les solutions sont suffisamment robustes pour cela), ainsi que sur le plan sociologique avec des usages et des niveaux d'interaction asymétriques.

1.6.2 Albums photos

Les services d'albums photo sont très appréciés. Les personnes âgées ont connaissance de photos qui peuvent circuler dans la famille, par exemple à l'occasion d'événements familiaux, mais y ont difficilement accès. Ces photos participent à raconter l'histoire familiale, et les personnes âgées ont naturellement besoin de ce lien. Mais l'essor de la photo numérique au détriment du tirage papier a éloigné les personnes âgées de ces pratiques. Parfois, les enfants ou petits-enfants viennent rendre visite à leurs aînés avec leur ordinateur portable ou leur smartphone pour justement montrer ces photos, mais ces photos ne restent pas. D'où cet engouement pour le service d'albums photos proposé par le dispositif.

Les personnes âgées aiment recevoir des photos de leurs proches, enfants, petits-enfants. Les usages sont multiples. En premier lieu, c'est un moyen d'avoir des nouvelles : on aime recevoir de nouvelles photos, en lien avec des événements récents ou familiaux ; et il importe alors que ces photos soient légendées, accompagnées d'un petit message explicatif. La personne âgée peut alors vouloir répondre. Possiblement, la réponse est juste "j'ai bien reçu la photo".

Mais, et c'est là le second point, une photo peut devenir le sujet de nouvelles discussions, questions, compléments d'information, etc., bref, l'élément moteur ou la stimulation du lien social. Techniquement, la plate-forme pourrait elle-même notifier à la personne de l'entourage que la personne âgée a bien reçu la photo, mais il est important que ce soit la personne âgée elle-même qui décide de cette confirmation ou non. Compte tenu des services offerts par la plate-forme, cette réponse se faisait donc naturellement par le dépôt d'un message vocal. Mais il y a là potentiellement un espace disponible pour affiner le service de manière innovante pour gérer ces indications de photos bien reçues et vues, et faciliter la poursuite des échanges en rebouclant sur les services d'échange de messages.

Les personnes âgées aiment aussi revoir des photos. C'est là qu'entre en jeu la notion d'albums. Cela implique en premier lieu que l'interface utilisateur prévoie une distinction entre le fait de visualiser des photos nouvelles, et le fait de consulter et réviser des albums de photos antérieurs. Cela implique que les photos soient organisées en albums. Le fait de constituer des albums sur la base des groupes d'envois (les photos envoyées en même temps constituent un album à date) est quelque chose qui est bien compris par les usagers, mais généralement perçu comme assez pauvre en signification, et incidemment génère beaucoup d'albums. Une autre approche consiste à organiser les photos de manière thématique. Cette tâche nécessitant naturellement un certain nombre de manipulations à l'ordinateur (clavier-souris), cette tâche est donc confiée à une personne de l'entourage qui doit donc organiser les photos pour le compte de la personne âgée. C'est aussi l'occasion de nouveaux sujets de conversation. En complément, un service de navigation conjointe a été imaginé : la plate-forme établit une communication audio entre le téléphone de la personne âgée et le PC de la personne de l'entourage, l'écran de gestion des albums photos de la personne de l'entourage s'affiche (presque simultanément) sur la télévision de la personne âgée. Ce service, assez ardu techniquement à développer, n'a pas fait l'objet de critiques des utilisateurs, mais a finalement été peu utilisé. Là encore, il y a potentiellement un espace d'innovation possible.

Le service d'albums photo a été l'occasion d'un usage dérivé : la consultation «autour» du dispositif, autant que «via». Tout simplement, lors de visites de personnes de l'entourage auprès de la personne âgée, des séances de visionnage des photos s'organisent, des conversations s'installent pour lesquelles le dispositif lui-même et ses contenus deviennent le sujet. De plus, par ce biais-là, le dispositif est devenu, potentiellement, un dispositif ludique pour agir sur les troubles de la mémoire.

Un autre usage dérivé est apparu, notamment dans le cadre de l'expérimentation au centre de jour Mathieu Donnart pour enfants connaissant des troubles psychomoteurs ou psychocognitifs. Le dispositif était conçu pour permettre aux enfants, qui passent la journée au centre et reviennent à la maison le soir, de revivre en famille les activités de la journée au moyen de photos prises par les animateurs. Cependant, un des enfants expérimentateurs aimant particulièrement les photos d'animaux, des personnes de son entourage lui constituaient spécifiquement des albums de photos humoristiques d'animaux piochés sur Internet (l'importance d'alimenter le dispositif avec du contenu), pour le plus grand plaisir de l'intéressé. Cet exemple, certes ponctuel, illustre les stratégies et astuces que peuvent déployer les usagers autour d'un dispositif, même co-conçu. Ces dispositifs se doivent d'offrir de tels espaces de liberté.

1.6.3 Services d'information ciblées

Le dispositif a pour vocation de renforcer, voire recréer, du lien social autour de la personne dépendante. Cela passe par des échanges avec des personnes de l'entourage comme proposé par les services de messagerie et d'albums photos, mais pas seulement. D'autres registres de socialisation sont mobilisés pour permettre à la personne de se réinscrire dans son quartier, sa ville, et plus généralement, dans la société. Aussi, la plate-forme propose des contenus fournis

par des partenaires des projets : mairie de quartier (Bellevue Brest, Chevilly-Larue), articles du quotidien local (Le Télégramme), articles sur le grand âge (AgeVillage), vidéos thématiques d'associations locales (Chemins de Traverse), pages et blogs thématiques divers (Facebook).

Là encore, le succès de ces services dépend en premier lieu du rythme de renouvellement des contenus. Produire des reportages vidéo dans une structure associative implique nécessairement un taux de renouvellement peu comparable à celui d'une chaîne de télévision, qui reste le point de référence pour nos utilisateurs. Une vidéo est visionnée une fois, parfois deux, rarement plus. De même, les articles rédigés par l'adjoint à la mairie de quartier (et sur un mode quasi bénévole) sont sur un rythme mensuel, voire bimensuel. Même s'ils sont appréciés, ils ne peuvent qu'être un des constituants au sein d'une fourniture plus large de contenus. C'est pourquoi le recours à des professionnels (Le Télégramme, AgeVillage) paraît indispensable. Pour autant, il convient de respecter non seulement les attentes, mais aussi la formulation des attentes par nos utilisateurs. L'exemple en est de la rubrique "avis de décès" proposée par le quotidien régional. Cette rubrique est demandée par certains usagers, mais d'autres s'en offusquent si on leur propose d'emblée, car trop inscrite dans les clichés sur les personnes âgées. De même, les articles thématiques sur le grand âge, même s'ils peuvent être instructifs, peuvent susciter du rejet si l'activation de ce service n'a pas été explicitement demandée par les personnes âgées elles-mêmes, car il est alors perçu comme poussé ou motivé par des clichés à propos des centres d'intérêt supposés des personnes âgées. Les articles du quotidien local et qui donc traitent de sujets locaux sont appréciés, à condition que la personne soit elle-même ancrée dans ce territoire (tout dépend de leur parcours de vie individuel). On en revient à la question des véritables centres d'intérêt des utilisateurs lorsque l'on propose un bouquet de contenus thématiques. À cela peut s'ajouter des difficultés techniques : par exemple les flux thématiques Facebook (exploités dans le projet Mazadoo) sont en fait essentiellement constitués de liens et de revois vers d'autres contenus (sous-entendu : ces flux n'apportent pas de contenu en propre), et d'autre part de commentaires d'internautes à la syntaxe approximative qui ne sont parfois même pas exploitables par le module de synthèse vocale...

Les expériences menées autour de ce type de services mettent en lumière un certain nombre de critères : les contenus doivent être renouvelés à un rythme suffisant pour entretenir l'intérêt, les thématiques doivent réellement s'inscrire dans les centres d'intérêt des usagers et à leur demande, et les contenus doivent être techniquement bien intégrés pour une consultation via une box télé.

Ces services sont à la frontière entre des services de simple divertissement (thématique importante au demeurant pour des personnes isolées), et des services de resocialisation, car proposant des contenus ancrant réellement la personne dans son tissu local et associatif (et donc avec du contenu bien ciblé sur la personne, mais possiblement moins fourni et renouvelé que pour du divertissement). Ce sujet amène à s'interroger plus largement sur la vocation du dispositif proposé pour être utilisé soit de manière ponctuelle (consulter de temps en temps les nouvelles de ses proches), soit sur de longues périodes (fourniture de contenus). Cela a un impact sur les choix technologiques. Si l'on vise un usage ponctuel, le dispositif doit être bien intégré aux activités quotidiennes et vienne en complément : par exemple une discrète notification à l'écran par-dessus le programme des chaînes de télévision habituelles pour indiquer l'arrivée d'un message ou d'une photo d'un proche (et donc un verrou technique pour intégrer le service sur un flux TV). Si l'on vise un usage sur de longues périodes, il faut s'intéresser à l'agrégation des différentes sources et formes de contenus pour l'affichage par le dispositif (web, articles, vidéos) et veiller à une fourniture régulière.

1.6.4 Services de repérage dans le temps

Divers éléments du dispositif permettent d'aider la personne âgée à se repérer dans le temps qui passe. Ils peuvent paraître anecdotiques, et d'ailleurs même s'ils n'ont pas fait l'objet d'atelier de réflexion explicite dans les phases de co-conception, ils ont été évoqués. Tout simplement, sur la page d'accueil du dispositif, il a été demandé de rappeler l'heure qu'il est, la date, avec le jour de la semaine, éventuellement le saint du jour, ainsi que la météo du jour, bref, une éphéméride électronique. Notons que c'est ce que la plupart des utilisateurs de smartphone configurent sur leur écran d'accueil aujourd'hui. Et effectivement, cela apporte un élément rassurant et stabilisant, même si nos expérimentateurs avouent rarement avoir du mal à se rappeler quel jour on est. Ces informations sont possiblement déjà présentes dans l'environnement de la personne (horloge accrochée au mur), ils sont tout de même appréciés sur la page d'accueil du dispositif.

D'autres éléments ont été envisagés, comme le principe d'un agenda partagé entre la personne âgée et son entourage : rappeler la visite des intervenants par exemple, ou des rendez-vous importants (à l'extérieur ou sur place). Cependant, il convient d'observer que ce n'est pas la personne âgée elle-même qui paramètre ces rendez-vous, c'est à la charge d'une personne de son entourage (mais possiblement à sa demande). Incidemment, cela implique donc une tâche et une responsabilité pour cette personne de l'entourage. On observe un certain essoufflement dans l'accomplissement de cette tâche, et finalement un faible intérêt pour la personne âgée. En revanche, un usage qui est apprécié est le fait d'indiquer les dates anniversaires des petits enfants : lorsque le dispositif notifie ces rappels, c'est l'occasion d'initier une prise de contact, des échanges, des discussions.

1.6.5 Rapport à la technologie

Dans ces projets, le rapport des usagers à la technologie est une question en soi. En effet, un certain nombre d'a priori sont véhiculés. En premier lieu, il y a l'idée persistante que les personnes âgées sont réfractaires à la nouveauté en général et à la technologie en particulier. Battre en brèche ce cliché est d'ailleurs une des motivations qui ont poussé bon nombre de nos expérimentateurs volontaires à participer aux projets, et démontrer ainsi à leur entourage qu'ils savent rester en phase avec leur temps. Certes, les proches (et petits-enfants notamment) voient dans nos dispositifs un moyen moderne et pratique de communiquer avec leurs aînés, mais du côté des grands-parents, l'acquisition et l'utilisation de ces nouvelles technologies leur permettent de se revaloriser, d'affirmer leurs compétences et leur modernité.

L'image de modernité apportée par le dispositif a également été un levier dans le cadre de l'expérimentation avec les enfants en situation de troubles psychomoteurs ou psychocognitifs. Face à leur fratrie, ils se retrouvent ici en situation de maîtrise : ils manipulent leur dispositif, leur télécommande, leurs services, des éléments qui leur sont bien souvent confisqués par leurs troubles et une autonomie amoindrie. À ceci s'ajoute une dimension nouvelle : le fait que l'image de l'enfant en pleine activité soit projetée sur la télévision contribue à sa valorisation. Cet objet emblématique est généralement placé au centre de la maisonnée, et les jeunes enfants ont une représentation particulièrement positive de cet objet (associé aux célébrités, héros, spectacles, divertissements). Le handicap passe au second plan, et l'enfant vient au-devant de la scène au même plan que ses héros.

La technologie, et plus particulièrement les outils de communication numérique véhiculent également une image négative : la crainte que la technologie vienne en substitue à l'humain, et soit un facteur aggravant du repli sur soi. Ces craintes initiales sont évoquées parfois par différents participants à nos projets, le personnel des établissements, les personnes âgées, les personnes de l'entourage. Mais le travail de co-conception, et de confrontation avec le dispositif réel permet de déconstruire cet a priori, et de constater in fine que ces techniques peuvent

être une source supplémentaire d'ouverture et non de replis, d'aide aux personnels et aux proches et non de remplacement. Aussi, les témoignages des expérimentateurs et participants de précédentes expérimentations permettent de vaincre les réticences des suivants. Ces craintes tendent à s'estomper au fil du temps, en lien probablement avec l'installation de ces technologies dans nos sociétés en général.

Un dernier écueil a trait plus spécifiquement aux aides techniques développées à destination des personnes fragiles. Ces outils sont fréquemment conçus avec des objectifs de gestion, d'assistance, de monitoring, d'alerte, de sécurisation. Ils se proposent d'aider et de rassurer les professionnels, les proches, voire la personne elle-même. Pour autant, ils sont stigmatisants, porteurs de connotation de handicap ou de l'image d'une personne diminuée. La stigmatisation est d'autant plus saillante si ces dispositifs sont visibles et identifiables. La médicalisation de ces dispositifs peut alors conduire à un rejet ou diverses stratégies d'évitement. Cela devient alors «des ruines technologiques». Pour éviter cela, il convient de bien distinguer, dès la conception, ce qui relève du médical et ciblant les pathologies éventuelles de la personne, et ce qui relève du bien-être et qui concerne tout un chacun. Nos dispositifs, dans leur conception, voire dans leur esthétique, se doivent d'être ouverts potentiellement à tous, ou du moins de ne pas s'enfermer dans un segment d'utilisateurs. Après tout, consulter messages et photos sur la télé peut intéresser toutes les catégories de la population, et pas spécifiquement les personnes âgées, indépendamment du fait que nos projets ont identifié un besoin particulier de lien social.

1.7 Dispositions économiques

En tant qu'objet d'innovation, nos services de lien social sur télé connectée se doit de considérer la question de son positionnement économique, voir, de sa valorisation.

L'objet en question, qui propose du bien-être, se positionne à mi-chemin entre une solution médicale (avec possiblement une certaine proximité avec la télé-médecine), et une solution de loisir (d'ailleurs le dispositif se présente comme une box télé comparable à celle des offres de télévision sur abonnement). Dans sa constitution (1946), l'OMS définit la santé comme «un état de complet bien-être physique, mental et social, et pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité». En première lecture, nos dispositifs pourraient donc se revendiquer comme dispositifs de santé. Pour autant, un dispositif de santé, même non-invasif et sans réel risque médical, doit faire l'objet d'une investigation clinique. Or, il y a une réelle difficulté scientifique (et pas seulement financière) à mener de telles investigations cliniques sur la question du bien-être moral ou social, tant la variabilité des situations individuelle est grande et les signaux à mesurer sont faibles. Par ailleurs, obtenir la certification *dispositif médical* apporte certes un gage de sérieux et d'efficacité aux yeux des usagers, mais implique aussi une plus grande responsabilité pour le fabricant, un fait qui peut peser sur les choix stratégiques industriels. Bref, ce positionnement intermédiaire est un fait constaté, mais n'est pas inintéressant non plus. Reste donc à trouver un positionnement économique à ce type d'innovation.

Le domaine médical est un marché régulé, du moins en France, où entrent en jeu les pouvoirs publics avec différents dispositifs d'aide au financement ainsi qu'à l'organisation des soins et à la préconisation ou l'accréditation des solutions, mais aussi des organismes complémentaires privés de mutualisation des frais. À l'autre extrémité du spectre, le domaine des dispositifs de loisirs est à la charge de l'utilisateur, éventuellement de sa famille ou de ses soutiens, sans forme de régulation ni de préconisation autre que les incitations portées par des messages publicitaires. Mais pour des services et prestations orientés vers le bien-être, la vie sociale ou le loisir, d'autres acteurs privés pourraient se positionner, comme les banques, assurances, organismes de prévention, caisses de retraite complémentaires, etc.

Il convient donc d'étudier ces questions, d'identifier d'une part la chaîne de valeur de nos dispositifs, c'est-à-dire les différents acteurs qui apportent de la valeur, avec leurs postes de

coûts et retours attendus, et d'autre part les parties prenantes, particuliers clients et acteurs financiers publics et privés, et leur propension à payer au regard d'un bénéfice attendu. Pour cela, nous nous sommes adjoint les compétences de nos collègues économistes de la santé de IMT Atlantique (projet Mazadoo, ainsi que le projet SIGAAL, et avec le partenariat de Mondial Assistance GTS et AgeVillage).

En premier lieu, on peut observer divers dispositifs commercialisés couramment dans des secteurs de marché similaires tel que l'aide (d'urgence ou médicale) aux personnes à domicile. Un dispositif répandu : la *télé-alarme* (ou PERS, *personal emergency response system*), où la personne âgée porte un bouton d'alerte (médaillon, bracelet, etc. parfois avec un souci d'esthétisme, ou pas) dont le signal est relayé par un boîtier connecté à la ligne téléphonique fixe ou par GSM, et permet en cas d'incident grave de déclencher l'intervention des secours. La *télé-assistance* se propose d'offrir un soutien psychologique (à distance toujours, par téléphone), un accompagnement médical, des prestations de livraison de repas ou médicaments. Enfin, la *télé-santé* peut doter ces boîtiers de capteurs monitorant certains indicateurs de santé (pression artérielle, température, etc.) et d'alerter une structure de soin en cas de besoin, propose des consultations médicales à distance (sans établir pour autant de diagnostic à proprement parler ni d'ordonnance médicale, c'est-à-dire offrant des informations médicales personnalisées), du suivi de pathologies chroniques, ou simplement des prises de rendez-vous. Notons que, techniquement, la téléalarme et la téléassistance s'appuient traditionnellement sur la téléphonie alors que la télésanté a recours plus volontiers à Internet. Ces offres impliquent généralement un coût fixe à l'installation (de 500€ à 1000€ suivant les options retenues, mais parfois inclus dans des abonnements avec engagement), et un coût récurrent mensuel de quelques dizaines d'euros. Ces offres sont généralement bien comprises, bien identifiées par les usagers et les pouvoirs publics. Le choix du recours à ces dispositifs est laissé à l'appréciation des usagers ou de leurs aidants. Pour les personnes âgées hébergées en établissement, une solution de téléalarme est parfois incluse dans l'offre. Si la souscription à ces services est à la charge des usagers, des dispositifs d'aide publique sont disponibles. En France, l'Allocation Personnalisée d'Autonomie (APA) permet d'accompagner les personnes en perte d'autonomie et aider à assumer les coûts de la prise en charge de la dépendance. Les critères d'attribution de cette allocation se font en fonction des niveaux de dépendances définis par la grille AGGIR (Autonomie Gérontologie Groupe Iso-Ressources). Selon les chiffres de la DRESS (Direction de la Recherche, des Études, de l'Évaluation et des Statistiques), les aides totales sont en moyenne entre 300€ et 400€ mensuels (suivant les années, les niveaux de dépendance, l'hébergement à domicile ou en établissement). Concernant les aides techniques, seuls sont pris en charge par la Sécurité Sociale les "appareillages" (cannes, déambulateur, fauteuil roulant, lit médicalisé, etc.), à condition qu'ils soient homologués et qu'ils aient été prescrits par un médecin. Le remboursement des autres aides techniques est beaucoup plus variable, et d'autres acteurs peuvent se positionner (p.ex. assureurs). Prérequis pour justifier le remboursement : il est nécessaire de démontrer aux financeurs publics comme privés l'efficacité clinique et sociale, et donc le retour sur investissement.

En second lieu, il convient de questionner autant que possible les usagers quant à leur positionnement vis-à-vis des dispositifs et innovations proposés, et donc leur *propension à payer*. Afin d'identifier l'intérêt que peuvent susciter nos dispositifs, une enquête de type étude de marché a été menée pendant deux mois en 2012. Un questionnaire a été soumis via le site Internet d'AgeVillage (une centaine de répondants), ainsi que lors d'entretiens en face à face à Rennes (une vingtaine de participants). Près de 60% des sondés se sont dits soit intéressés, soit très intéressés par de tels services de lien social. Pour déterminer les dispositions à payer, c'est-à-dire le prix que l'utilisateur est disposé à payer pour ce service, le questionnaire procède en deux étapes [77, 82] : tout d'abord un référendum où les personnes sont invitées à répondre par 'oui / non' à un montant unique proposé par le questionnaire (ici 12€ par mois), puis, suivant

ce premier positionnement un mécanisme d'enchères 'plus cher / moins cher' permet d'affiner le prix de valorisation. Les questions portent sur différents packs de services envisageables sur une box à domicile : santé, confort, sécurité, lien social. Les résultats permettent de dresser certaines corrélations avec le profil des répondants. Les femmes proposent une valorisation plus élevée que les hommes, un constat qui corrobore d'autres études sur l'espérance de vie et la dépendance [135] : les femmes vivent certes plus longtemps, mais pas forcément en bonne santé, ce qui oriente naturellement leurs préoccupations vers des solutions pouvant aider à rompre un isolement qui pourrait s'ajouter à la maladie. Les personnes qui estiment leur cercle d'amis plutôt restreint valorisent plus les services de renforcement du lien social. De même, assez logiquement, les personnes qui ont moins de troubles de santé valorisent plus les autres services tel que le lien social. Par contre, on remarque que la disposition générale à payer diminue avec l'âge, fait explicable par une baisse prévisible des revenus. Les risques de doublons de certains services avec d'autres dispositifs peuvent être un frein (sécurité, alarme). Une offre à géométrie variable, avec différents packages, est alors préférable (par exemple un pack lien social autour de 12€, un pack confort et sécurité autour de 22€, une offre complète autour de 32€). Quant au mode de paiement privilégié, la modalité d'abonnement mensuel est préférée, en lien possiblement avec les offres d'accès Internet. En conclusion, il peut exister un marché solvable pour nos dispositifs puisque certaines personnes sont disposées à payer. Pour autant, la tranche d'âge à laquelle les services sont a priori destinés est celle qui aurait la plus faible disposition à la payer, fait qui peut impacter le modèle économique.

En dernier lieu, chaque acteur de la chaîne de valeur identifie ses coûts, charges, et marges attendues : terminal utilisateur (box et télécommande), serveurs, développements logiciels et maintenance, fournisseurs de contenus, distribution, marketing, service après-vente. Les partenaires industriels de nos différents projets ont été questionnés sur ces différents points. Il en ressort que les offres de packs risquent d'être entre 10% et 20% plus élevés que la disposition à payer par les usagers. Par conséquent, il convient de rechercher des apports et subventions complémentaires auprès de partenaires publics ou privés. Ces apports sont accessibles dès lors qu'ont été menées au préalable des études vastes démontrant l'intérêt de ces solutions et leur bénéfice pour ces acteurs qui sont possiblement en charge de la santé des usagers par ailleurs (pouvoirs publics, assureurs, etc.). D'autre part, nos dispositifs ont ceci de particulier qu'il s'apparente aux plates-formes bi faces. En effet, comme beaucoup de plates-formes ou services Internet, on met en relation des usagers avec des fournisseurs de services et contenus ; plus il y a d'usagers, plus on intéresse des fournisseurs de services, et plus on propose de services et contenus, plus on intéresse les usagers. Cette situation entraîne parfois des changements dans le modèle économique : des fournisseurs de services abonnent directement les usagers, mais reversent un pourcentage à la plate-forme, parfois la plate-forme facture à la fois aux usagers et aux fournisseurs, ou parfois les usagers ne paient pas directement (le fameux «si c'est gratuit, c'est que vous êtes le produit»), ou bien subissent de la publicité. D'ailleurs, il est possible que, pour les générations à venir de personnes âgées, ce soit justement le modèle économique attendu et auquel elles ont été habituées : on parle alors du *verrou de la gratuité* lié au fait que dans le monde web 2.0, nombre de services Internet sont proposés gratuitement au grand public, typiquement par les GAFAM. En ce qui concerne nos usagers actuels, les personnes âgées et leur entourage qui ont été habitués à payer leur abonnement au journal par exemple (que ce soit papier ou sur le web), conçoivent bien que nos dispositifs et services ont un coût, comme l'ont montré les enquêtes et études menées auprès d'eux. Il serait intéressant de renouveler cette question aujourd'hui où les offres de vidéo à la demande (un autre service naturellement sur la télé) sont plus répandues.

Dans ce contexte, le projet AMALYS a visé justement un transfert d'innovation vers la start'up Elderis (www.elderis.com), fondée par l'ancien directeur technique de SmarDTV et ancien CEO de Iwedia. Il s'agit alors d'opérer d'un transfert des technologies et savoir-faire de

nos équipes de recherche (un ingénieur d'Elderis a passé plusieurs mois dans nos laboratoires), ceci pour consolider le développement des divers services identifiés par nos études pour le renforcement du lien social sur télé connectée. Le panel des services a été élargi et intégré des applications sur smartphones et tablettes notamment. Les études socio-économiques ont également été réactualisées. En juin 2015, Brest Métropole, après un appel d'offres au titre du soutien à l'innovation résidentielle et de la lutte contre l'isolement de personnes âgées dans leur domicile, s'était engagée à déployer la solution à titre expérimental pendant trois ans auprès de 500 personnes âgées bénéficiaires de logements locatifs HLM. Une telle expérimentation aurait alors permis de conduire nos études, de démontrer le bénéfice de ces solutions, et de soutenir le passage à l'industrialisation de ces travaux. Malheureusement, l'agenda municipal de 2016 a remis en question cet engagement.

1.8 Bilan et perspectives

Dans un dossier thématique de juin 2019, Santé Publique France observe que les plus de 60 ans pourraient représenter le tiers de la population en 2040. L'enjeu aujourd'hui est moins de chercher à allonger la durée de la vie que d'activer les leviers permettant d'améliorer la qualité de vie des personnes vieillissantes et de prévenir de la perte d'autonomie. Nutrition, activité physique, affections chroniques, bien-être psychologique sont ainsi identifiés. À ce titre, l'isolement physique et social est un facteur de risque. Les études sociologiques qui ont accompagné nos travaux ont, sans surprise, confirmé ce point. Se pose alors la question à nous, acteurs de l'innovation dans le numérique, de la réponse que nous pouvons apporter à cet enjeu sociétal. C'est au travers de plusieurs projets collaboratifs (M@LIS Companym@ges-AIPA SIGAAL Mazadoo AMALYS VITAAL) que nous avons exploré la question des dispositifs pouvant renforcer, voire renouer le lien social chez les personnes âgées.

Les études utilisateur nous ont rapidement orientées vers un dispositif technique déjà bien maîtrisé par notre public : la télévision. Reste alors à transformer cet objet du quotidien en un terminal numérique fiable et apprécié, bref, une télé interactive, puis à imaginer des services relationnels adaptés à ce support et aux besoins de nos usagers. Pour ces travaux, nous avons adopté une démarche de co-conception. L'utilisateur final est au cœur de l'action. Dans un premier temps, dès le démarrage du projet l'utilisateur est questionné sur ses usages actuels, ses besoins, ses envies ; il contribue activement à imaginer la solution. Ensuite, et tout le long des développements techniques, il est mis à contribution pour évaluer son ressenti face aux fonctionnalités développées, l'ergonomie, et le cas échéant susciter des ajustements. Enfin, une fois les développements techniques finalisés, l'utilisateur expérimente la solution en situation réelle sur de longues périodes. La démarche de co-conception permet d'apporter des solutions pertinentes et évite ce que les sociologues appellent les «ruines technologiques», c'est-à-dire ces dispositifs imaginés de manière hors-sol par les technophiles, mais dont les utilisateurs se détournent faute de réel intérêt. Laisser la place à une démarche de co-conception a également un impact sur la gestion de projet, puisque typiquement la phase de développement de la solution elle-même est raccourcie, les premiers temps étant consacrés au développement de briques techniques a priori pressenties, et les derniers temps étant consacrés à l'intégration et la maintenance. Cela doit donc être anticipé par tous les acteurs du projet, partenaires et financeurs.

Ces projets ont un caractère pluridisciplinaire (informatique, sociologie, ergonomie, économie de la santé), mais qui va au-delà du simple partage de livrables et rapports produits par les équipes de chaque discipline. Il s'agit d'une intégration plus forte entre les acteurs : parfois, ce sont des collaborateurs d'autres équipes qui séjournent plusieurs semaines dans nos murs pour travailler ensemble sur certains points. Mais d'autres fois, cela passe par le recrutement de professionnels d'autres disciplines (sociologues, ergonomes) au sein de notre équipe d'infor-

maticiens. Cette intrication des compétences apporte une réelle assise aux résultats. C'est aussi une expérience personnelle stimulante, mutuellement enrichissante, où chacun doit s'ouvrir non seulement aux problématiques de l'autre, mais aussi à ses méthodes de travail.

Nos projets de recherche s'accompagnent d'une phase d'expérimentation en situation réelle, dans le lieu de vie des expérimentateurs, et sur une période significative. De ce fait, l'objet à l'étude se doit d'être d'un niveau d'aboutissement particulièrement poussé, fiable, convaincant, d'un niveau de technicité élevé. Les partenaires industriels y concourent, mais le prototype de recherche doit atteindre un niveau de maturité qui dépasse le traditionnel prototype de laboratoire évalué sur table. Ce type de projet scientifique implique d'inclure des phases d'ingénierie solides. Cela a donc un impact sur le montage et la gestion du projet. Certains projets de recherche peuvent justement faire le choix de repousser cette phase d'ingénierie, pourtant nécessaire à la confrontation à des utilisateurs réels, à un éventuel projet ultérieur dédié, lui, à la maturation, l'intégration, et enfin l'expérimentation en situation réelle.

Les projets que nous avons menés démontrent qu'il y a un vrai besoin de solutions pour renforcer le lien social chez les personnes âgées. Les dispositifs basés sur des solutions numériques et la télé interactive sont bien acceptés, et apportent un niveau de réponse pertinent. Les difficultés techniques pour offrir des services riches et fluides sont aujourd'hui bien maîtrisées. Il y a potentiellement un marché, puisque les usagers montrent une réelle propension à payer, même si le positionnement de ces services à cheval sur le bien-être et le loisir semble compliqué, surtout vis-à-vis des pouvoirs publics contributeurs-financiers ou prescripteurs.

Il reste pourtant encore aujourd'hui des éléments, notamment techniques, qui peuvent expliquer les freins à des déploiements plus massifs. Si la télévision d'aujourd'hui a toutes les capacités d'un ordinateur de bureau, le déploiement des applications reste confidentiel, cloisonné par chaque constructeur qui cherche ainsi à jouer la carte du marché double face : les usagers achètent des appareils, et dans le même temps les fournisseurs de service qui voudraient accéder à ces usagers et proposer des applications doivent contractualiser avec le constructeur. Il n'est pas possible d'installer une application sur son téléviseur sans passer par l'*applications store* du constructeur. Par ailleurs, chaque constructeur vient avec son environnement spécifique pour le développement d'application. Un fournisseur de service qui voudrait développer le logiciel d'une application pour télé interactive doit donc reprendre ses développements pour chaque marque de constructeur de télé ciblée. Il n'y a pas de standardisation à ce niveau, et ce, même si les applications en question ne nécessitent pas d'algorithmique complexe et sont généralement constituées de simples pages, menus, onglets et contenu multimédia en ligne, c'est-à-dire rien d'autre que ce que peuvent réaliser des pages web classiques. C'est pourquoi les applications que l'on trouve aujourd'hui sur télévision sont assez peu nombreuses, limitées aux grands fournisseurs de services de vidéo à la demande sur souscription, à destination des amateurs de séries télé et de sport. Ainsi, pour contourner ces difficultés, certains autres fournisseurs de services préfèrent développer leur propre matériel "box télé" embarquant leur application, la standardisation pour accéder à l'écran passant par le connecteur vidéo hdmI. Les services et applications offertes sont alors calibrés pour convenir au plus grand nombre de clients, et ne laissent pas la place à des besoins particuliers. En dépit des impératifs de sobriété numérique, c'est la voie à suivie en attendant une ouverture de la part des constructeurs de téléviseurs. Pour concrétiser cette ouverture, il faudrait probablement passer par une étape de standardisation auprès des constructeurs, un standard qui définirait le moyen technique concret pour installer une application tierce sur une télé ou une box-télé. (On peut suggérer ici quelques pistes possibles : une application pourrait prendre la forme d'un paquetage zip contenant des fichiers web (html, css, javascripts) qui seraient alors exécutés par le navigateur web de la télé, enrichi d'API type HbbTV, augmenté de fonctions pour offrir du stockage local pour les identifiants clients et autres données spécifiques, et intégrer les autres équipements du réseau local domestique.) Mais l'élaboration de tels standards pourrait relever principalement de la

responsabilité de consortiums de constructeurs, éventuellement accompagnés par les pouvoirs publics.

Un autre axe de travail possible concerne le mode d'interface utilisateur sur télé. Aujourd'hui, nous utilisons essentiellement les flèches de la télécommande pour placer le focus sur un élément à sélectionner, et valider. Cette modalité, bien que fonctionnelle, implique un certain niveau d'emboîtements de menus, sous-menus et listes à items, pour peu que l'on vise à offrir une certaine richesse en fonctionnalités. Ce mode d'interaction est moins fluide que ce que permet le duo habituel clavier-souris, ou encore les écrans tactiles de smartphone ou tablette, des modalités qui sont aujourd'hui le point de référence. Dans le même temps, on voit émerger des interfaces vocales. Aujourd'hui, quelques constructeurs proposent d'ailleurs des modèles où la télécommande est dotée d'un micro, et la télé (voir, les services cloud du constructeur) d'une fonction de reconnaissance de mots. (La télécommande utilisant dès lors une transmission type Bluetooth plutôt qu'infrarouge.) Il s'agit de mots-clefs, avec un dictionnaire et un éventail de possibilités limitées, qui nécessitent une certaine forme d'apprentissage de ce mode de commande par l'utilisateur, et dont les actions tendent à mimer les touches de la télécommande, bien loin des interfaces conversationnelles. Même s'il n'est pas encore dans les habitudes aujourd'hui de parler à sa télécommande, il est fort à parier que ces interfaces vocales se développent. Il pourrait alors être intéressant d'étudier la possibilité de modalités mixtes, combinant voix et touches de la télécommande, ceci afin d'atteindre un certain niveau de fluidité dans la navigation des fonctionnalités toujours plus sophistiquées des applications télé.

La dernière question porte sur le fait de choisir de développer des services authentifiés mono-utilisateur, en non pas omni-utilisateur. On peut constater que ce choix est maintenant bien ancré dans l'écosystème numérique, une tradition qui s'est installée et rarement questionnée. Pour utiliser un service ou un contenu numérique, il est aujourd'hui courant de devoir s'authentifier nommément. Parfois, par simple confort (retrouver ses préférences et données d'une fois sur l'autre, la fameuse "expérience utilisateur"), parfois par sécurité, et parfois aussi pour tracer les habitudes de consommation. Il se pose la question de savoir si cet état de fait est réellement utile au bon fonctionnement du service, ou non. Un smartphone est naturellement dans la poche ou les mains de son utilisateur, et donc associé à un utilisateur clairement identifié. Une tablette est parfois partagée par plusieurs membres de la famille, aussi les constructeurs ont développé des configurations autorisant l'association à plusieurs comptes utilisateurs, mais impliquent une phase d'ouverture de session. La télévision est généralement placée au centre de la maisonnée, et est donc utilisée par toute la famille, c'est-à-dire par toute personne qui est simplement là, devant. Certes, dans notre cas de figure, nos services s'adressent à des personnes âgées en rupture de lien social, et donc généralement seules utilisatrices de leur télé. C'est d'ailleurs avec cette hypothèse qu'ils ont été développés. Pour autant, il paraît intéressant de concevoir des approches pensant des services et applications, non pas pour un seul utilisateur dûment identifié, mais pour tout individu d'un groupe (la maisonnée), voire pour n'importe qui simplement là. Il n'y a pas là de difficulté technique particulière, mais bien un basculement de concept et de rapport entre l'objet technique et l'humain.

Chapitre 2

Gestion de services et communications multimédias

Le point de départ de notre démarche se fonde sur les besoins de l'utilisateur. Les études rapportées dans le chapitre précédent mettent en lumière les services tournés vers la communication. Les technologies numériques y jouent un grand rôle, que ce soit pour les communications interpersonnelles, le divertissement, etc. Il convient donc de se pencher sur les verrous techniques liés à ces services et à l'infrastructure Internet qui les porte.

L'essor dans le grand public de l'informatique communicante s'est traduit, entre autres, par la numérisation des différentes formes de contenus habituels (écrits, musiques, voix, images, vidéos, etc.) ; les appareils modernes intégrant en fait des ordinateurs avec du logiciel implémentant des applications réseau (téléphone, télévision, cadres photos, tablettes, etc.). L'expression "convergence numérique" a ainsi émergée dans le début des années 2010 : bientôt, tout allait converger sur les réseaux IP.

La téléphonie est un service bien ancré dans les usages. Traditionnellement, il s'appuyait sur une infrastructure de communication dédiée. Les terminaux étaient des appareils techniquement simples, et le cœur de réseau assurait des fonctions complexes, opéré par des grandes compagnies nationales et des équipementiers qu'eux seuls pouvaient assurer. Basculer dans le monde IP introduit une simplification et une rationalisation des infrastructures réseau. Les fonctions spécifiques à la téléphonie dans le cœur de réseau sont maintenant assurées par du logiciel en périphérie, et certaines de ces fonctions sont proposées par des acteurs autres que les opérateurs téléphoniques traditionnels. Les terminaux sont informatisés, possiblement intégrés avec d'autres solutions informatiques de l'entreprise, et peuvent réaliser des fonctions de plus en plus complexes, pour des applications métiers, ou pour des opérations techniques comme par exemple des stratégies de gestion des politiques de routage des appels sortants et entrants.

Un second service classique est celui de la télévision, ou plutôt de la consommation de contenus vidéo. Ce domaine aussi tend à converger sur les infrastructures des réseaux IP. Ce service est très consommateur d'espace de stockage et de bande passante. Une stratégie consiste à trouver un équilibre judicieux entre ces deux contraintes, et à procéder à de la réplication des contenus dans des serveurs placés au plus près des utilisateurs, et si possible de manière anticipée. Cette stratégie implique une coopération, technique, mais aussi contractuelle, entre différents acteurs : du fournisseur de contenu au client final, en passant par l'opérateur réseau et le gestionnaire de data-centers.

Un troisième besoin émerge également avec ces nouveaux paradigmes réseau, c'est celui de la connectivité avec accès multiples, et en mobilité. On peut penser au cas du terminal mobile (type smartphone) doté simultanément d'une interface WiFi et d'une interface au réseau cellulaire. Ces deux technologies ont des performances globalement comparables aujourd'hui, mais pas le même mode de facturation ni le même impact énergétique, et l'utilisateur peut vouloir décider

en temps réel comment chaque service utilise tel ou tel lien réseau sur son appareil. Dans le même temps, il peut vouloir rester joignable à tout moment : cette fonction est proposée de longue date par la téléphonie, mais se décline plus difficilement pour les services utilisant les réseaux numériques (techniquement, c'est l'utilisateur qui doit alors impérativement initier toute communication numérique "sortante", et au besoin la maintenir active pour disposer d'un canal de retour "entrant"). La problématique peut être généralisée au cas du véhicule, naturellement mobile. Un véhicule peut être doté de plusieurs liens d'accès, et embarquer un réseau local interconnectant plusieurs équipements à bord. Le besoin, pour ces équipements, est encore de pouvoir rester réellement joignable, et de pouvoir gérer l'usage des différents liens d'accès du véhicule par leurs applications. Notons que, assez étonnement, la question se pose également pour la maison, a priori fixe, mais pas forcément du point de vue IP, et où il est compliqué pour un utilisateur d'accéder aux ressources informatiques de sa maison depuis l'extérieur, ou même d'un équipement à l'autre au sein de sa maison, sans passer par des services "cloud".

C'est dans ce contexte très dynamique pour la prestation de services communiquant qu'ont été menés les travaux exposés dans ce chapitre. Ces travaux ont été portés par trois projets collaboratifs (Companym@ages-MONA, Vipeer, TMS), ainsi que deux doctorats (Ali Sajjad MUSHTAQ, Pratibha MITHARWAL).

2.1 Accès multiples et politiques de routage de flux multimédias

2.1.1 L'émergence de la téléphonie sur IP

Le chapitre précédent (cf. 1) a mis en lumière le besoin profond des personnes à communiquer entre elles, que ce soit à titre personnel ou à titre professionnel d'ailleurs. L'essor des nouvelles technologies offre de nouvelles perspectives. Le paradigme de la convergence se traduit en premier lieu par la volonté d'opérer le traditionnel service de téléphonie, mais en s'appuyant maintenant sur les réseaux de données. Les problématiques d'un service de type téléphonie peuvent se résumer à : retrouver dans le réseau le correspondant que l'on souhaite joindre, échanger des flux multimédias avec lui (en premier lieu de la voix, mais éventuellement de la vidéo, voir des données), et facturer. De nombreux acteurs se positionnent, que ce soit les opérateurs télécoms traditionnels, des équipementiers, ou des start-ups.

Des protocoles propriétaires (p.ex. Skinny racheté par Cisco en 1998, ou bien Skype fondé en 2003), ou normalisés (H323, adopté dans ses premières versions par l'IUT-T en 1998, ou même SIP normalisé en 1999) ont permis d'explorer les grands principes de la téléphonie sur IP (voir des sessions multimédias en général), et de consolider ses nombreuses problématiques techniques et de mise en œuvre. Sur cette base, le protocole SIP (Session Initiation Protocol) se développe fortement dans les années 2000. Porté d'abord par des acteurs du monde informatique (l'empilement des concepts de sessions transactions requêtes, et certains aspects proches de HTTP), et en intégrant également certains fonctionnements inspirés des télécoms (et de la signalisation SS7), ce protocole SIP évolue (un nouveau RFC remplaçant le précédent est publié en 2002). Il intègre de nouvelles fonctionnalités, de nouvelles extensions, et parfois des clarifications (on peut dénombrer la publication par l'IETF de pas moins de 185 RFC depuis). Ce protocole, malgré sa complexité, suscite un véritable intérêt. D'ailleurs, c'est aujourd'hui le socle technique chez les opérateurs de téléphonie fixe et mobile. Vraisemblablement, son atout majeur tient au fait qu'il repose sur une architecture décentralisée ouverte (par opposition à la téléphonie traditionnelle gérée par les grands opérateurs nationaux). Que ce soit un usager isolé ou l'abonné d'un opérateur, tous sont interconnectés (ou plutôt, interconnectables). Les interlo-

cuteurs, dès lors qu'ils ont un accès Internet, peuvent se joindre, c'est-à-dire ouvrir une session et s'échanger des flux multimédias. Cette propriété, la décentralisation, ajoutée à la standardisation ouverte, permet à de nombreux acteurs de se positionner en toute indépendance sur ce marché et proposer soit des services de type opérateur, soit des services complémentaires (p.ex. outils pour réunions téléphoniques, intégration de la téléphonie au sein d'application métier sur l'ordinateur de bureau, gestion de la présence, distribution des flux sur plusieurs terminaux de l'utilisateur, mobilité, etc.). Notons tout de même que les difficultés techniques liées à ce protocole sont bien présentes, notamment car il exploite justement un réseau généraliste (le réseau IP) et non plus une infrastructure télécom dédiée. Aussi, de nouveaux équipements et des prestations de gestion de la téléphonie d'entreprise voient le jour.

2.1.2 Des stratégies de routage au moindre coût

Cette convergence fait que des services très divers exploitent alors un même réseau : le réseau de données. Pour autant, si des services tels que la messagerie électronique ou la consultation de sites web s'accommodent d'un fonctionnement asynchrone, des services comme la téléphonie ou le multimédia requièrent un certain niveau de garanties sur la qualité des liens, la latence, la gigue (des liens possiblement plus chers). Cette question se pose quasiment dans les mêmes termes que ce soit pour les entreprises comme pour les particuliers ; et si les grands groupes se distinguent par leur nombre d'utilisateurs et équipements, l'infrastructure informatique et réseau d'une PME ou d'un artisan est très semblable à un réseau domestique. Les technologies de liaison de données filaires ou radio (Ethernet, WiFi, etc.) offrent en local des qualités généralement suffisantes, voire surdimensionnées, pour ces besoins multimédias. Cependant, c'est moins le cas pour les liaisons de collecte. La problématique se situe en fait à la jonction entre le réseau privé et le réseau public d'accès à Internet.

Il existe des techniques de réservation de ressource dans le réseau pour obtenir des conditions de transports maîtrisés et stables en fonction du cahier des charges fixé (p.ex. RSVP [217], DiffServ [218], ou NSIS [236]). Ces techniques, conçues pour les cœurs de réseaux d'opérateurs et pour la gestion en interne des données transportées, ne sont pas accessibles dans les offres de réseaux d'accès, ni d'un point de vue commercial, ni même d'un point de vue technique. Dans le même temps, les clients peuvent chercher à souscrire à plusieurs liens d'accès Internet, pour des raisons de robustesse, ou parfois d'optimisation des coûts en fonction des usages. Par exemple, une stratégie d'entreprise pourrait être d'avoir un lien d'accès principal à vocation générique, un secondaire en secours, et un lien à la qualité garanti que l'on réservera aux téléconférences ou appels jugés importants ; chaque liaison d'accès offrant des qualités différentes, ainsi que des facturations différentes. Il s'agit alors pour l'utilisateur de consommer judicieusement ses accès. Ainsi sont mises en place des stratégies de Least Cost Routing (LCR), c'est-à-dire de routage au moindre coût.

Le routage dans le monde IP est une fonction classique, basée sur les adresses IP de destination portées par chaque paquet, avec différentes stratégies opérées par les routeurs pour tenir compte de l'état et de la qualité des liens, du nombre de sauts pour atteindre la destination, ou des objectifs d'équilibrage de charge. Dans le monde de la téléphonie traditionnelle, le routage au moindre coût est parfois pratiqué : suivant le numéro appelé (interurbain, intra-urbain, longue distance, suivant le pays, etc.) une ligne et un opérateur peuvent être sélectionnés par un équipement dédié (une fonction assurée par un autocommutateur d'entreprise type PABX (Private Automatic Branch Exchange), voire des boîtiers parfois proposés aux particuliers). Mais dans ces cas-là, les critères de choix restent assez simples et uniformisés : seuls sont pris en compte le numéro composé et la grille tarifaire de chaque opérateur. Mais dans un contexte de téléphonie portée par des réseaux de données, les stratégies de routage d'appel au moindre coût montent en complexité. Peuvent alors rentrer en considération des critères tenant compte

des profils utilisateur, de la qualité demandée (codecs audio, vidéo, etc.), l'utilisation passée ou présente des liens, des modes de facturation (à la durée, au volume, sortant ou entrant, au moment de la journée, etc.). Cela implique que ces politiques de routage soient explicitées, et d'autre part qu'elles puissent être appliquées.

2.1.3 Infrastructure réseau supportant des politiques de routage

Les travaux de thèse de Ali Sajjad MUSHTAQ (cf. 6.1) s'inscrivent dans le cadre du projet Company@ages-MONA (cf. 5.2.1). Avec l'aide de partenaires industriels (Alcatel Lucent, NeoTIP / Comverse), nous nous sommes intéressés à l'infrastructure réseau typique d'entreprises de taille moyenne. De fait, la nature et l'activité de l'entreprise impactent peu, et d'ailleurs cela peut tout aussi bien inclure des établissements comme des maisons de retraite telles que celles qui ont participé aux expérimentations de Company@ages-AIPA ou Mazadoo. Le critère porte sur les besoins en termes d'informatique, de communications numériques internes et externes, de services de données, de multimédia, de téléphonie, et les différents types d'utilisateurs. Nous faisons également comme hypothèse que la téléphonie est sur IP, et que l'établissement souscrit à plusieurs fournisseurs d'accès Internet (ISP, Internet Service Provider).

Dans le cas de la téléphonie sur IP, le terminal de l'utilisateur peut être un appareil (un combiné téléphonique semblable dans sa forme à ceux utilisés dans la téléphonie traditionnelle, mais doté d'une prise Ethernet et de logiciel), ou bien d'une application s'exécutant sur un ordinateur de bureau (on parle alors de *softphone*, téléphone purement logiciel). L'entreprise dispose également un serveur pour sa téléphonie sur IP : un IPBX (ou PABX IP), c'est-à-dire un autocommutateur sur IP. Dans l'architecture SIP [227], un tel serveur assure deux fonctions : *proxy* et *registrar*. Le registrar est l'annuaire des usagers connus du serveur auprès duquel les téléphones s'enregistrent de manière dynamique lors de leur mise en marche pour annoncer leur adresse IP courante et ainsi être joint en cas d'appel. Le proxy est utilisé à l'initialisation de chaque appel émis et a pour charge de retrouver sur Internet l'adresse IP du correspondant en allant interroger le serveur de son domaine. Dans l'absolu, ces deux fonctions peuvent être assurées par des équipements distincts, mais elles sont fréquemment intégrées dans un même serveur. C'est notamment le cas pour la solution OXE (OmniPCX Entreprise) de notre partenaire Alcatel Lucent. La téléphonie sur IP, et plus particulièrement la solution SIP, implique que le serveur et les postes des usagers soient accessibles sur Internet depuis l'extérieur de l'entreprise. Aussi, pour des raisons de sécurité on place généralement un équipement de type SBC [247] en frontal (Session Border Controller, tel que le produit NeoXBC de notre partenaire NeoTIP). Il s'agit d'un *pare-feu applicatif* (ou ALG, Application-level gateway), un équipement chargé de protéger le réseau de l'entreprise et placé en bordure, c'est-à-dire à l'interface entre le réseau interne de l'entreprise, et le réseau d'accès Internet des ISP. Il s'assure que les paquets entrants provenant d'Internet sont "légitimes", c'est-à-dire associés à un appel téléphonique en cours. Ce pare-feu doit écouter les messages de signalisation, suivre s'il s'agit de demandes d'appel, repérer les adresses IP et numéros de port annoncés, et ouvrir les accès correspondants. Dans le cas de réseau d'entreprise simple ou pour du résidentiel, on peut se limiter à ces fonctions. Mais possiblement, un SBC peut procéder à des réécritures des requêtes, de la translation d'adresses et de ports. Dans certains cas, il peut aussi intervenir dans la négociation des codecs pour forcer certains, et faire du transcodage.

Dans le cadre de notre étude, nous ajoutons un serveur de politiques de routage. Le principe du serveur de politiques est déjà défini et employé dans le contexte de la gestion du contrôle d'accès et de QoS dans les réseaux avec RSVP et COPS (Common Open Policy Service [219-221]), puis généralisé au concept de Policy Based Network Management (PBNM) par un groupe de travail à l'IETF ([224, 225, 231]) porté par un consortium d'industriels comprenant Cisco Lucent Sun IBM. Vient également le principe d'un découpage des rôles entre un

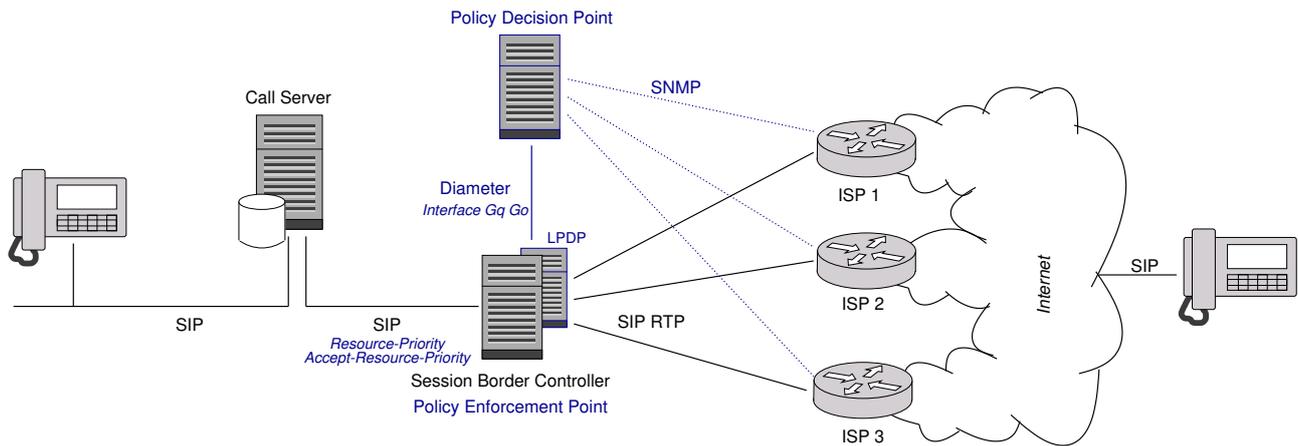


FIGURE 2.1 – Architecture logique de la plate-forme de gestion des politiques de routage

Policy Decision Point (PDP) qui stocke des politiques, prend des décisions, et approvisionne en règles un Policy Enforcement Point (PEP) qui se doit de les faire appliquer concrètement sur un équipement réseau, et ce pour chaque requête ou demande de service. On a donc un partage des rôles avec le PDP qui œuvre sur un temps long (prend des décisions en fonction des objectifs d'entreprise), et le PEP qui œuvre sur un temps court (fait appliquer ces décisions). Parfois, pour des questions de performance et de robustesse, est placé à proximité du PEP un Local Policy Decision Point (LPDP) qui joue un rôle de cache des règles approvisionnées par PDP. Dans notre étude, le serveur de politiques que nous définissons est donc un Policy Decision Point, et la fonction de Policy Enforcement Point sera assurée par le Session Border Controller.

La figure 2.1 illustre l'architecture proposée pour une plate-forme de sessions multimédia offrant une gestion de politiques de routage [22, 23, 70]. Les études sur l'architecture du système incluent des choix au niveau des protocoles mis en œuvre : Diameter, SNMP, SIP

Contrôle d'accès

Le protocole Diameter a été retenu pour la communication entre le serveur de politiques (Policy Decision Point) et le SBC (Policy Enforcement Point) [241]. Diameter est une extension du protocole Radius (Remote Authentication Dial In User Service [223]), et qui comme son prédécesseur offre des fonctionnalités pour l'authentification et le contrôle d'accès (Authentication, Authorization and Accounting). Cependant, Diameter a une portée plus large puisqu'il a été pensé pour être utilisé au travers d'Internet et pas seulement sur une architecture de réseau local (p.ex. utilisation de protocoles de transports fiables tels que TCP ou SCTP, et non plus UDP, des mécanismes de reprises, de keep-alive, etc.). Il est l'un des composants de l'architecture standardisée pour la téléphonie IMS (IP multimedia subsystem) développée par le consortium 3GPP (3rd Generation Partnership Project) qui regroupe les différents organismes de standardisation et opérateurs en télécommunication et téléphonie. À ce titre, il est un candidat privilégié pour notre architecture.

Le protocole Diameter consiste en un protocole de base, auquel s'ajoutent diverses extensions, par exemple pour la mobilité, la qualité de service, ainsi que pour la gestion du contrôle de politiques. Le 3GPP définit notamment les interfaces 'Gq' et 'Go' (une interface est un jeu d'attributs-valeurs dans les messages Diameter, ou Attribute Value Pairs - AVPs) pour la gestion de politiques de contrôle (de AAA (Authentication, Authorization, Accounting) et de QoS (Quality of Service) essentiellement) [99, 100]. Ces interfaces sont justement ce qui est le plus proche de notre besoin. Nous les utilisons donc, avec cependant l'introduction d'AVPs spécifiques (interface IP choisie, port, classe d'utilisateur). Notons que le protocole COPS [219],

défini également pour la dissémination de politiques d'accès, a été écarté, car il est conçu et dédié plus spécifiquement à la configuration et la gestion d'équipements, et n'est pas adapté à un fonctionnement dynamique, c'est-à-dire à des échanges qui s'opèrent au rythme des établissement des sessions d'appel des utilisateurs, même si cela a pu être proposé pour la gestion des marquages Diffserv. De même, des travaux avaient proposé de dériver le protocole SNMP pour gérer des fonctions de PBNM [87], avec finalement les mêmes limitations que COPS.

Supervision des routeurs d'accès

Le protocole SNMP est un protocole largement utilisé aujourd'hui pour la gestion et la supervision en interne d'équipements réseau (routeurs, switchs, bornes WiFi, etc.), c'est-à-dire relever des compteurs, des paramètres techniques, déclencher des alarmes (traps) [230]. Même si le protocole est extensible et peut transporter des données de toute sorte, son cadre habituel d'utilisation est différent de la gestion de politique d'accès des utilisateurs à des services. Dans notre architecture, le protocole est utilisé par notre PDP (serveur de politique) de manière traditionnelle : il s'agit de relever un certain nombre de métriques sur les routeurs d'accès à propos de l'état des liens fournis par chacun des fournisseurs d'accès de l'entreprise (actif/inactif, bande passante utilisée en temps réel, volume consommé, taux de perte de paquets, etc.).

Gestion des sessions multimédias

Le protocole SIP (Session Initiation Protocol) [227] est couramment employé dans la téléphonie sur IP aujourd'hui, et pour des services multimédias en général. Il est au cœur de notre plate-forme. Ce protocole sert aux utilisateurs à initier des appels, retrouver leur correspondant dans le réseau, et négocier des codecs. Pour ce dernier point, le protocole SIP utilise le format SDP (Session Description Protocol) [265] qui permet à l'utilisateur (ou son terminal) de décrire les codecs audio et vidéo supportés par ordre de préférence, ainsi que les adresses IP et ports qu'il utilise pour cela. Les données audio et vidéo seront échangées via le protocole RTP (Real Time Protocol) [232], sur des flux réseau distincts de la communication SIP qui n'a qu'un rôle de signalisation. Lors d'un appel, l'appelant confie à son Call Server un message SIP *INVITE* en précisant l'identifiant de l'appelé (en fait, une URI qui précise l'utilisateur, mais aussi son domaine), ainsi que le SDP décrivant les flux multimédias qu'il propose. Le Call Serveur, ou plus exactement sa fonction de *proxy*, va rechercher dans le réseau le Call Serveur en charge du domaine de l'appelé, et lui relayer le message d'invitation, qui, à son tour, pourra le relayer sur le terminal de l'appelé, qui se sera au préalable enregistré auprès de son propre Call Serveur pour lui indiquer son IP. L'appelé peut alors répondre, s'il le souhaite, par un message *OK* (qui fait le chemin inverse), avec également un SDP décrivant ses propres flux multimédias. La fonction principale du protocole SIP est donc de faire en sorte que l'appelant et l'appelé se retrouvent mutuellement dans le réseau, par l'intermédiaire de leurs serveurs respectifs. Ceci étant fait, les flux multimédias peuvent alors être échangés directement entre appelé et appelant, sans passer par les Call Serveurs. (À ce titre, SIP est parfois qualifié de protocole pair à pair.) Ainsi peut être résumé le fonctionnement nominal de SIP/SDP.

Pour autant, dans notre architecture nous avons un équipement en coupure de ces flux, le SBC (Session Border Controller), qui est à la frontière entre le réseau d'entreprise d'une part, et chacun des réseaux des différents fournisseurs d'accès de l'entreprise d'autre part (rôle de pare-feu). Ce SBC est notre Policy Enforcement Point, car il est en capacité d'aiguiller les flux vers l'un ou l'autre des fournisseurs d'accès, et ce en fonction de ce que lui indique le serveur de politique que nous avons ajouté, le Policy Decision Point.

Le SBC voit passer les messages SIP/SDP et a donc connaissance des codecs et par conséquent des caractéristiques des flux de données multimédias qui seront échangés. Grâce à cela, il peut instruire notre serveur de politiques. Par contre, même s'il voit également les identifiants

des correspondants, il ne sait rien des permissions qui leur sont attribuées par l'entreprise : ce n'est pas son rôle, c'est le rôle du Call Serveur de l'entreprise et de sa base utilisateurs (il authentifie les utilisateurs de l'entreprise et leurs terminaux). Pour cette raison, nous avons choisi d'enrichir la signalisation SIP qui s'effectue entre le Call Server et le SBC au moyen de champs optionnels dans l'entête SIP : *Resource-Priority* et *Accept-Resource-Priority* [238]. Ces champs ont été normalisés pour compléter les messages SIP avec des indications de priorisation sur les ressources réseau, par exemple lors d'une situation d'urgence, indiquer que tel appel est un appel aux secours et doit être traité en priorité. En fait, les valeurs (une séquence de termes de la forme *domaine.ressource*) ont une signification purement locale à l'entreprise, hors de tout standard. Nous sommes donc libres de les utiliser pour encoder les catégories et permissions de nos utilisateurs dans notre plate-forme.

Lors d'un appel sortant, l'appelant qui est au sein de l'entreprise confie un message SIP *INVITE* à son Call Server. Celui-ci effectue diverses vérifications d'authentification, recherche le serveur du destinataire dans le réseau, mais avant de renvoyer ce message dans le réseau, il va le compléter avec le champ *Resource-Priority* et une valeur encodant les permissions de cet utilisateur, tel qu'il a pu les retrouver dans sa base utilisateurs. Le SBC intercepte ce message SIP, et obtient alors cette information supplémentaire, qu'il peut alors remonter au serveur de politique. Celui-ci, connaissant les permissions attribuées à l'utilisateur, la nature de l'appel (codecs employés), et l'état des liens des fournisseurs d'accès, il peut alors indiquer au SBC par quel lien faire transiter cet appel. Le SBC retire le champ *Resource-Priority*, et modifie les adresses IP des messages SIP/SDP pour s'aligner avec celles du lien du fournisseur d'accès, et expédie ces messages SIP au destinataire par le lien choisi.

Lors d'un appel entrant, c'est le SBC qui voit arriver un SIP *INVITE* de l'extérieur par l'un de ses liens sans avoir aucun pouvoir de contrôle sur le choix du lien en question. Cette invitation est relayée en interne au Call Serveur de l'entreprise, qui la retransmet à l'appelé dans l'entreprise. Si celui-ci accepte l'appel, sa réponse *OK*, qui transite via son Call Serveur, va y être enrichie avec le champ *Accept-Resource-Priority*. Comme précédemment, le SBC intercepte ce message, remonte les informations collectées auprès du serveur de politique, qui en retour lui indique quel fournisseur d'accès utiliser. Le SBC est contraint de faire sortir les messages SIP par le lien par lequel ils sont arrivés. En revanche, il va comme précédemment modifier les adresses IP dans le SDP pour que les données multimédias transitent par le fournisseur d'accès choisi, et préciser le chemin souhaité dans le champ *Path* de SIP [228].

2.1.4 Le serveur de politiques de routage et prise de décision

L'architecture de la solution s'articule autour de deux entités, l'une qui prend les décisions (notre serveur de politiques, ou le Policy Decision Point dans la terminologie PBNM), et l'autre qui les applique (ici le Session Border Controller, l'équipement qui gère le service en bordure de réseau, et qui joue le rôle de Policy Enforcement Point). Deux modes de fonctionnement sont traditionnellement envisagés. Le mode *outsourcing* (pull) implique que le PEP sollicite le PDP à chaque nouvelle session utilisateur pour qu'une décision de routage soit prise. À l'inverse, le mode *provisionning* (push) implique que le PDP prédéfinisse un ensemble de règles générales et les pousse au PEP (au démarrage et à chaque changement majeur détecté) pour que celui-ci puisse les appliquer par lui-même en toute autonomie aux sessions utilisateur qu'il a à traiter.

Le mode *outsourcing* ajoute a priori un délai supplémentaire dans la chaîne de traitement de chaque session utilisateur, délai provoqué par cet aller-retour entre le PDP et le PEP, deux entités séparées et interconnectées par le protocole réseau Diameter retenu. Nos expérimentations ont donc également cherché à évaluer ce délai supplémentaire. A contrario, si le mode *provisionning* permet de raccourcir ce délai, il introduit une complexité supplémentaire : la prise de décision est scindée en deux (un premier niveau dans le PDP pour produire des règles

générales, puis un second dans le PEP pour décliner ces règles à chaque session utilisateur), avec également la nécessité de définir un modèle de données supplémentaire pour ce format intermédiaire des règles générales. Aussi, pour contourner cette complexité pour notre prototype, nous avons choisi de simplement répliquer le PDP au sein du PEP (sur le même ordinateur), faisant ainsi l'économie des échanges réseau Diameter. Cette façon d'implémenter le mode provisioning est ce que nous avons appelé le mode *outsourcing off-line* (par opposition à un mode *outsourcing on-line* qui correspondrait en fait au pur mode outsourcing théorique). Les discussions avec nos partenaires industriels nous ont conforté dans l'idée que cette façon de faire est assez raisonnable. Autrement dit, cette approche serait vraisemblablement retenue pour des produits industriels, indépendamment de l'élégance avérée du modèle théorique.

Les travaux sur le Policy-Based Network Management ont introduit un modèle de gestion de données pour l'expression et l'utilisation de politiques de services réseau (DEN puis DENng, Directory Enabled Networks new generation), qui inclut à la fois les directives générales et choix de l'entreprise, mais aussi des caractéristiques techniques de plus bas niveau à propos des équipements et des liens. Le mot *directory* se rapporte en fait au type de base de données considéré (comme pour les serveurs LDAP, solution préconisée d'ailleurs pour le PBNM pour stocker les règles et politiques de gestion). Ces travaux se sont concrétisés par le modèle de données Policy-Based Network Management [224]. Les données considérées alors ont trait avant tout à la gestion des problématiques de contrôle d'accès des utilisateurs, de QoS, du marquage des flots Diffserv. Notre plate-forme considère des informations de nature légèrement différente. Les Service Level Agreements (SLA) sont les paramètres techniques des liens réseau définis contractuellement entre le fournisseur d'accès et l'entreprise cliente. Ces informations, leurs valeurs et même leurs natures, sont confidentielles. Cependant, nos partenaires industriels nous ont fourni quelques exemples représentatifs (p.ex. bande passante 4Mbits/s au 95^e percentile, latence entre 50 et 100 ms, gigue entre 50 et 60 ms, taux de perte de paquets entre $1.0E^{-09}$ et $1.0E^{-06}$, facturation cumulative à l'octet ou au forfait, etc.). Les différents profils de services (codecs audio/vidéo employés dans les sessions utilisateur) ont des caractéristiques connues en termes de bande passante consommée, délai gigue et taux de perte admissibles. L'état des liens est collecté par SNMP auprès des routeurs d'accès mis en place au niveau des liens des fournisseurs d'accès (données déjà gérées par l'approche PBNM classique). Nous nous définissons des profils utilisateur (pour nos expérimentations : Gold Silver Bronze), associés à des autorisations sur les ressources consommables. En résumé, les données sont structurées en profils (de services, d'utilisateurs, de liens). L'objectif est de croiser ces données, et à chaque demande de service utilisateur de choisir le lien réseau à utiliser, voir à classer par ordre de préférence les différents liens disponibles.

Notre serveur de politiques doit prendre des décisions en fonction de paramètres variés. Ces paramètres sont chiffrés et vont orienter la prise de décision pour atteindre l'objectif (ici, choisir un lien réseau pour un service et un utilisateur donné). Ces paramètres représentent des grandeurs et dimensions du problème, des alternatives, et parfois sont en conflit entre eux. Ils vont peser de manière variée dans la décision finale. Certains de ces paramètres sont statiques (liées à la configuration du système), d'autres sont dynamiques (liés à la nature du service demandé à l'instant, de l'utilisateur, et de l'état des liens). Incidemment, ces différents paramètres se voient attribuer une pondération pour la prise de décision finale. Nous écartons les approches type Weighted Sum Model (WSM) [75] (somme pondérée de critères, avec la nécessité de se rapporter à une même unité et dimension) et Weighted Product Method (WPM) [74, 76] (produit pondéré, qui permet de s'affranchir du problème de l'uniformité des unités), car, si ces méthodes restent relativement simples d'un point de vue calculatoire, elles impliquent que l'administrateur de la plate-forme soit en capacité de définir des pondérations uniformes et globales pour tous les critères en jeux, ce qui ne semble pas raisonnable en pratique. La question des pondérations est un aspect récurrent des méthodes de Multi-Criteria Decision Making

(MCDM) [111]. (Note : certains préfèrent le terme de Multi-Attribute Decision Making sans que nous fassions de distinction à notre niveau). À ce titre, l'approche TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution [80]) apporte une première réponse. L'idée consiste à ordonner les alternatives suivant la distance euclidienne entre la solution idéale et la solution pire. Cette méthode implique également que nos critères soient des fonctions monotones, ce qui est bien le cas de notre problème (et même des fonctions linéaires). L'intérêt majeur est que cette méthode prend en compte les problèmes multidimensionnels, et que les critères peuvent se compenser les uns les autres, c'est-à-dire que l'on peut définir des pondérations relatives entre ces critères, même de dimensions différentes. La méthode inclut une étape de normalisation qui peut être linéaire, ou bien basée sur un vecteur fixé si l'on doit gérer des "compromis" importants. La méthode simple, linéaire, correspond bien à la formulation de notre problème. Nous nous intéressons à l'une des extensions de TOPSIS qui a été proposée pour tenir compte des plages de valeurs possibles pour les paramètres [139] : en normalisant chaque critère sur $[0 \dots 1]$ par rapport à son intervalle de valeurs (information connue pour chacun des paramètres de notre cas d'usage), il est plus aisé de déterminer une pondération relative de chaque critère, et ainsi d'offrir un moyen réaliste à l'administrateur d'une plate-forme pour paramétrer ses objectifs d'entreprise.

Nous nous intéressons également à l'approche Grey Relational Analysis (GRA) [81], proposée initialement pour appréhender les situations incluant de l'incertitude, c'est-à-dire où des données sont caractérisées moins par une valeur précise que par une plage de valeurs. Dans notre cas d'usage, nous disposons de valeurs précises. Mais l'autre intérêt de GRA est qu'il s'agit, comme pour TOPSIS, d'évaluer d'une certaine manière la proximité entre chaque alternative et une solution idéale. Après une étape de normalisation similaire à la méthode étendue de TOPSIS pour ramener chaque paramètre à une valeur entre 0 et 1, un Grey Relation Coefficients (GRC) est calculé pour chacun des critères de chaque alternative de manière à évaluer sa proximité avec celui de la solution idéale. La solution idéale, après normalisation, est en fait celle où chaque critère serait pleinement satisfait, et donc à 1. La justification de la construction de ce GRC est expliquée par la Grey System Theory ; elle requiert une certaine gymnastique intellectuelle pour l'appréhender, même intuitivement, et sort du périmètre de notre étude. Nous appliquons donc sa formulation telle quelle. La dernière étape consiste à calculer la somme pondérée de ces GRC de chaque alternative, donnant ainsi un score pour chacun d'elle. À nouveau, cette dernière étape nécessite de se définir des poids spécifiant la préférence relative de certains critères sur d'autres. Ici, les poids sont moins intuitifs que pour les méthodes précédentes puisqu'appliqués à des coefficients issus de calculs et non pas de paramètres de l'application ou de la plate-forme. Il est toujours possible de se les définir de manière manuelle et empirique (p.ex. dire que tel critère compte pour 15% et tel autre pour 20%), mais cela devient mal aisé lorsque le nombre de critères est grand. Aussi, dans la littérature, on utilise la méthode Analytical Hierarchy Process (AHP) [79]. L'idée générale de AHP est de découper l'ensemble de critères en sous-problèmes indépendants et appréhendables. Et justement, dans notre cas d'utilisation, les différents critères sont naturellement organisés en profils (de services, d'utilisateurs, de liens). AHP est autant une méthode mathématique que psychologique. Il faut, dans un premier temps, se donner ce découpage du problème global en sous-problèmes. Au sein de chaque sous-problème, les acteurs de la prise de décision (dans notre cas, l'administrateur de la plate-forme qui doit y paramétrer les objectifs d'entreprise) comparent les sous-critères deux à deux pour leur attribuer une importance relative (avec une contrainte de réciprocité : si on estime que la prépondérance du critère A sur B est de 3, il faut que la prépondérance de B sur A soit de $1/3$, ce qui peut être sujet à discussions d'un point de vue psychologique...). Il en ressort une pondération relative locale aux sous-critères au sein d'un sous-problème. Ensuite, les sous-problèmes d'un même niveau hiérarchique sont, de manière similaire, comparés entre eux pour estimer leur importance relative. On construit ainsi une pondération globale aux dif-

férents critères qui composent l'objectif. Nous nous sommes donc livrés à l'exercice pour nos expérimentations. Notons que AHP peut être utile aussi bien pour GRA que pour TOPSIS, et même WSM (c'est d'ailleurs l'usage souvent donné en exemple pour illustrer AHP).

Expérimentation et évaluation

Les expérimentations menées dans nos études ont pour but d'une part de valider les aspects fonctionnels (choix d'architecture de la plate-forme avec les différents composants et les protocoles les interconnectant, choix du modèle de données et des méthodes de calculs pour prendre les décisions), mais aussi d'évaluer de manière quantitative l'impact sur le service (délais supplémentaires introduits, taux de pertes éventuelles des appels multimédia, etc.) [24, 25, 30]. Puisque nous ne pouvons conduire d'expérimentations en situation réelle, nous nous fixons un certain nombre de paramètres (nombre de liens, caractéristique de chaque lien, types d'appels, typologie d'utilisateurs), de manière aussi raisonnable et vraisemblable que possible, et avec les préconisations de nos partenaires industriels Alcatel-Lucent et NeoTIP).

Pour nos expérimentations, nous avons utilisé l'implémentation Java open source Diameter OpenBloX Traffix [209], modifié pour nos besoins. Quelques tests fonctionnels ont pu être menés avec les solutions OXE Alcatel et NeoXBC de nos partenaires, et modifiés par leurs soins pour supporter les champs SIP ajoutés, et ceci via des liens IPsec entre nos laboratoires. Pour un prototypage plus complet de notre proposition, et pour plus de simplicité, nous avons utilisé le serveur SIP open source OpenSIPS [125] : une première instance joue le rôle du Call Server, une autre configurée en Back to Back User Agents (B2BUA) joue le rôle du SBC. Sa fonction de Load Ballancing (équilibre de charge entre plusieurs liens, avec son propre estimateur de charge) a été modifiée pour aiguiller les flux en fonction de nos propres paramètres et directives. L'outil SIPp [148] est utilisé pour générer des appels SIP de manière intensive (requêtes INVITE) et évaluer les performances de l'architecture.

Nous évaluons dans un premier temps le délai introduit par le serveur de politiques en monde outsourcing on-line (c.-à-d. le serveur de politiques à distance, interconnecté en Diameter), comparé au mode outsourcing off-line (c.-à-d. le serveur de politiques en local, semblable au mode provisionning), et avec comme point de référence la fonction d'équilibre de charge simple (c.-à-d. sans véritable prise de décision). Lorsque le nombre d'appels simultanés est faible (10 par seconde), la traversée du SBC par les échanges de signalisation SIP (pour l'établissement d'appel) est de l'ordre de 1 milliseconde, alors qu'avec notre serveur de politique (on-line comme off-line) elle est d'environ 5 millisecondes. Lorsque l'on augmente le nombre d'appels simultanés (2000 par seconde), des délais passent à 15ms prise de décision, et à 20ms et 25ms environ avec respectivement le mode on-line et off-line. Nous constatons donc sans surprise que le mécanisme de prise de décision introduit un délai supplémentaire, mais qu'il reste très faible au regard du contexte d'utilisation (quelques millisecondes de plus lorsqu'un usager initie un appel), et ce même si l'on pousse la charge dans des limites rarement atteintes en entreprise (2000 appels simultanés).

Nous évaluons également les performances respectives des stratégies de prise de décision (Extended TOPSIS et GRA, avec comme point de référence la stratégie simple d'équilibre de charge proposée par OpenSIPS), en évaluant le taux d'occupation des liens lorsque le nombre d'appels augmente. Ainsi, alors que la stratégie classique d'équilibre de charge (c'est-à-dire sans prise de décision par notre serveur de politique) n'arrive à remplir les liens qu'à 70%-80%, la stratégie Extended TOPSIS fait environ 5 points de plus, et GRA quasiment 10 points de plus. Ces résultats s'observent également sur le taux de succès des appels. (Naturellement, si un appel ne trouve pas de liens à occuper, il échoue.) Ainsi, la stratégie GRA, même si elle est moins intuitive, semble plus pertinente que TOPSIS (tout du moins, dans le cadre de nos expérimentations et avec les paramètres que nous nous sommes fixés). Les deux ayant

par ailleurs un avantage sur le simple équilibrage de charge et qui, même s'il arrive à remplir raisonnablement les liens, n'offre aucune stratégie de routage au moindre coût. La solution proposée apporte donc un intérêt à la fois qualitatif et quantitatif.

Extension à des services non multimédias

La plate-forme a fait l'objet d'une extension pour étudier l'intégration de services autres que multimédias [26]. Très concrètement il s'agissait de définir comment gérer des connexions TCP. La démarche PBNM prévoit en effet qu'un Policy Decision Point puisse desservir plusieurs Policy Enforcement Point, chacun œuvrant pour un domaine. Ici, nous avons donc un *domaine* pour les services multimédias autour du protocole SIP (et avec un SBC comme PEP), et un *domaine* pour les services de données autour du protocole TCP (avec un PEP à définir). Pour le prototypage, nous avons choisi d'utiliser le protocole SOCKS5 [216]. Il s'agit d'un protocole simple permettant à une application (client) de demander à un proxy (serveur) de relayer le contenu d'une connexion TCP. En fait, la connexion TCP débute par un message précisant l'adresse IP et le port TCP à contacter (ou possiblement UDP), et les identifiants de l'utilisateur ; les données suivantes étant le contenu le flux applicatif lui-même. En ce sens, il est plus simple et plus général que les mécanismes de proxy web. Notons que nombre d'applications grand public (p.ex. navigateurs web) proposent dans leurs paramètres réseau la possibilité d'utiliser un proxy SOCKS5. Pour prototyper notre PEP, nous avons utilisé la solution Jsocks [136], une implémentation Java d'un serveur SOCKS que nous avons pu modifier pour l'interfacer avec la pile Diameter OpenBloX pour dialoguer avec notre serveur de politiques, et ainsi valider de manière qualitative l'approche globale d'une solution unifiée. Notons que cette approche pour gérer les services de données comporte un certain nombre de limites. Tout d'abord, il n'est possible de gérer que les connexions sortantes ; pour réaiguiller des connexions entrantes, il faudrait qu'elles soient transportées par un protocole supportant la mobilité (p.ex. MPTCP ou SCTP). Ensuite, le proxy SOCKS5 reçoit bien les identifiants de l'utilisateur, mais il doit faire lui-même la correspondance avec un profil utilisateur et ses niveaux d'accréditations (alors que dans notre solution SIP cela est géré par le Call Server de l'entreprise). Enfin, le proxy SOCKS5 connaît l'adresse IP et le port du service à contacter pour l'application cliente, mais il doit déterminer par lui-même un profil ou une classe de service applicatif (paramètres réseau requis et consommés, en termes de bande passante, délais, pertes acceptables, etc.). Pour autant, la solution est fonctionnelle.

2.1.5 Bilan des études sur la gestion des accès multiples

Disposer d'un accès à Internet est aujourd'hui un enjeu important, pour les particuliers comme pour les entreprises. Nombre de services s'appuient sur une connectivité qui se doit rester active et de qualité (c.-à-d. au moins suffisante pour les besoins des applications). Il n'est pas rare alors que l'on choisit de souscrire à plusieurs fournisseurs d'accès pour palier toute défaillance. Par ailleurs, même si la téléphonie a aujourd'hui *convergé* avec les données sur le support Internet, ce service reste un peu à part (obligation de résultat, appels d'urgence, etc.), et des opérateurs spécialisés proposent des liens avec des qualités et services garantis. Pour le client, il convient alors de *gérer* l'utilisation de ces ressources réseau par les différents services de ses utilisateurs, le principe de Least Cost Routing. Pour réaliser cette gestion, un modèle d'architecture se met en place assez naturellement où l'on distribue les rôles entre d'une part la prise de décision, et d'autre part l'application de cette décision, sans oublier le modèle de données nécessaires pour nourrir la décision. Dans le cadre de services de téléphonie (audio ou multimédia) sur IP, nous avons un serveur de politique pour prendre des décisions, et un Session Border Controller pour les appliquer ; côté gestions des informations de décision, le paramétrage des Service Level Agreements (caractéristiques garanties des liens et modes de facturation), les

terminaux des utilisateurs (codecs utilisés pour l'appel), le Call Server (profils utilisateurs), et les routeurs de bordure (état des liens réseau), fournissent les données requises. La prise de décision elle-même, le calcul de la meilleure alternative pour une requête à un instant donné est réalisé en utilisant les méthodes proposées classiquement dans le domaine de l'aide à la décision multicritère (dans nos expérimentations, les méthodes TOPSIS et GRA).

Les études menées ont permis de valider qualitativement et quantitativement la solution proposée, et ont mis en exergue les contraintes liées. Par exemple, la prise de décision peut se faire par des méthodes analytiques globalement simples, mais requiert que les objectifs de l'entreprise se traduisent par des pondérations chiffrées sur les différents critères en jeu (qui peuvent être nombreux, et techniques). Nous avons vu que la méthode Analytical Hierarchy Process (AHP) pouvait apporter une aide pertinente. Des approches non analytiques pourraient être expérimentées, par exemple des algorithmes d'apprentissage par renforcement, puisque dans notre contexte nous disposons de fonctions de coût ou de récompense assez naturelles, et avec possiblement un pré-entraînement en simulation. On peut également imaginer que des entreprises pourraient se spécialiser dans la prestation de services de gestion de telles plateformes ou l'accompagnement, et factoriser sur un certain savoir-faire à ce propos.

La démarche proposée présuppose que le système puisse disposer d'un certain nombre d'informations sur l'état du réseau et des besoins du service. Dans le cas de services multimédias (p.ex. SIP), les besoins se déduisent assez directement des codecs utilisés, une information qui est par ailleurs disponible pour les équipements réseau. Dans le cas général, il faudrait que la couche applicative veuille bien annoncer ses besoins aux composants réseau qui participent au routage. Cela est rarement le cas. Pour des raisons éthiques, il n'est pas souhaitable qu'une telle information soit diffusée trop largement, mais réservée aux seuls éléments du réseau impliqués dans l'opération de routage et avec authentification (p.ex. notre proxy SOCKS5). Le fait est qu'aujourd'hui, mis à part les protocoles de proxy, de tels protocoles de signalisation génériques permettant à une application communicante d'indiquer ses besoins n'existent pas vraiment. Par essence, cela contreviendrait aux grands principes de séparation des rôles entre les couches applicatives et couches réseau observés dans le modèle OSI. Ainsi, cela ne peut être un mode de fonctionnement imposé par l'architecture réseau, mais au contraire une demande de service exprimée par l'application auprès de l'infrastructure réseau. Cela restera donc optionnel, et à défaut il faut soit surdimensionner le réseau, soit laisser l'application se contenter de ce que le réseau peut lui offrir. On observe d'ailleurs que les produits actuels de visioconférence qui allient audio, vidéo, partage d'écran, sont d'une part assez fermés et non interopérables, peu explicites sur leurs besoins réseau bien qu'utilisant nécessairement des codecs, mais qu'ils semblent s'accommoder globalement bien de la qualité et du dimensionnement des réseaux actuels. Lorsque l'on parle d'applications non multimédias, on pense généralement aux applications web, pour lesquelles il est difficile d'estimer et de prévoir les besoins réseau. Dans ce cas-là, on peut imaginer se définir de grandes catégories de profils d'applications, possiblement à partir d'études statistiques.

Autre point, dans cette démarche autant il est relativement aisé d'aiguiller les flux sortants par le lien choisi, autant la gestion des flux entrants soulève certaines difficultés techniques. Typiquement, on subit les paquets arrivant par tel lien d'accès plutôt que tel autre. La décision de routage a été prise à l'extérieur du réseau de l'entreprise, possiblement par les opérateurs ou fournisseurs d'accès, voire en amont (au moyen d'annonces BGP que l'on a diffusées et qui se propagent entre Autonomous Systems). Dans certains cas, le protocole applicatif qui supporte le service (SIP dans notre cas) offre des mécanismes de réaiguillage. Certains protocoles de transport supportant la mobilité (p.ex. MPTCP ou SCTP) peuvent également permettre ce réaiguillage. Malheureusement ils ne sont pas encore très employés. Il conviendrait alors de préconiser aux développeurs de service futurs d'offrir ce type de fonctionnalité.

On peut constater aujourd’hui une situation où les applications communicantes espèrent certes une connectivité quasi permanente, mais ont des besoins en bande passante et délais globalement bien couverts par les liaisons Internet, grâce à des technologies réseau qui ont rapidement progressé ces dernières années (généralisation de la fibre) et qui sont suffisamment sur dimensionnées, pour le moment. Mis à part quelques incidents occasionnels, l’utilisateur peut obtenir de ses applications une qualité d’expérience satisfaisante, même pour des services gourmands en ressources réseau comme les communications multimédias (problématiques de bande passante et de temps réel). Bref, à l’instant t, tout se passe globalement bien sans trop avoir à se préoccuper de gérer les flux autrement que pour s’assurer de leur réception. Pour autant, on voit apparaître de nouveaux services qui risquent d’être particulièrement consommateur de ressources réseau. Un exemple est l’émergence de la réalité virtuelle immersive en haute qualité et multi-utilisateur, qui requiert naturellement plus de bande passante et des délais de réactivité toujours plus courts. En attendant que les technologies de liaisons fassent à nouveau un bond, il faudra se pencher sur ces stratégies de gestion des flux multicritères.

2.2 Diffusion distribuée de contenus

La seconde étude rapportée dans ce chapitre concerne les services de diffusion de contenus multimédia. Le chapitre précédent a présenté un dispositif destiné au renforcement du lien social des personnes isolées et dans lequel on pouvait trouver deux types de contenus multimédias : d’une part ceux destinés au cercle relationnel privé, et ceux destinés à un large public et à vocation de loisir et de divertissement. Les premiers sont ceux qui vont pouvoir agir directement sur le sentiment d’isolement, mais qui sont inmanquablement en quantité limitée puisque générés par quelques membres du cercle relationnel de l’usager, et destinés à un public ciblé et restreint. En revanche, le second type de contenus multimédias, produits de manière plus large et par des fournisseurs de contenus, est important pour entretenir l’intérêt de l’usager pour le dispositif de renforcement du lien social et éviter que la personne ne s’en détourne. Ces services passant par la télé de l’usager, nous nous sommes alors penché sur les problématiques de la télévision par IP, une autre forme de convergence. Il est courant de distinguer quatre types de services. La télévision en direct (Internet Protocol Television, IPTV), comme pour ses analogues hertzien câble ou satellite, propose un contenu qui peut être consommé d’une manière continue (streaming), par opposition à un contenu téléchargeable qui a un début et une fin. La télévision de rattrapage (replay, ou catch-up TV), proposée par la plupart des chaînes de télévision en direct, permet à un téléspectateur de re-visionner un programme après son créneau de diffusion, parfois avec une qualité moindre. La vidéo à la demande (VOD) offre au téléspectateur la possibilité de regarder un programme (film, épisode d’une série, etc., donc non lié à la programmation en direct), sur la base d’un catalogue ; catalogue proposé par les chaînes de télévision en direct, mais aussi d’autres acteurs, et possiblement avec une haute qualité (on pense aujourd’hui aux fournisseurs tels que Amazon Prime Video, Disney Plus, Hulu, Molotov, Netflix, Rakuten TV, etc.). Enfin la vidéo personnelle (User Generated Content, UGC) permet aux usagers de produire leurs propres contenus et les partager soit de manière privée, soit de manière publique (on pense aux plates-formes Dailymotion, TikTok, Vimeo, YouTube, Youku Tudou, etc.). En fait, si le service à l’utilisateur diffère, les technologies sous-jacentes sont généralement similaires. On peut toutefois faire une distinction entre le cas où le service est opéré par le fournisseur d’accès Internet du téléspectateur qui a la maîtrise du réseau proche de l’utilisateur (il peut alors mettre en œuvre des fonctions de gestion de la qualité de service de bout en bout, la possibilité d’utiliser du multicast, etc.), et le cas où le service est opéré par un fournisseur tiers qui distribue le contenu au client indépendamment de son fournisseur d’accès et de l’infrastructure réseau, et donc dans un contexte “best effort” du réseau disponible (on parle alors de service Over The Top, OTT). Techniquement, les opérateurs Internet peuvent être reliés entre eux di-

rectement par des points d'interconnexion (*peering*), ou par le biais d'opérateurs intermédiaires (*transit*), avec éventuellement des préoccupations de facturation réciproques. Les fournisseurs d'accès Internet et distributeurs de contenus jouent des rôles complémentaires : les uns ont un accès direct aux clients qu'ils raccordent, mais ne maîtrisent ni le volume ni la provenance des contenus Internet consommés ; les autres contrôlent ces contenus, mais n'ont pas d'accès direct aux clients. Des équilibres techniques, mais aussi commerciaux doivent être trouvés.

2.2.1 Plate-forme de distribution décentralisée de contenus

Dans le cadre du projet Vipeer (cf. 5.2.2) nous avons choisi de considérer le cas de service de VOD, avec nos partenaires industriels et académiques. Nous considérons que le fournisseur de service s'appuie sur une solution de type Content Delivery Network (CDN), c'est-à-dire un réseau de distribution de contenus. Un CDN est un service basé sur un ensemble de data-centers répartis dans Internet et disposant d'une bonne connectivité réseau, avec l'idée que les contenus sont répliqués sur ces différents data-centers, et qu'une instance des contenus sera disponible à proximité réseau du client lorsqu'il en fera la demande. Autrement dit, c'est un service de cache, distribué, et avec possiblement du préchargement lorsque les demandes clients sont prédictibles (notamment pour la consommation de contenus multimédias). Ce service est opéré par des acteurs qui en fait exploitent leur propre infrastructure de data-centers (citons Akamai, Amazon, Azure CDN CloudFront, Cloudflare, Google Cloud CDN, OVHcloud, etc.). Cependant, les opérateurs télécom et Internet, qui disposent d'une proximité réseau privilégiée avec les usagers grâce à leur réseau de collecte, développent de manière généralisée des offres de data-centers, avec services ajoutés de toutes sortes, et notamment des services CDN (on parle alors de Telco CDN). Notre étude s'intéresse à une approche hybride, où le fournisseur de contenus et le fournisseur d'accès collaborent. Des contenus, a priori les plus populaires, sont placés au plus près des utilisateurs, typiquement dans des data-centers proposés par les fournisseurs d'accès Internet (comme ceux du partenaire Orange), mais possiblement aussi sur les box des utilisateurs (comme celles développées par le partenaire NDS). Au besoin, les opérations de transcodage (comme proposées par le partenaire Envivio) peuvent être effectuées en amont et laissées à la main du distributeur de contenus pour des raisons de gestion des droits sur la propriété intellectuelle des contenus. Ces différents points de distribution, plus nombreux que dans le cas de CDN classiques, nécessitent une coordination fine basée sur une métrologie précise de l'occupation des liens réseau et sur une estimation des demandes futures des utilisateurs. Il s'agit de pouvoir prendre des décisions de placement anticipées des contenus, et également d'orchestrer les redirections vers le bon nœud lorsqu'une demande arrive. Nous employons le terme de dCDN (distributed CDN) pour décrire cette approche.

Architecture de la plate-forme dCDN

La figure 2.2 illustre l'architecture de la plate-forme proposée. Le CDN délègue la distribution de contenus au dCDN géré par le fournisseur d'accès Internet du client, de la même manière qu'un CDN peut être amené à déléguer des contenus à un autre CDN (cf. scénarios de collaboration entre CDN étudiés à l'IETF [250]). Ainsi, lorsque le client choisit un contenu dans le catalogue de VOD du fournisseur de contenus, il se voit redirigé, non pas vers un data-center du CDN, mais vers le dCDN de son fournisseur d'accès, et plus précisément vers le composant que nous avons appelé dTracker. Le dTracker gère le placement des contenus sur les différents dNodes (nœuds du dCDN qui assurent la fonction de stockage). Il est donc en capacité d'indiquer au client quel dNode dispose du contenu souhaité, et surtout lequel est a priori le meilleur pour lui en termes de proximité et performance réseau. Si le contenu en question n'est pas déjà présent dans le dCDN, le dTracker peut choisir un dNode et lui commander de télécharger ce contenu auprès du CDN, en même temps qu'il le retransmet au client. À l'inverse, lorsque le

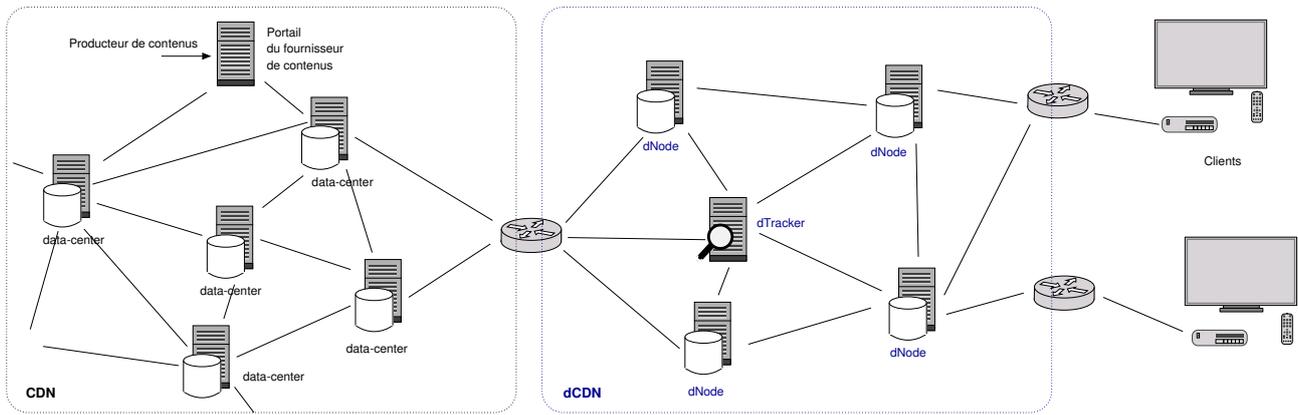


FIGURE 2.2 – Architecture logique de la plate-forme de distribution décentralisée de contenus

CDN veut pousser un contenu dans le dCDN par anticipation, comme il le ferait vers un CDN partenaire, il confie ce contenu au dTracker qui choisit un dNode pour l'héberger ; le CDN joignant des métadonnées comme typiquement le niveau de popularité du contenu. Pour prendre ses décisions, le dTracker a besoin d'un certain nombre d'informations. Il y a en premier lieu des informations (globalement) statiques liées à la topologie de l'infrastructure dCDN, le nombre de dNodes, leur localisation, la capacité des liens de raccordement. Dans notre étude nous avons considéré que ces informations étaient préconfigurées, mais on pourrait imaginer des protocoles permettant aux dNodes de se signaler. En second lieu il y a des informations dynamiques liées à l'état du réseau (techniques de métrologie réseau proposées par le partenaire Orange autour du protocole IPFIX, IP Flow Information Export [252]), à la popularité des contenus, leur âge dans les caches qui éventuellement peuvent décider d'en retirer certains. Ces informations-là sont mesurées typiquement par les dNodes et remontées au dTracker. Les terminaux des utilisateurs (set-top-box télé), qui jouent aussi potentiellement le rôle de dNode, mesurent également certains paramètres relatifs à la qualité des flux vidéo reçus et influant la qualité d'expérience utilisateur (techniques proposées par le partenaire IRISA appelées PSQA, Pseudo-Subjective Quality Assessment [91]).

Stratégies de placement des contenus

Plusieurs stratégies de placement de contenus peuvent être considérées. Il s'agit de trouver l'équilibre entre les coûts liés au stockage, ceux liés à la consommation de bande passante sur les liens réseau, et la satisfaction du client. La stratégie de cache consiste à garder une copie locale dans le dNode des contenus qui viennent à transiter par lui, c'est-à-dire lorsque le client lui demande (sur indication du dTracker), et que le dNode va rechercher (s'il ne l'a pas déjà) auprès d'un autre dNode situé plus haut dans le réseau ou auprès du CDN d'origine. Les choix à faire sont pour le dNode de déterminer combien de temps il peut garder cette copie en mémoire, et pour le dTracker de déterminer quel dNode doit être indiqué au client. La durée de vie dans le cache dépend d'une part de la popularité du contenu (fréquence des requêtes et âge de la dernière requête client), et d'autre part de la place disponible (une borne fixe liée à la capacité maximale du data-center qui héberge le dNode, et une borne souple liée à la taille négociée plus ou moins dynamiquement entre ce service du dNode et les autres services éventuellement hébergés sur le même data-center). Pour sa part, le dTracker doit choisir vers quel dNode orienter la requête du client. Le choix s'opère typiquement en considérant la proximité réseau entre le client et le dNode, et la capacité réseau disponible sur les liens à l'instant présent, bref en cherchant à minimiser le coût du transfert. La stratégie de cache est une stratégie réactive et passive, en espérant que la donnée gardée en mémoire soit utile pour une prochaine fois. Les partenaires du projet (Orange) ont montré l'intérêt de telles stratégies

de cache pour le dCDN [143]. En complément, la stratégie de préchargement essaie à l'inverse d'anticiper les demandes pour charger du contenu dans les caches de manière proactive, avant que les demandes ne surviennent : les nouveautés peuvent supposément susciter un certain engouement, et les clients ayant un certain profil de goûts et préférences peuvent rechercher des contenus dans cette catégorie (stratégie de recommandations). Ce problème de placement optimal est de type k-PCFLP (k-Product Capacitated Facility Location Problem) qui est NP-complet [85]. Les collègues de Télécom-Bretagne se sont attachés à reformuler ce problème sous la forme d'algorithme génétique et à proposer une résolution basée sur MapReduce et son implémentation Hadoop [198], une technique permettant d'orchestrer des calculs parallèles sur des grappes d'ordinateurs. Il s'agit moins de proposer une solution implantable sur les dTrackers, qu'une solution calculable permettant de conduire des simulations et mesures. Ces études montrent qu'une redirection optimale couplée avec un placement optimal permettrait de réduire le coût opérationnel significativement (environ de 70% suivant les paramètres choisis [140]).

Prototypage et validation de la plate-forme dCDN

Pour notre part, la contribution a porté sur l'architecture fonctionnelle et les moyens pratiques d'opérer la coordination des différents nœuds et les redirections pour que le client trouve son contenu. Le projet fait l'hypothèse que les contenus multimédias sont diffusés grâce à la technologie MPEG-DASH (Dynamic, Adaptive Streaming over HTTP), finalisée en 2011 et maintenant standardisée [176]. MPEG-DASH vise à standardiser des approches propriétaires qui ont été développées pour la diffusion de vidéo afin de permettre au client de s'adapter dynamiquement au débit du réseau (par exemple HLS - Apple HTTP Live Streaming, MSS - Microsoft Smooth Streaming, ADS - Adobe HTTP Dynamic Streaming). Une vidéo est proposée en plusieurs niveaux de qualité (résolution, nombre d'images par seconde, et surtout débit), et découpée en fragments avec une période fixe de quelques minutes, et interchangeable au même slot temporel d'un niveau de qualité à l'autre. Ainsi, un client, qui peine à obtenir les fragments vidéo au rythme de leur visualisation, peut s'adapter et choisir de basculer d'un niveau de qualité à l'autre (pour faire face à des congestions réseau par exemple), sans affecter le confort de visualisation. La norme n'impose pas de codec particulier, mais requiert le format de conteneur MPEG-2 Transport Stream (ISO/IEC 13818-1) car il permet au récepteur de concaténer les fragments vidéo. Les fragments vidéo sont téléchargés via HTTP. Un contenu vidéo est décrit par un fichier XML appelé *manifeste* (les solutions telles que HLS employaient le format m3u8, moins souple) : les différents formats proposés y sont listés, avec leurs caractéristiques techniques, et pour chacun sont indiquées les URL pointant sur les différents fragments (les URL peuvent être listées explicitement comme dans les manifestes m3u8, ou décrites de manière compacte au moyen de variables internes prédéfinies dans le XML).

Dans ce modèle de fonctionnement, le client peut à tout moment choisir de basculer d'un niveau de qualité à l'autre. Mais c'est le fournisseur de contenu qui, au moyen des URL écrites dans le manifeste, choisit et indique au client où trouver ces contenus. Pour orienter équilibrer la charge entre leurs data-centers et limiter la consommation des ressources réseau, les fournisseurs de contenus ont souvent opté pour une approche qui joue avec les réponses DNS. Lorsque le client sélectionne un contenu dans le catalogue du fournisseur, celui-ci lui retourne une URL pointant sur le contenu à télécharger. Mais le client procède d'abord à une requête DNS pour obtenir la résolution du nom en IP de l'hôte inclus dans cette URL. Suivant la localisation du client (inférée par l'adresse IP de sa requête DNS), le serveur DNS (du fournisseur de contenu), forge une réponse pointant sur le data-center le plus proche du client et disposant d'une instance du contenu recherché. Lorsque les contenus en question sont d'une nature assez stable (typiquement des fichiers), et si la réplication entre les data-centers est rigoureuse, c'est une

approche qui peut donner des résultats globalement satisfaisants. Dans le cas de la distribution de vidéo, sous forme de fragments, et en plusieurs niveaux de qualité, la technique de redirection au moyen du DNS impose un changement significatif dans le comportement de ce protocole : la réponse DNS contient une indication de durée de validité qui est alors configurée à une valeur extrêmement courte, de l'ordre de la minute alors que le principe du DNS s'accorde mieux avec des durées de vie des réponses qui sont de l'ordre de la journée et rarement moins d'une heure. Cette pratique tend à surcharger les caches des DNS intermédiaires et le trafic DNS global. De plus, elle se révèle d'une efficacité limitée puisqu'une partie significative des clients se trouve subir la même redirection dans ce laps de temps, sans réelle maîtrise des localisations relatives des clients et des data-centers, et sans pouvoir gérer finement le fait que tels fragments de tel niveau de qualité de tel contenu soient disponibles sur tel nœud plutôt que tel autre. D'autres approches de redirection peuvent être envisagées [97], comme le recours à l'adressage IP anycast, mais il semble qu'elle soit peu employée parmi les grands fournisseurs de CDN.

La capacité technique à gérer efficacement la redirection des clients vers la bonne source est un véritable enjeu pour le fournisseur de contenus. Considérant qu'il s'agit d'une problématique de la couche applicative, nous choisissons d'orienter notre proposition en exploitant les capacités de HTTP. En effet, puisque le manifeste et les fragments vidéo sont distribués par HTTP nous disposons de deux leviers d'action. Le premier est au niveau de la fourniture au client des URL, que le serveur peut choisir d'écrire en pointant vers tel ou tel hôte. D'abord, lorsque le client sélectionne un contenu dans le catalogue du fournisseur, celui-ci lui retourne l'URL d'un manifeste, qui peut être hébergé soit dans un data-center du CDN, soit dans notre cas sur un dTracker. Ensuite, dans le manifeste envoyé par le dTracker, les URL pour trouver les fragments vidéo peuvent pointer sur tel ou tel dNode. Et le second levier est offert par les codes de redirection HTTP, permettant à un serveur web d'indiquer à un client web que le contenu attendu à URL demandée se trouve en fait à une autre URL (pour notre prototype nous avons utilisé le code 307 Temporary Redirect). Ainsi, si le dTracker ou un dNode constate qu'il est trop chargé pour fournir la ressource demandée par le client sur les indications décidées en amont, il lui est alors possible de rediriger le client vers un meilleur nœud.

Pour l'implémentation du prototype, le lecteur multimédia VLC (VideoLAN Client) est utilisé, du fait de son support de DASH depuis 2011. Les dTrackers et dNodes sont des applications web développées sur la base de Java servlets, et utilisent une base de données MySQL. Le portail du fournisseur est une page web statique classique. Pour simplifier les problématiques de métrologie réseau dans le cadre de notre prototype, l'état des liens entre le client et les différents dNodes est basé par des mesures du temps d'aller-retour (*ping*, ou ICMP Echo). Cela a vocation à être remplacé par les outils métiers de l'opérateur réseau, tel que le protocole IPFIX mentionné précédemment et utilisé par les sondes réseau de l'opérateur. Le démonstrateur final du projet a mis en jeu plusieurs serveurs dNode localisés à Brest (Télécom Bretagne), Lannion (Orange), Rennes (Inria), le dTrackeur localisé également à Brest ; la bande passante de ces différents serveurs pouvant être limitée afin de simuler des situations de congestion et jouer différents scénarios où les clients basculent de niveau de qualité ou basculent de serveurs dNodes. Ce prototypage a permis de démontrer la pertinence de la solution, l'architecture fonctionnelle, et le gain sur la qualité du service et la consommation des ressources réseau.

2.2.2 Bilan des études sur la diffusion distribuée de contenus

S'appuyer sur l'infrastructure Internet pour distribuer des contenus vidéo de type télévisuels offre plusieurs avantages pour le téléspectateur, une grande diversité de l'offre, pas de contrainte des horaires de diffusion ou de rediffusion, etc. Pour le fournisseur de contenus, cela permet d'atteindre un plus grand nombre de clients, avec une facturation directe, et éventuellement des services ajoutés comme des recommandations en fonction des préférences et habitudes

des usagers. Cependant, ces contenus multimédias sont par nature volumineux, consommant du stockage et de la bande passante. Même si l'infrastructure Internet est générique et globalement indépendante de la nature des services déployés, des stratégies de gestion particulières sont requises ici. Cela prend la forme de Content Delivery Networks, où les contenus sont répliqués en plusieurs points auprès des utilisateurs, autrement dit il s'agit d'un mécanisme de caches distribués. Les études ont porté sur une proposition d'architecture, appelées dCDC (distributed CDN), où l'opérateur de CDN traditionnel collabore avec l'opérateur d'accès Internet des clients et lui délègue des contenus à gérer dans ses propres caches, de manière à optimiser la consommation de bande passante globale. Ces études incluent des travaux sur la métrologie réseau et l'ingénierie de trafic, des méthodes de calculs distribués pour cette optimisation, ainsi que des premières analyses sur la chaîne de valeur et de relations contractuelles entre les différents acteurs. Nos contributions ont porté plus spécifiquement sur les architectures de services et de systèmes distribués, et sur les différents mécanismes de redirection à mettre en œuvre entre l'utilisateur et le contenu.

Ce sujet illustre l'intérêt à mettre en œuvre un certain degré de collaboration entre la couche des services applicatifs et la couche de l'infrastructure réseau. Si le réseau fournit quelques informations sur son état et son fonctionnement, le service peut faire des choix de connexion judicieux qui pourront alléger la charge réseau et aussi mieux satisfaire le client. On peut noter les travaux du groupe ALTO de l'IETF (Application-Layer Traffic Optimization [246, 260]) qui visent à définir des moyens pour qu'une application cliente puisse obtenir des informations sur l'état du réseau de l'opérateur, avec des cas d'usage inspirés des CDN ou du pair-à-pair. Il s'agit pour l'heure de définir des moyens d'échanger des informations, pour le client d'exprimer ses besoins et contraintes, et pour le serveur ALTO de l'opérateur de retourner un certain niveau de précision sur l'infrastructure réseau et son état de charge. Il faut alors trouver un juste milieu entre des informations trop générales et peu pertinentes, et des informations trop détaillées qui peuvent se révéler non seulement trop lourdes à collecter ou à calculer, mais possiblement aussi trop intrusives (soit du côté des usagers à propos de leur vie privée, soit du côté de l'opérateur sur des éléments de stratégie d'entreprise). Par ricochet, peuvent se poser des questions de confiance, où l'un des participants peut préférer mentir pour le bénéfice de ses propres objectifs, et espérer orienter ou obtenir une réaction précise de l'autre participant. Il s'agit donc de trouver des modes d'interaction où la collaboration est souhaitable pour chacun. Il semblerait qu'ALTO soit aujourd'hui très peu déployé. Dans notre étude, le mécanisme de dCDN propose que le prestataire de service CDN collabore avec l'opérateur Internet, non pas par échange d'informations techniques, mais par délégation d'une partie du service, et donc d'une partie de la valeur. Il semble aujourd'hui que cette dichotomie reste encore assez étanche entre les opérateurs CDN traditionnels (over-the-top, par-dessus l'infrastructure Internet existante), et les CDN mis en place par les fournisseurs d'accès Internet et opérateur réseau. Ainsi, même si certains fournisseurs d'accès Internet proposent dans leur offre triple-play (données, téléphonie, télévision) des extensions d'abonnement pour des services télé tiers (type Netflix), il apparaît que l'intégration ne se fait qu'au niveau du terminal de la box télé (qui embarque alors l'application cliente tierce), sans pour autant procéder à une intégration au niveau de l'infrastructure réseau pour la distribution des contenus. Le surdimensionnement actuel des capacités des réseaux Internet permet vraisemblablement aux différents acteurs de déployer à minima ces moyens de collaboration, chacun défendant son périmètre, même si cela occasionne des surconsommations de bande passante. Cependant, même si ces stratégies ne sont plus pilotées par des impératifs d'optimisation technique, des enjeux de sobriété numérique pourraient rebattre les cartes. Ces études et travaux scientifiques peuvent répondre à ces enjeux.

2.3 Joignabilité en mobilité réseau et accès multiples

La troisième étude rapportée dans ce chapitre concerne les problématiques de joignabilité réseau, et notamment en situation de mobilité et accès multiples. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du projet TMS (cf. 5.2.3), et plus précisément la thèse de Pratibha MITHARWAL (cf. 6.3), qui avait déjà œuvré pour le développement du démonstrateur Vipeer. Le projet TMS s'intéresse à la connectivité haut débit pour des bateaux en zone côtière et portuaire. Les problématiques abordées par les différents partenaires industriels et académiques du projet couvrent des questions matérielles (stabilisation des antennes, propagation radio et réflexion multiples à la surface de l'eau, durcissement des équipements au milieu marin, etc.), et la question des accès réseau multiples en mobilité. Nos contributions ont porté sur ce second volet.

2.3.1 Critères et objectifs pour la mobilité

Ainsi, nous faisons l'hypothèse qu'un bateau embarque une infrastructure réseau informatique à bord, qu'il peut être en situation de mobilité (ou bien à quai), et qu'il dispose d'un ou de plusieurs équipements lui permettant de se connecter à des antennes réseau à terre, possiblement avec des technologies différentes (WiMax, LTE, 4G, WiFi), et possiblement avec des fournisseurs d'accès différents.

Ce scénario de mobilité se généralise naturellement à tout type de véhicule. Mais il peut également se généraliser à d'autres situations. Un réseau d'entreprise peut bénéficier d'accès multiples ou redondé, comme cela a été évoqué dans la première étude de ce chapitre ; et si la question de la mobilité se pose différemment et à une autre échelle de temps que pour un véhicule, elle peut être présente (p.ex. migration d'un fournisseur d'accès à un autre). Le domicile est dans une configuration semblable, c'est-à-dire avec des problématiques de migration de ses accès Internet, ou simplement de reconnexion avec des paramètres IP différents. Le collaborateur en déplacement professionnel hors de son entreprise, ou en télétravail, peut avoir recours à un outil de type VPN (virtual private network) pour accéder aux services réseau de l'entreprise comme s'il y était raccordé physiquement, et ainsi gérer l'itinérance. L'individu, qui promène ses smartphones, tablettes et autres appareils, est en situation de mobilité, souvent avec accès multiples (WiFi, cellulaire, etc.) ; notons à ce propos que dans l'état actuel des produits du marché, les équipements personnels d'aujourd'hui se constituent rarement en une véritable infrastructure réseau informatique IP entre eux autour de l'utilisateur (il y a là une marge d'évolution possible). Ces considérations illustrent, de manière non exhaustive, différents cas de figure où la mobilité et les situations d'accès multiples peuvent se présenter.

Aussi, nous formulons un certain nombre d'exigences ; ces exigences s'appuient ici sur le contexte du projet TMS, mais sont de fait transposable à nombre de situations de mobilité.

- En premier lieu, nous considérons la question de la mobilité du point de vue Internet, c'est-à-dire pour concrètement acheminer des paquets IP jusqu'à un destinataire mobile en s'appuyant sur des technologies Internet. Certes, il existe des technologies de liaison sans fil (WiFi, cellulaire, etc.) qui peuvent gérer de la mobilité en leur sein (p.ex. tant que l'on reste sur le même WiFi, ou bien sur le même réseau 4G), mais le besoin que nous exprimons est justement de gérer les situations où la mobilité se fait d'un réseau à l'autre. Autrement dit, nous considérons la mobilité au niveau de la *couche réseau* plutôt que de la *couche liaison*.
- En second lieu, nous considérons que la gestion de la mobilité doit assurer une *continuité des sessions*, c'est-à-dire qu'un service ou une application en cours ne doit pas être interrompu par des déconnexions/reconnexions lors de la mobilité d'un point de raccordement Internet à un autre. En cela, l'exigence est plus élevée que pour un ser-

vice d'itinérance (p.ex. le VPN d'entreprise), ou une problématique de migration de configuration Internet (p.ex. changement d'un opérateur Internet de l'entreprise ou du domicile), situations pour lesquelles les sessions sont a priori plus courtes que les phases de mobilité.

- En troisième lieu, nous considérons des scénarios de *mobilité d'un réseau* et non pas un hôte seul ; c'est-à-dire un ensemble d'hôtes (en incluant au moins un routeur) qui sont interconnectés entre eux de manière stable, et qui se déplacent tous ensemble d'un point de raccordement Internet à un autre.
- En quatrième lieu, nous supposons que ce réseau mobile peut bénéficier d'*accès Internet multiples*. C'est-à-dire que plusieurs interfaces réseau peuvent être actives simultanément (des interfaces reposant sur technologies d'accès différents, ou auprès de plusieurs opérateurs), et que ces interfaces sont utilisables simultanément par les applications et services.
- Enfin, en cinquième lieu, nous considérons que dans un contexte d'accès multiples, les hôtes mobiles doivent se voir offrir des moyens de participer au choix des interfaces d'accès utilisées, et que ce choix doit pouvoir s'opérer flux par flux (ce n'est pas une bascule totale d'une interface à l'autre, comme c'est le cas aujourd'hui avec un smartphone où l'utilisateur doit choisir entre le réseau cellulaire ou bien le WiFi), et donc que des flux différents doivent pouvoir emprunter des interfaces d'accès différentes simultanément.

Joignabilité d'une adresse ou bien d'un hôte

La joignabilité réseau des applications et terminaux utilisateur est un problème épineux en soi au vu du déploiement d'Internet d'aujourd'hui. On pense en particulier au recours à la technique du NAT (Network Address Translation) pour pallier la raréfaction des adresses IPv4 en mutualisant les clients derrière une seule adresse publique (qui, de fait, ne sont pas joignables directement), problème à relier à la timide migration vers IPv6.

De plus, pour faciliter la gestion de la sécurité réseau, des fonctions de pare-feu sont couramment déployées. Constatant que nombre d'équipements, systèmes d'exploitation et applications s'avèrent fragiles face à des sollicitations réseau non conformes aux attentes, il est devenu courant de déployer en amont des solutions logicielles ou matérielles pour filtrer ces sollicitations réseau.

Il s'agit plus généralement du problème des *middleboxes* [226], ces équipements intermédiaires placés sur les chemins dans les réseaux, dans le but de répondre à des objectifs de sécurité et de contrôle par certains acteurs, aux fonctionnalités mal définies (et parfois mal implémentées), et qui peuvent impacter le déploiement de services et applications communicantes, les amputer de certaines capacités (comme la joignabilité et le principe de communication de bout en bout à l'origine de l'architecture d'Internet), et qui contribuent à ce qui est appelé «l'ossification d'Internet» [161, 257], c'est-à-dire le constat qu'aujourd'hui il est difficile d'innover et de déployer de nouveaux services ou protocoles, comme si Internet était figé dans un sous-ensemble de fonctionnalités historiques sans possibilité d'évolution à moins de recourir à des astuces de contournement (comme ne faire que des communications sortantes, faire transiter tout service dans du web, utiliser des relais, etc.).

Deux facteurs peuvent complexifier la situation : le fait d'être raccordé par plusieurs accès réseau et non un seul, et le fait d'être en mobilité et donc de changer de point de raccordement au cours du temps. La difficulté tient au fait que, implicitement, la manière dont a été conçu le mode d'adressage dans Internet, une adresse IP joue simultanément deux rôles : c'est à la fois une indication technique de localisation dans le réseau vers où envoyer des paquets (problématique de routage), et à la fois l'identifiant du correspondant lors d'une communication. Parler d'accès multiples signifie qu'à un même identifiant de correspondant peuvent être associés

deux ou plusieurs points de localisation. Parler de mobilité signifie qu'un même correspondant voit son point de localisation changer au cours du temps, voir au cours d'une communication. En pratique, le lien entre la notion de localisation et la notion d'identifiant du correspondant se fait assez naturellement lors de communications "sortantes" : c'est tout bonnement le point depuis où sont émis les paquets par ce correspondant là (adresse IP source), et pendant la durée de la communication. Par contre, dans le cas de communications "entrantes", il faut que les correspondants qui cherchent à joindre un hôte (c'est-à-dire sur la base de la connaissance de son identifiant) puissent trouver son point de localisation dans le réseau (au moins l'un d'entre eux, s'il y en a plusieurs), celui qui est actif à l'instant donné (en cas de mobilité).

2.3.2 Revue des solutions pour la mobilité Internet

À la lumière de ces différentes considérations, nous avons proposé une étude comparée des différents protocoles disponibles [31].

Il s'agit en premier lieu d'identifier pour chacun son domaine d'utilisation, et son adéquation possible ou partielle avec les besoins que nous avons identifiés. Mais il s'agit aussi d'appréhender les mécanismes fin de leur mise en œuvre pour, éventuellement, proposer des combinaisons astucieuses permettant de combler des manques.

Approches de la couche réseau

Mobile IP – L'état de l'art des différentes solutions peut s'articuler autour du protocole Mobile IP (MIPv4 pour IPv4 [229], MIPv6 pour IPv6 [234]) qui en pose les bases. L'objectif est d'assurer la joignabilité et la continuité de sessions à un hôte mobile. L'hôte mobile (appelé *Mobile Node*) est rattaché administrativement à un point fixe qui met à sa disposition une adresse IP fixe appelée *Home Address* (jouant ainsi le rôle d'identifiant de l'hôte) ainsi qu'un *Home Agent* (un routeur qui annonce au reste d'Internet sa capacité à router cette Home Address). Lorsque l'hôte mobile se déplace d'un sous-réseau à un autre (on parle de *Visited Network*), il obtient alors de ce sous-réseau une adresse IP temporaire (appelée *Care-of Address*, qui joue le rôle d'identifiant de localisation). Il en informe son Home Agent (opération de *Binding*), qui tient à jour un annuaire associant sa Care-of Address sa Home Address. Aussi, lorsqu'un correspondant (*Corresponding Node*) veut joindre l'hôte mobile, il ne connaît de lui que sa Home Address ; les paquets sont alors routés dans Internet vers le Home Agent. Celui-ci encapsule alors ces paquets à destination de la Care-of Address (principe du "tunnel"), et sont donc réceptionnés par l'hôte mobile qui les décapsule, et y répond via ce même tunnel.

Notons que la solution MIPv6 offre une optimisation dans le cas où le correspondant supporte également la signalisation MIPv6 : l'hôte mobile peut lui annoncer sa Care-Of Address, et les échanges peuvent alors se poursuivre en établissant un tunnel direct entre le correspondant et l'hôte mobile, sans passer par le Home Agent.

Un des points en faveur de Mobile IP et de ses extensions est la question des changements à réaliser pour son déploiement. Les changements requis portent seulement sur l'hôte mobile, ainsi que sur le routeur du Home Network (le réseau d'origine des hôtes mobiles), c'est-à-dire sur des équipements qui sont a priori à la main de l'utilisateur qui a besoin de la mobilité. L'infrastructure d'Internet n'est pas modifiée, ni même les applications.

Extensions à Mobile IP – Le mécanisme de base Mobile IP s'est vu proposer diverses extensions (essentiellement pour la variante MIPv6) visant des améliorations particulières suivant les situations.

L'extension Proxy Mobile IP (PMIP [240]) se propose de rendre la gestion de la mobilité transparente pour l'hôte mobile en ajoutant dans le réseau visité un *Mobile Access Gateway*, un proxy.

L’extension Hierarchical Mobile IP (HMIP [242]) propose d’alléger et de réduire le nombre d’opérations de Binding auprès du Home Agent en cas de déplacements fréquents, en organisant les zones de mobilités en “régions” pourvues d’un point d’ancrage stable pour tous les déplacements au sein de cette région.

L’extension Fast Handover for Mobile IP (FMIP [244]) se propose d’améliorer la signalisation auprès du Home Agent et les opérations de suppression-reconstruction du tunnel à chaque déplacement, dans le cas où l’hôte mobile peut anticiper son arrivée dans un nouveau réseau alors qu’il n’a pas encore complètement quitté l’ancien.

L’extension Multiple Care-of Addresses Registration (MCoA [244]) permet à un hôte mobile de déclarer plusieurs Care-of Addresses auprès de son Home Agent, offrant ainsi un support pour la gestion des accès multiples. Le Home Agent peut alors établir plusieurs tunnels vers chacune des adresses de l’hôte mobile, et ainsi lui transmettre les paquets du correspondant par l’un ou l’autre de ces tunnels.

Enfin l’extension Flow Bindings in Mobile IP ([248]) offre le moyen à un hôte mobile bénéficiant d’accès multiples d’annoncer ses politiques et préférences à son Home Agent pour que celui-ci sache vers laquelle des Care-of Addresses réexpédier tel ou tel type de trafic. Cette extension permet donc à un hôte bénéficiant d’accès multiples de sélectionner les interfaces empruntées par ses différents flux. Cependant, cela se fait de manière statique (au rythme des messages de Binding au Home Agent), et de manière prédéfinie (avant que les flux ne soient là).

NEMO – Le protocole Network Mobility (NEMO) Basic Support ([235]) est également une extension de Mobile IPv6, et qui s’intéresse au scénario où c’est tout un réseau qui est en mobilité et non pas un seul hôte. Plutôt que de gérer la mobilité de chaque hôte individuellement, NEMO se propose de gérer cela de manière unifiée. Lors de sa mobilité, le routeur qui gère le réseau mobile (*Mobile Routeur*) obtient de la part du réseau visité non seulement une Care-of Address (comme un hôte mobile simple et ainsi rester rétrocompatible avec Mobile IPv6), mais il obtient surtout un préfixe IPv6 (un ensemble d’adresses, obtenu par exemple DHCPv6 Prefix Delegation), qu’il utilise pour configurer à son tour les hôtes au sein de son sous-réseau (typiquement par les méthodes de configuration automatiques habituelles dans un réseau IPv6, c’est-à-dire des messages d’annonce du routeur (ICMP Router Advertisement), ou bien DHCPv6). Chaque hôte au sein du réseau mobile dispose alors de deux adresses, l’une stable étant sa propre Home Address (basée sur le préfixe de son Home Network), et l’autre étant sa propre Care-of Address (basée sur le préfixe fourni par le réseau visité).

Ajoutons que, si le réseau mobile dispose d’accès multiples (c.-à-d. que le routeur mobile a la possibilité de joindre plusieurs points de raccordement Internet à la fois), les extensions MCoA (Multiple Care-of Addresses Registration) et Flow Bindings précédemment évoquées peuvent s’appliquer à NEMO.

LISP – Le protocole LISP (Locator/Id Separation Protocol [251]) ne vise pas spécifiquement la mobilité, mais plutôt les problématiques de migration de configuration IP, voire, d’accès multiples. Le protocole LISP propose une solution formalisant la séparation entre une adresse de “localisation” (utilisée pour le routage entre opérateurs dans le cœur de réseau Internet) et “l’identifiant” du correspondant (généralement des adresses dites *Provider-Independent* que l’utilisateur a obtenues directement et de manière stable auprès de son registre Internet régional (RIR, les organismes continentaux qui gèrent l’allocation des ressources Internet par délégation de l’IANA, RFC 7020), et non pas auprès de son opérateur Internet du moment). Il apparaît en fait que la séparation opérée par LISP est une séparation entre les adresses de bordure et les adresses du cœur d’Internet. Comme pour Mobile IP, il y a un mécanisme de tunnel, mais qui est réalisé par des routeurs de bordure des opérateurs.

Si le protocole LISP a été pensé pour des problématiques de multiaccès et migration IP, il pourrait convenir pour des besoins de mobilité réseau, c'est-à-dire avec un rythme de changements plus fréquent.

Concernant le support des accès multiples, LISP offre un fonctionnement transparent aux hôtes puisque cela est géré par le routeur LISP. La contrepartie est que les hôtes ne peuvent participer à la décision et ne disposent pas de moyen de choisir le lien qui leur convient pour tel ou tel flux de leur application. En comparaison avec les solutions autour de Mobile IP, le déploiement du protocole LISP passe par les opérateurs, et non pas par l'utilisateur en mobilité. En effet, il implique des changements dans les routeurs de bordure chez les opérateurs, du côté des hôtes mobiles comme du côté des correspondants, ainsi que l'ajout de Map Servers chez les opérateurs.

Approches de la couche transport

Certains protocoles de la couche de transport offrent la possibilité aux flux d'emprunter plusieurs chemins. L'idée générale est qu'un flux de messages n'est pas nécessairement associé qu'à une seule paire d'adresses IP source-destination, mais que si les hôtes impliqués bénéficient d'accès multiples (et donc de plusieurs adresses IP), le flux peut être échangé entre plusieurs paires d'adresses entre ces hôtes. Cela peut être pour des questions de débit (répartir le flux entre plusieurs liens simultanément), pour des questions de robustesse (si un lien tombe, on en connaît un second pour basculer dessus), ou encore pour de la mobilité (si un nouveau lien apparaît, on peut anticiper et migrer dessus avant que l'ancien ne soit plus utilisable).

SCTP – Stream Transmission Control Protocol (SCTP [268]) est un protocole de la couche transport qui vise à offrir un niveau de service intermédiaire entre TCP et UDP. Lors de l'établissement de la connexion, client et serveur peuvent s'annoncer réciproquement les différentes adresses IP dont ils disposent. L'application qui utilise SCTP doit alors choisir, parmi la liste des adresses de destination possible, laquelle sera utilisée pour les échanges. Ainsi se construit le chemin principal pour les échanges. Si ce chemin principal venait à être coupé, l'application peut en choisir un second.

L'extension M-SCTP (Mobile SCTP [92]) propose d'utiliser SCTP pour la mobilité. Cette extension introduit de nouveaux messages de signalisation permettant à un participant d'ajouter ou retirer dynamiquement des adresses IP dans la liste des associations possibles en cours de session et pas uniquement lors de la connexion.

MPTCP – Multi-Path Transmission Control Protocol (MPTCP [264]) introduit des extensions au traditionnel protocole TCP pour supporter le multiaccès. Le protocole TCP s'est déjà vu étendu par diverses options pour améliorer son fonctionnement. MPTCP en est une nouvelle. Puisqu'il s'agit d'une option, MPTCP est rétrocompatible avec TCP (une application MPTCP peut quand-même dialoguer avec une application TCP). Concrètement, les paquets MPTCP qui circulent sur le réseau sont similaires à des paquets TCP ordinaires, avec seulement quelques options en plus dans l'entête.

Formellement, une session MPTCP entre deux participants est définie par une paire de jetons (deux numéros, un pour chaque sens de la communication, unique pour l'émetteur), et est composée d'un ou plusieurs flux TCP. L'initialisation d'une session MPTCP débute par la poignée de main en trois coups TCP traditionnelle, mais où client et serveurs se choisissent et s'annoncent mutuellement une clef qui sera utilisée ensuite pour sécuriser certaines procédures (ajout d'un sous-flux à la session) et pour en dériver les jetons de session. Au cours de la communication, un participant peut annoncer à l'autre qu'il dispose (ou ne dispose plus) d'un nouveau chemin (c'est-à-dire une adresse IP et un numéro de port TCP). Un participant peut

alors initier un nouveau flux TCP en utilisant un chemin annoncé, qui sera alors lié à la session MPTCP. Ou encore, un flux ouvert spontanément en dehors de ces annonces préalables peut rejoindre une session MPTCP en cours.

Il apparaît que MPTCP reste globalement plus simple que SCTP, il accorde une attention particulière à la sécurité (risques de détournement des flux), et se montre plus robuste en considérant les contraintes imposées par les middleboxes.

La pile protocolaire MPTCP a vocation à être implémentée au sein du système d'exploitation de l'ordinateur, à côté de UDP et du TCP traditionnel (voir à sa place). Les applications peuvent exploiter directement les fonctionnalités MPTCP, ou l'utiliser comme un socket TCP traditionnel et laisser un service système (un *mptcp path manager*) gérer à leur place l'aiguillage des flux sur les accès multiples (avec des politiques préconfigurées). Les développements et le déploiement d'applications communicantes basées sur MPTCP en sont ainsi simplifiés.

QUIC – QUIC est un protocole de la couche transport récemment standardisé [266]. Il a été initialement développé dans le contexte du web, mais a une portée plus large. Il a pour vocation à remplacer le couple TCP+TLS. Il propose mode connecté filable ordonnancé comme TCP, et un chiffrement s'appuyant sur TLS mais avec le souci de laisser transparaître encore moins d'informations en clair. Il permet aussi de multiplexer plusieurs flux au sein d'une même connexion. De plus, QUIC propose des techniques possiblement plus efficaces que TCP pour le contrôle de congestion, et une latence plus faible. Puisque c'est un protocole nouveau, se pose la question des middleboxes : aussi les messages QUIC sont encapsulés dans des paquets UDP pour espérer ne pas être filtrés inutilement.

L'établissement d'une connexion QUIC, en plus de l'échange d'éléments cryptographiques pour sécuriser le canal et vérifier l'authenticité des participants, requiert une phase de validation rigoureuse du chemin entre les participants, et la création d'un jeu d'identifiants. Pour assurer la continuité de session en cas de mobilité, et donc de changement d'adresse IP ou de numéro de port UDP sous-jacent (changement choisi par l'un des participants, ou bien subit par l'action de ces middleboxes), QUIC propose un mécanisme de "migration" : le nouveau chemin est testé (avec la même rigueur qu'à l'établissement de connexion initiale), mais en présentant l'un ou plusieurs des identifiants créés à l'initialisation de la connexion, et permettant ainsi aux participants d'associer ce nouveau chemin à la connexion existante.

QUIC est un protocole encore émergent. Cependant, il est poussé par des grands acteurs du Web (Google en tête), et il est probable que son déploiement vienne à se généraliser rapidement. Pour l'instant, il n'est disponible que sous forme de bibliothèques applicatives et n'est pas encore intégré nativement aux systèmes d'exploitation parmi les piles protocolaires réseau. Son fonctionnement et son utilisation sont complexes, mais il est courant aujourd'hui que le développement d'application s'appuie sur les technologies web, qui de plus en plus intégreront ce protocole.

Approches sur des couches intermédiaires

Pour gérer la séparation entre la notion de localisation dans le réseau et la notion d'identifiant du correspondant, certaines approches proposent de glisser une couche intermédiaire entre la couche réseau et la couche transport. L'idée générale est de conserver la couche réseau à l'identique, avec ses protocoles et adresses IP, mais que les couches de transport (TCP, UDP, etc.) s'appuient sur une nouvelle couche intermédiaire qui introduirait une nouvelle famille d'adressage pour identifier les correspondants. Cela implique de modifier les piles protocolaires chez les correspondants (et donc possiblement impacter les applications), mais peut espérer préserver l'infrastructure réseau d'Internet (à l'exception probable de ces middleboxes évoqués précédemment). De plus, il faut prévoir des mécanismes de découverte pour que chaque corres-

pendant puisse faire le lien entre cette nouvelle famille d'identifiants et les adresses IP que l'on continue à utiliser pour router les paquets jusqu'à la localisation du destinataire.

HIP – Host Identity Protocol (HIP [255]) est l'une de ses approches. Une nouvelle famille d'adressage est introduite pour identifier les hôtes (*Host Identity*). Le protocole HIP vise à gérer la mobilité et le multiaccès dans un cadre sécurisé. Il se base sur les principes de la cryptographie asymétrique. L'identifiant de l'hôte est en fait une clef publique. HIP utilise un condensat cryptographique sur 128 bits (*Host Identity Tag*), c'est-à-dire la taille d'une adresse IPv6. Cette astuce permet aux couches protocolaires supérieures et applications de ne pas être trop impactées techniquement par ces nouveaux identifiants introduits par HIP.

Dans le cas d'usage où les participants à HIP ne sont pas mobiles, la correspondance entre l'adresse IP et l'identifiant des hôtes peut être retrouvée au moyen de requêtes DNS (un type d'enregistrement spécifique de type *HIP* a été introduit [262]).

Pour gérer la mobilité en cours de communication, HIP permet à un hôte qui aurait changé d'adresse IP (et donc de point de localisation dans le réseau IP) de reprendre une communication HIP au moyen d'un message de mise à jour expédié depuis la nouvelle adresse et qui inclut les éléments d'authentification de la session interrompue. Pour gérer la mobilité en cas de multiaccès, une extension a été définie pour informer son correspondant de la liste de ses adresses IP, tant à l'initialisation de la communication que lors des messages de mise à jour.

Le mécanisme précédent permet de gérer la mobilité à condition qu'un seul des participants soit en mobilité et que l'autre soit fixe. Si les deux sont mobiles, et que la communication n'a pas encore été initiée, un mécanisme de rendez-vous a été proposé [261]. Un serveur de rendez-vous, fixe, va pouvoir relayer le message d'initialisation de l'appelant vers l'appelé, en supposant que celui-ci ait enregistré préalablement sa localisation auprès de ce serveur de rendez-vous.

SHIM6 – Le protocole SHIM6 (Site multi-homing by IPv6 Intermediation [243]) est également une approche visant à intercaler une couche entre le routage et le transport. C'est une extension de IPv6 pour le multiaccès. Ce protocole s'intéresse au cas d'hôtes disposant d'accès multiples, et donc de plusieurs adresses. L'objectif est d'assurer des communications robustes en cas de rupture d'un des chemins. L'idée générale est qu'un socket de communication ouverte par une application n'est pas associé qu'à une seule adresse de l'hôte, mais à l'ensemble de ses adresses. Selon le principe de séparation entre la notion de localisation dans le réseau et la notion d'identifiant du correspondant, ces adresses gérées par SHIM6 sont des localisateurs. Par contre, l'une d'entre elles (typiquement celle qui est utilisée pour le routage classique IP vers le destinataire) est sélectionnée pour jouer le rôle de l'identifiant pour les couches protocolaires supérieures. En cas de changement de chemin, la couche SHIM6 continue à présenter à l'application les adresses IP initiales, mais les remplace sur le réseau par celles choisies pour le nouveau chemin, et précise la référence au contexte SHIM6 de communication en cours dans un entête d'extension ajoutée au message IPv6.

SHIM6 a été pensé pour être globalement transparent aux applications (qui continuent à ne voir que des adresses IPv6 ordinaires), ainsi qu'à l'infrastructure Internet qui ne voit passer que des paquets IPv6 quasiment ordinaires, si ce n'est parfois ceux transportant des entêtes de l'extension SHIM6. Si l'un des participants ne supporte pas le protocole SHIM6, il peut tout de même communiquer avec un hôte SHIM6, même si la communication ne pourra pas bénéficier du multiaccès.

Notons que SHIM6 exclue de son périmètre la problématique de la mobilité. Cependant, il est techniquement possible de combiner SHIM6 et MIPv6 [116].

ILNP – Le protocole ILNP (Identifier-Locator Network Protocol [249]) est un protocole expérimental (au sens des RFC expérimentaux de l'IETF) qui vise également à la séparation

de l'identifiant et du localisateur. Dans sa déclinaison sur IPv6, le format des entêtes et paquets est conservé, mais le champ des adresses source et destination IPv6 (128 bits) a une sémantique particulière. Au lieu d'avoir une organisation arborescente (préfixe, masque réseau, adresse sous-réseau, adresse machine, etc.), le champ est coupé en deux : les 64 bits de poids fort indiquent un localisateur, les 64 bits de poids faible un identifiant. (Historiquement, lors de l'élaboration d'IPv6, une proposition baptisée 8+8 (octets) avançait déjà cette idée.) Cette astuce permet aux paquets d'être routés normalement dans Internet vers la localisation de destination. Les protocoles des couches supérieures ne voient que l'identifiant, des adresses IPv6 ordinaire, si ce n'est que les 64 bits de poids fort sont mis à zéro et les 64 bits de poids faible portent l'identifiant de la machine. Ainsi, en cas de mobilité, et donc de changement de localisateur, les sockets et applications perdurent et ne sont pas fermés. En ce sens, la couche ILNP s'intercale entre la couche réseau et la couche transport.

ILNP propose que les identifiants et localisateurs soient publiés dans le DNS (recours aux mécanismes de DNS dynamique), pour lequel une nouvelle extension est proposée. Cela convient donc si les changements sont peu fréquents (en tout cas pas plus rapide que la durée de vie de l'information dans les caches DNS). Cela implique également que les applications utilisent préférentiellement des noms d'hôtes plutôt que des adresses ou identifiants.

Comparaison des solutions pour la mobilité Internet

Ce panorama, un peu scolaire, ne s'est focalisé que sur des solutions standardisées dans le monde IP. Pour autant, la taille de ce panorama illustre la variété des propositions élaborées pour la mobilité et le multiaccès. Les détails techniques de leur mise en œuvre jouent une grande importance ; il importe de les comprendre finement pour trouver un agencement ou des modifications qui couvrent au mieux nos besoins.

On peut certes observer que nombre d'astuces techniques se retrouvent d'un protocole à l'autre, mais cette variété reflète la diversité des préoccupations et des points de vue.

Une première préoccupation concerne l'étendue des modifications requises : l'hôte mobile, le correspondant, les applications, ou encore des routeurs dans le réseau, tous ou seulement certains, l'ajout de composants ou serveurs dans le réseau visité ou dans le réseau de l'hôte, etc.

Les approches autour de Mobile IP n'impactent que l'hôte mobile, et que sa couche réseau. La couche transport et les applications ne sont pas impactées. Dans le cas où les correspondants supportent également Mobile IP cela peut permettre d'optimiser les communications, pour autant ce n'est pas indispensable. Et même dans certains cas, l'hôte mobile peut être déchargé de la gestion de la mobilité (par un proxy dans le cas de PMIP, ou par le routeur mobile pour NEMO). Dans le cas de LISP, l'hôte mobile et le correspondant ne sont pas impactés. À l'inverse, les solutions de la couche transport (SCTP MPTCP QUIC) ou intermédiaire (HIP SHIM6) nécessitent une modification des piles protocolaires chez l'hôte mobile et les correspondants, ainsi qu'au niveau des applications dans une certaine mesure.

Les approches de la couche de routage impliquent une participation des routeurs. Pour LSIP, c'est a priori l'ensemble des routeurs de bordure, au moins tant du côté du réseau visité par l'hôte mobile que par les routeurs du réseau des correspondants. Pour les approches autour de Mobile IP, seul le routeur du réseau de l'hôte est modifié, ainsi que celui du réseau mobile dans le cas de NEMO.

Le principe de base est la séparation du localisateur et de l'identifiant, mais cela nécessite d'offrir un moyen de retrouver ce lien entre les deux avant d'établir une communication. Pour Mobile IP, c'est un service qui est ajouté au routeur du réseau de l'hôte, et qui n'a besoin de communiquer qu'avec l'hôte mobile. Dans le cas de LISP, ce sont des serveurs distincts, du côté du réseau visité par l'hôte mobile, mais qui doivent être consultables par les routeurs de bordure

du réseau du correspondant. Dans le cas de HIP, la solution s'appuie d'une part sur les serveurs DNS, une infrastructure déjà existante, mais aussi sur de nouveaux serveurs, des serveurs de rendez-vous. Bref, il faut un (au moins) point fixe quelque part que l'on puisse solliciter. À l'inverse, les solutions de la couche transport (SCTP MPTCP QUIC) ou même SHIM6 se proposent de gérer la mobilité lors d'une communication en cours, et à condition qu'elle ait pu être anticipée : autrement dit, que la nouvelle adresse ait pu être annoncée au correspondant avant. À ce propos, la littérature distingue les solutions de type *make before break* (besoin de gérer la mobilité avant que celle-ci ne survienne et casse les communications), des solutions de type *break before make* (peut gérer la mobilité après que celle-ci n'ait cassé les communications). La première famille de solutions (SCTP MPTCP QUIC SHIM6) offre généralement des transitions plus fluides, mais implique que la mobilité ait pu être anticipée (typiquement les protocoles où les participants peuvent s'annoncer les choses en cours de session). La seconde famille de solutions (MobileIP NEMO LISP) est plus robuste puisque l'on peut gérer même une fois mis devant le fait accompli, mais nécessite des mécanismes plus lourds (nécessité de serveurs que l'on peut consulter pour retrouver le participant que l'on a perdu). Certaines solutions tentent de jouer sur les deux tableaux (HIP ILNP) en ayant recours au DNS, pourtant peu adapté aux changements fréquents.

Une préoccupation constante concerne la sécurité. Lorsqu'un hôte a changé d'adresse IP, cette information est remontée à un serveur ou aux correspondants. Il faut alors s'assurer qu'un attaquant ne puisse annoncer des adresses IP illégitimes, faire croire à une mobilité de l'hôte, et détourner du trafic. Des mécanismes d'authentification plus ou moins poussés sont proposés (compromis entre facilité de mise en œuvre et niveau de garanties). Ensuite, lorsque des tunnels sont mis en place, il convient de sécuriser ce trafic (p.ex. Mobile IP et LISP utilisent des tunnels GRE avec de l'ESP IPsec). La question de la confidentialité n'est pas systématiquement abordée : de fait, certaines solutions ne communiquent pas l'information concernant les lieux visités par l'hôte et la gèrent en interne (Mobile IP et ses extensions), d'autres sont amenées à communiquer cette information au correspondant (SCTP MPTCP QUIC HIP SHIM6), certaines peuvent même la rendre visible globalement (possiblement les Map Servers de LISP, ou le DNS dynamique employé notamment dans M-SCTP ou ILNP).

Une autre préoccupation régulière porte sur les performances. Les phases de découvertes de la mobilité puis de notification auprès d'un serveur peuvent nécessiter des messages de signalisation que l'on va chercher à minimiser, en taille, en nombre, et en durée. Lorsqu'un tunnel doit être établi, il convient de tester préalablement sa validité, ce qui peut également consommer des messages de signalisation. L'encapsulation nécessaire consomme de la place dans les paquets. Enfin, il peut conduire à des trajets passant par un intermédiaire (p.ex. le Home Agent dans Mobile IP). Toutes les propositions étudiées proposent diverses optimisations ou extensions, que ce soit sur les entêtes des protocoles que sur la question du routage direct entre l'hôte mobile et son correspondant. Par contre, les changements de chemins peuvent affecter les mécanismes de contrôle de congestion et contrôle de flux des protocoles de couches supérieures. Aussi, les solutions de la couche transport (SCTP MPTCP QUIC) mettent en place des mécanismes dédiés.

Enfin une dernière préoccupation a trait à la robustesse du système face à ces middleboxes, en présence de NAT, de pare-feu plus ou moins protectionnistes, soit du côté des réseaux visités par l'hôte mobile, soit du côté du correspondant [239]. Ainsi, ces solutions intègrent des mécanismes pour tester les chemins, et le cas échéant peuvent bénéficier des facilités apportées par un tunnel, et ainsi possiblement mieux gérer le trafic entrant.

Choix d'une solution pour la mobilité Internet

Les critères de choix que nous avons formulés précédemment recherchaient des solutions pour la mobilité réseau. Or, les propositions disponibles s'intéressent essentiellement à la mobilité d'un hôte. En fait, seuls NEMO et LISP traitent de la mobilité d'un réseau.

Un autre critère portait sur la gestion des accès multiples. Mobile IP et NEMO peuvent bénéficier de l'extension MCoA (Multiple Care-of Addresses Registration). LISP, SCTP, MPTCP, QUIC, HIP, SHIM6 et ILNP supportent nativement les accès multiples, que ce soit pour exploiter des chemins différents simultanément ou pour simplement gérer la migration de l'un à l'autre.

La gestion du multiaccès s'accompagne d'un critère complémentaire : offrir la possibilité à l'hôte, voire à l'application, de participer au choix des interfaces d'accès pour chacun de ses flux. Les solutions de la couche transport (SCTP MPTCP QUIC) offrent naturellement cette possibilité, typiquement au moyen d'API socket adapté. Les solutions de couche intermédiaire (HIP SHIM6 ILNP) permettent à la couche réseau de l'hôte sélectionner l'interface d'accès (gestion par le système d'exploitation de la machine), mais s'efforcent de rendre cela transparent aux couches supérieures (couche transport, ainsi qu'aux applications). Enfin, les solutions de la couche réseau sont plus éloignées de ce critère. La solution LISP se veut entièrement transparente aux participants, par conséquent elle exclue toute forme de participation à ce choix. Les solutions Mobile IP et NEMO proposent une gestion via l'extension Flow Bindings, mais à assez gros grain.

Il ressort de cette étude des solutions existantes que, en l'état, aucune ne couvre toutes les exigences formulées. Il convient donc d'envisager d'introduire des modifications. Plus précisément, nous envisageons une forme de collaboration entre des solutions de la couche réseau et des solutions de la couche transport.

2.3.3 Proposition pour la mobilité réseau et le multiaccès

Parmi les solutions de la couche réseau, NEMO a retenu particulièrement notre attention. Deux arguments principaux : cette solution gère la mobilité d'un réseau, et elle implique peu de changement.

NEMO peut supporter le multiaccès grâce à l'extension MCoA, mais c'est un support peu souple, et qui ne permet pas aux hôtes du réseau mobile de participer au choix des interfaces. Aussi, il semble intéressant de lui adjoindre les protocoles de la couche transport, qui vont ainsi pouvoir interagir avec les besoins et critères des applications.

Combinaison de NEMO et MPTCP

Les études menées nous conduisent à proposer une utilisation conjointe de NEMO et MPTCP [33]. L'idée générale est de s'appuyer sur NEMO pour assurer la joignabilité en mobilité, et MPTCP pour gérer le multiaccès et le choix des interfaces.

En fait, cette proposition est tout à fait transposable pour une utilisation conjointe de NEMO avec SCTP ou QUIC, puisque ces protocoles offrent le même niveau de fonctionnalités que MPTCP pour annoncer et utiliser de nouveaux chemins en cours de session. Il se trouve que SCTP est peu déployé (excepté entre composants internes des réseaux 4G 5G), plus complexe à utiliser dans une application, et est globalement moins efficace [141]. Le protocole QUIC pour sa part est une proposition très prometteuse, mais encore très récente : si le protocole est bien standardisé, ses implémentations sont encore expérimentales, et son usage généralement dédié au web. Aussi, nos études et expérimentations ont utilisé MPTCP.

Le principe de fonctionnement est schématisé sur la figure 2.3. Les paquets d'un correspondant à destination d'un hôte mobile (et donc de son Home Address) sont naturellement routés

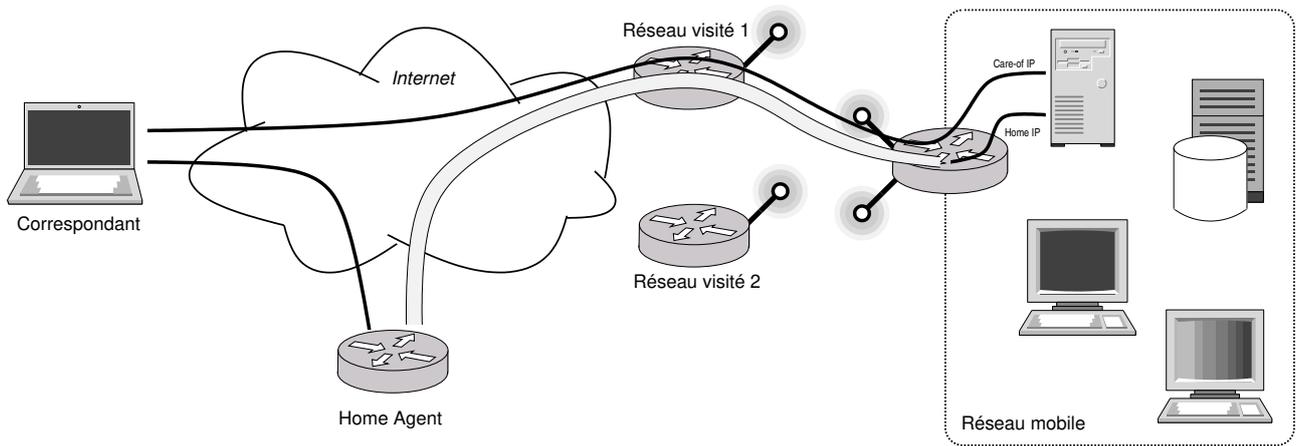


FIGURE 2.3 – Architecture pour la mobilité réseau

vers sont Home Agent. Celui-ci les encapsule à destination de sa Care-of Address obtenue par le Routeur Mobile auprès du Réseau Visité. Ce Routeur Mobile les décapsule, et les remet à l'hôte, configuré au sein du réseau mobile avec sa Home Address. C'est le principe de fonctionnement de NEMO. Dans le même temps, le Routeur Mobile qui a reçu un Care-of Address Prefix de la part du (ou des) Réseau Visité, annonce ce préfixe aux hôtes mobiles sur son réseau interne mobile. Les hôtes mobiles voient donc deux adresses : l'une fixe et habituelle (la Home Address), et une seconde mouvante et temporaire (la Care-of Address). Grâce à cela, les hôtes mobiles ont le moyen de décider par eux-mêmes quel flux doit emprunter quel chemin, et appliquer cette décision à l'aide des mécanismes de MPTCP (ou équivalents offerts par d'autres protocoles de la couche de transport supportant le multiaccès). Si l'hôte mobile choisit de basculer sur le chemin direct via son adresse temporaire et que celle-ci vient à être désactivée lors d'un déplacement, le chemin empruntant le tunnel NEMO reste disponible, et la session peut se poursuivre. La proposition n'implique pas de modification des protocoles, mais uniquement l'utilisation conjointe de mécanismes déjà standardisés.

La combinaison de NEMO et MPTCP fait apparaître un certain nombre d'avantages qualitatifs : une faible complexité de déploiement, une mobilité fluide lorsqu'elle peut être anticipée, mais robuste en cas de déconnexions/reconnexions, le franchissement des middleboxes facilité par le tunnel, des communications optimisées par la possibilité de liens directs, la possibilité de participer au choix des interfaces d'accès pour les applications.

Prototypage et expérimentation

Pour mener une analyse fonctionnelle et quantitative, la solution a été prototypée sur une plate-forme de test [33, 34]. Celle-ci inclut : (i) un réseau mobile composé d'un routeur (supportant NEMO) et d'un hôte (supportant MPTCP), (ii) un réseau Home Network composé d'un routeur Home Agent (NEMO), (iii) deux réseaux visités composés chacun d'un routeur, (iv) d'un correspondant (MPTCP), et (v) d'un routeur figurant un Internet encombré (introduisant un léger délai et quelques pertes de paquets grâce à l'outil `netem`, outil également utilisé sur les routeurs des réseaux visités pour en faire varier la qualité des liaisons). La plate-forme est composée d'équipements physiques (type PC Linux) et de switches. La mobilité d'un réseau visité est opérée en débranchant et rebranchant un câble Ethernet d'un switch à un autre.

La plate-forme utilisait l'implémentation de NEMO produite par le groupe de travail MANET à l'IETF (Mobile Ad-hoc Networks [197]) dans le cadre du projet UMIP (Universal Mobile IP [88, 207]). Notons qu'un support partiel de MIP6/NEMO (lecture des entêtes d'extension) est disponible nativement sous Linux avec l'implémentation issue du projet USAGI/WIDE.

Pour le support de MPTCP, la plate-forme utilisait l'implémentation réalisée à l'Université Catholique de Louvain [195], maintenant disponible nativement sous Linux.

La plate-forme nous a permis de procéder à la validation fonctionnelle d'un certain nombre de scénarios : typiquement lorsque le réseau mobile se déplace depuis son Home Network vers un Visited Network, puis d'un premier Visited Network à un second. Les délais de reconstruction du chemin sont inférieurs à la demi-seconde (une fois arrivé dans le nouveau réseau, et concrètement une fois le câble Ethernet rebranché). Pour chacun de ces scénarios, différentes mesures de performances ont été relevées (délais du temps d'aller-retour (ou RTT), gigue, bande passante), lorsque les flux empruntent le tunnel, et lorsque les flux empruntent un chemin direct grâce à MPTCP. L'outil `ping6` mesure le RTT moyen et la gigue, l'outil `iperf` mesure la bande passante quasi instantanée, et `netperf` mesure la bande passante moyenne (unidirectionnelle et bidirectionnelle).

Ces mesures nous amènent aux observations suivantes. L'utilisation de MPTCP permet d'éviter de passer par cet intermédiaire, le Home-Agent, et l'encapsulation. Aussi, sans surprise, nous observons que le délai est directement proportionnel à la "longueur" (au sens réseau) des chemins (ceux qui passent par le Home Agent, vs. les chemins directs). La bande passante est également améliorée, manifestement moins par la place qui était consommée par les entêtes d'encapsulation (environ 2,75%) que par l'impact de cette encapsulation pouvait avoir sur le fonctionnement du contrôle de congestion. Cependant, on observe une certaine fluctuation des débits, problèmes connus avec les premières implémentations de MPTCP qui le rendait assez sensible aux pertes de paquets (provoqués artificiellement dans notre plate-forme pour simuler différentes qualités des liens). Les implémentations récentes de MPTCP offrent maintenant un niveau de qualité similaire au TCP traditionnel.

Bref, ces mesures ont conforté les hypothèses émises : outre la validation fonctionnelle de la proposition, l'utilisation conjointe de NEMO et MPTCP offre un réel avantage par rapport à NEMO seul, tant sur les délais que sur la bande passante.

Extension aux réseaux cellulaires

L'expertise acquise sur la mobilité IP a pu être mise à profit dans le cadre d'une collaboration informelle avec un autre projet de recherche, le projet COMBO, porté par des collègues sur le fonctionnement des réseaux cellulaires de nouvelle génération (la technologie LTE, Long Term Evolution, ou 4G), technologie également utilisée dans notre projet TMS.

Ces réseaux cellulaires s'appuient sur un cœur de réseau qui bascule vers du tout IP, selon les mécanismes proposés par le 3GPP (3rd Generation Partnership Project, le consortium d'opérateurs qui produit les normes des réseaux cellulaires). D'une part le service apporté au terminal mobile prend la forme d'un accès Internet, mais également les technologies employées par les opérateurs s'appuient sur des solutions IP. Le principe de fonctionnement classique de la mobilité dans les réseaux cellulaires est le suivant. Le terminal mobile de l'utilisateur se raccorde à une base radio proche (eNodeB, evolved Node Base transceiver station). Le flux utilisateur y est alors encapsulé en IP/UDP à destination d'un point fixe SGW (Serving Gateway), qui réceptionne le flux de cet utilisateur lorsqu'il se déplace d'un eNodeB à un autre. Le choix de la base radio qui accueille l'utilisateur en mobilité est fait par une MME (Mobility Management Entity), raccordée à la fois aux différents eNodeB et à la SGW. Le flux de l'utilisateur passe ensuite de la SGW à une PGW (Packet Data Network Gateway) plus haut dans le réseau, qui attribue alors une IP à l'utilisateur, décapsule ce flux, et l'injecte dans le réseau IP de l'opérateur. La PGW peut également appliquer des politiques de filtrage, de classification du trafic (voix, data, etc.), de qualité de service (utilisation des mécanismes Diameter déjà abordés dans la première étude de ce chapitre).

Pour alléger la charge de trafic dans le réseau de cœur des opérateurs mobiles, le 3GPP propose deux solutions. La première, LIPA (Local IP Access), consiste à déployer des *femtocells*, c'est-à-dire des cellules (au sens de la téléphonie cellulaire) à l'échelle d'un bâtiment. Concrètement, cette femtocell est constituée d'un Home eNodeB co-localisé avec un Local Gateway (LGW), déployée dans la maison (ou l'entreprise) de l'utilisateur, mais qui est raccordée au réseau Internet de la maison, permettant ainsi de faire transiter le trafic du terminal mobile vers l'opérateur (dans un tunnel IPsec). La seconde solution, SIPTO (Selected IP Traffic Offload [134]), propose un mécanisme pour qu'un flux utilisateur puisse migrer d'une PGW à une autre plus proche (et possiblement d'une femtocell), et de permettre à la passerelle de faire sortir du trafic data de l'utilisateur directement sur Internet plutôt que de transiter d'abord vers le réseau IP interne de l'opérateur, bref du routage au sens IP. LIPA et SIPTO se combinent naturellement. C'est une stratégie de "déchargement" (*offload*) du trafic.

Le projet COMBO (CONvergence of fixed and Mobile BrOadband access aggregation networks) étudie et recherche de nouvelles approches intégrées pour la convergence fixe-mobile, à la fois dans les réseaux d'accès et les réseaux d'agrégation large bande métropolitains. Dans COMBO, l'idée proposée est d'unifier toutes les passerelles de toutes les technologies (typiquement : fixes, mobiles, et Wi-Fi) au sein d'une entité unifiée appelée Universal Access Gateway (UAG). Ces UAG ont vocation à être installés sur ce que les opérateurs appellent des points de présence en bordure de réseau (NG-POP, Next Generation Point of Presence), en quelque sorte des petits data-centers métropolitains en "bordure" du réseau IP, et où différents opérateurs sont co-localisés.

L'un des problèmes identifiés est que dans certains scénarios de mobilité, la continuité de session n'est pas assurée. Lorsque l'utilisateur migre d'un eNodeB à un autre, ou d'une SGW à une autre, la migration se passe sans heurt (*smooth handover*), principalement car c'est la PGW qui attribue une IP au terminal utilisateur. Les sessions en cours ne sont pas interrompues. En revanche, s'il faut migrer l'utilisateur d'une PGW à une autre, comme peut le proposer SIPTO, ou sur une autre technologie d'accès, l'adresse IP du terminal va changer, provoquant une rupture des sessions data et connexions IP en cours. Notons que lors de cette mobilité, les changements sont anticipés par le réseau cellulaire, et la nouvelle adresse (IPv6) peut être connue du terminal avant que l'ancien lien ne soit rompu (scénario *make before break*).

Ces réseaux cellulaires de nouvelle génération s'appuient sur des technologies IP pour leur fonctionnement interne. Et l'on peut constater que la gestion de la mobilité qu'ils proposent pour leur service partage beaucoup de briques fonctionnelles avec ce qui est proposé plus généralement dans les standards de l'IETF évoqués plus haut (séparation entre l'identifiant et localisateur du terminal, mapping, tunnels, optimisation des trajets, etc.). Après étude des différentes solutions et alternatives disponibles, nous avons préconisé l'emploi de MPTCP pour les sessions data de l'utilisateur [32] (soit directement dans les applications, soit au moyen d'un proxy TCP-MPTCP qui pourrait être implémenté comme un service système sur le terminal utilisateur), apportant ainsi une solution nécessitant très peu de changements et offrant un réel avantage pour la continuité de sessions en mobilité.

2.3.4 Bilan des études sur la joignabilité en mobilité et accès multiples

Le projet TMS nous a amenés à étudier les problématiques liées à la mobilité, dans un contexte où l'essor de la technologie auprès du grand public apporte à l'utilisateur des équipements connectés plus nombreux et plus variés. Différents critères sont considérés : la continuité de sessions en cours, la mobilité d'un réseau dans son ensemble, la gestion d'accès multiples simultanés, la participation au choix de l'accès utilisé par ses flux.

Les technologies sans fil proposent généralement une gestion de la mobilité, mais à leur échelle, c'est-à-dire au niveau de technologie de liaison. Lorsqu'il s'agit de mobilité et d'accès multiples entre technologies de liaisons différentes ou par des opérateurs différents, la question se reporte naturellement sur le rôle à jouer par la couche réseau, sur laquelle les applications et sessions échangent leur flux. Dans le monde Internet, les groupes de travail de l'IETF ont proposé un certain nombre de solutions, dont la variété est en lien avec les points de vue et contraintes spécifiques liés aux domaines considérés (point de vue utilisateur, point de vue opérateur, solution de la couche réseau elle-même, ou des couches protocolaires supérieures, etc.). En croisant les besoins de nos cas d'usage et une analyse fine des solutions standardisées, nos études nous ont conduites à préconiser une utilisation conjointe de NEMO et MPTCP, c'est-à-dire une solution de la couche réseau et une solution de la couche transport. Cette approche a fait l'objet d'un prototypage et d'expérimentations tant qualitatives que quantitatives pour en valider la pertinence [72].

Ces questions de mobilité dans Internet ne sont pas nouvelles et des solutions ont été proposées de longue date. Pourtant, on constate aujourd'hui que ces solutions, ou leurs évolutions, sont peu déployées. Pour nuancer, on peut mentionner tout de même deux cas de figure. Tout d'abord, même si les opérateurs communiquent peu sur leurs choix techniques internes, la solution LISP semble être régulièrement utilisée pour gérer les adresses type Provider-Independent (c.-à-d. attribuées directement à un établissement et pas fournies par l'opérateur). Ensuite, du côté des usagers et du grand public, certains acteurs fournisseurs de VPN (p.ex. OpenVPN ou WireGuard) proposent maintenant des fonctionnalités d'itinérance, permettant la mobilité aux participants sans rupture de session une fois celle-ci établie (techniquement, cela s'apparenterait à une version simplifiée de Mobile IP). Ces deux exemples illustrent bien le fait que la mobilité est vraiment un sujet. Pour autant, l'usage des solutions standardisées dans ce domaine reste peu répandu.

Plusieurs explications possibles à ce constat : les middleboxes, et le cloud. Les *middleboxes*, ces équipements insérés au fil des ans sur les réseaux Internet, aux fonctions et comportements mal définis, tendent à bloquer toute innovation ou nouveau protocole Internet. En réaction, différentes stratégies de contournement sont couramment employées par les développeurs d'application et fournisseurs de service, et finissent par devenir la norme : le renoncement à la joignabilité et l'abandon même de l'idée d'un service offrant des communications entrantes, le recours régulier à des tunnels, et enfin externaliser le service hors de la mobilité de l'utilisateur (typiquement, le cloud). Il est important que ces middleboxes montent en qualité, avec un réel support de l'ensemble des normes d'Internet, et un périmètre d'action mieux défini. Pour cela, les acteurs impliqués sont typiquement les équipementiers, les opérateurs, les administrateurs réseau. La stratégie ici n'est pas dans l'attente d'une nouvelle innovation technologique ou d'un nouveau protocole réseau, mais la pédagogie et la formation de ces acteurs à cette problématique.

La *cloudification* d'Internet est un autre phénomène de la transformation de l'écosystème informatique et réseau ces dernières années. Le phénomène n'est pas technique lui, mais organisationnel. Dans Internet, par conception, la fourniture d'un service peut techniquement être apportée indistinctement par toute machine terminale, contrairement aux réseaux téléphoniques où le service est nécessairement opéré par l'infrastructure réseau pour des terminaux très passifs. Pour autant, il est devenu courant dans Internet de regrouper la fourniture de services dans des serveurs dédiés, externalisés, dans des data-centers placés dans le réseau et opérés par des acteurs spécialisés. Ainsi, un modèle économique très actif s'est installé où différents acteurs opèrent l'infrastructure serveurs, le logiciel du service, les données. Ce modèle conceptuel instaure un clivage entre serveur (prestataire) et terminal utilisateur (client). La centralisation est efficace à bien des égards, mais c'est devenu un modèle hégémonique. Notamment, c'est aujourd'hui le moyen par lequel la mobilité est supportée : l'utilisateur en mobilité ne fait que

des connexions sortantes, vers des serveurs qui sont fixes sur le réseau. Même si la nature du service fait que l'utilisateur n'est pas que consommateur mais aussi fournisseur du contenu ou des données du service, cela se fait par des connexions sortantes pour les pousser sur un serveur, quitte à devoir se reconnecter dessus pour retrouver et consommer ses propres données. C'est l'applicatif qui va suppléer aux situations de mobilité, et s'arranger avec les déconnexions/reconnexions, lorsque cela est possible. Concrètement, la continuité de session n'est pas assurée. Et l'identifiant de l'hôte mobile est en fait celui de l'utilisateur et non pas du terminal mobile.

Cependant, même si cette approche continue son expansion, des critères autres qu'économiques peuvent venir peser dans la balance et amener à rechercher des alternatives telles que celles étudiées ici. Ainsi, la préoccupation d'un "cloud souverain" peut inciter à ne pas systématiquement construire des services focalisés sur des data-centers, d'autant plus s'ils sont concentrés dans les mains de quelques acteurs. De même, la préoccupation de la préservation des données privées pose autant la question de la collecte que de la gestion de ces données, d'autant plus si elles doivent passer entre les mains de plusieurs acteurs, aussi honorables soient-ils. Ainsi, lorsque la logique de service ne l'impose pas, autant ne pas externaliser les données sur un data-center mais les laisser là où elles font sens. Les techniques de joignabilité en mobilité et accès multiples présentent alors un réel intérêt.

2.4 Bilan et perspectives

Ce chapitre a exploré plusieurs aspects de l'infrastructure Internet pour la fourniture de services de communication et de contenus multimédias.

La première partie s'est intéressée à la téléphonie, qui aujourd'hui a convergé sur l'infrastructure Internet. Cette convergence a amené divers changements autres que techniques, sur le modèle de coûts, sur le modèle d'organisation, l'émergence de nouveaux besoins et services. Le cas d'étude est le scénario de la gestion des flux d'appels pour des usagers bénéficiant de plusieurs accès Internet. Il est courant pour un établissement (un centre d'hébergement ou de soins, une entreprise, etc.) de recourir à plusieurs accès réseau, pour des questions de résilience (un accès principal et un autre en secours), de performance (équilibrer la charge sur plusieurs liens), ou de tarification (certains liens peuvent avoir une vocation généraliste alors que d'autres sont réservés à des flux plus exigeants). Pour traiter cette problématique, nous proposons de modifier l'infrastructure technique pour la gestion des appels de l'établissement. Ainsi, nous ajoutons un serveur de politiques (Policy Decision Point, PDP) qui prend les décisions en fonction de la nature des flux multimédias sollicités, l'état des liens, les attributions des différents utilisateurs, les critères de choix de l'établissement. Différents algorithmes de prise de décision sont envisagés (TOPSIS, GRC, AHP, etc.). Un second composant a pour rôle d'exécuter les décisions prises par le serveur de politiques (Policy Enforcement Point, PEP). Pour l'intégration de ces composants dans l'architecture existante, différentes modifications sont proposées, comme le recours à des extensions du protocole SIP ou encore Diameter. Il a pu être observé que le cas des appels entrants nécessite une attention particulière par rapport aux appels sortants. Différents scénarios sont étudiés, par exemple si les politiques de décisions du PDP sont préchargées dans le PEP, ou si le PDP est co-localisé avec le PEP. La proposition a été prototypée permettant une validation tant fonctionnelle que quantitative.

La seconde partie s'est intéressée à la distribution de contenus multimédias. En effet, l'usage de la télévision s'est diversifié suite à l'utilisation de l'infrastructure Internet. Outre la diffusion en direct, des services nouveaux sont proposés par des acteurs divers, comme la télé de rattrapage, la vidéo à la demande, ou la vidéo personnelle. Ces contenus multimédias sont très demandeurs de bande passante et de capacité de stockage. Aussi, les producteurs de contenu font appel à des intermédiaires techniques pour la distribution de ces contenus sur le réseau (Content Delivery Network, CDN). Il s'agit en fait d'une gestion spécialisée de data-centers,

où l'on se préoccupe d'optimiser la consommation de ressources réseau en plaçant les contenus au plus près des consommateurs, tout en se souciant de la consommation du stockage occupé par la réplication des médias. Dans ce contexte, nous avons proposé le recours aux capacités de stockage des opérateurs de collecte Internet (approche appelée dCDN, distributed CDN). Cette proposition implique une collaboration fine entre les différents acteurs : fournisseurs de contenus, CDN traditionnels, opérateurs de collecte Internet, et box télé de l'utilisateur. En s'appuyant sur la technologie MPEG-DASH (Dynamic, Adaptive Streaming over HTTP), cette stratégie a été mise en œuvre en définissant notamment de nouveaux mécanismes de redirection des requêtes utilisateurs au sein de ce réseau de distribution. Là encore, un prototypage a permis de valider la proposition.

Enfin, la troisième partie s'est intéressée à la joignabilité réseau en mobilité et accès multiple. Le scénario est celui d'une petite infrastructure informatique réseau au sein d'un véhicule, ou encore d'équipements personnels portés, et donc en mobilité, et raccordé à Internet par un ou plusieurs points d'accès changeant au cours du temps, possiblement sur des technologies ou opérateurs sans fil différents. L'enjeu est de pouvoir offrir des services Internet, accessibles depuis l'extérieur, et dont les sessions ne sont pas interrompues par la mobilité. La difficulté tient à l'infrastructure même d'Internet, où les adresses IP jouent à la fois le rôle d'identifiant de l'hôte et le rôle de localisateur dans le réseau, et où l'introduction de divers boîtiers de contrôle aux fonctions mal définies (middleboxes) entrave les évolutions du réseau. Une étude fine des différentes (et nombreuses) solutions normalisées nous a conduits à proposer une utilisation conjointe des protocoles NEMO et MPTCP pour atteindre l'ensemble de nos critères : couverture des fonctionnalités requises, modifications minimales et impactant uniquement l'utilisateur mobilité, efficacité et robustesse pour gérer la mobilité sans heurts. Une variante adaptée aux réseaux cellulaires LTE 4G a été proposée (SIPTO et MPTCP).

Les études rapportées dans ce chapitre ont notamment pour point commun de s'articuler autour du besoin de gérer la ressource réseau. Une tautologie : le réseau Internet est devenu aujourd'hui un élément technique majeur pour la fourniture de services. Pour autant, les caractéristiques de ce réseau évoluent rapidement. Il y a perpétuellement une course entre la capacité disponible et celle consommée. À l'heure où ces lignes sont écrites, on peut constater que la balance penche depuis quelque temps vers un surdimensionnement des capacités disponibles sur Internet (et plus précisément grâce aux techniques d'amplification optique, pierre angulaire des réseaux optiques aujourd'hui, offrant dès lors des performances inimaginables il y a quelques décennies). Cet état de fait peut alors laisser penser qu'il n'y a pas vraiment besoin de gérer la ressource. Mais l'introduction de nouveaux besoins (vidéo personnelle massive, réalité virtuelle, etc.) et la multiplication des terminaux utilisateur et des objets connectés peuvent contrebalancer les choses et remettre sur le devant de la scène la nécessité de gérer la ressource avec finesse et parcimonie. À ceci peuvent s'ajouter d'autres enjeux, comme la nécessité de plus de sobriété numérique, ou le respect des données personnelles et donc la question de leur placement et de leur circulation.

Aussi, un second point commun qui transparaît dans ces études est le constat que cette gestion de la ressource réseau s'opère grâce à une plus grande collaboration entre entités. Par exemple, les sujets sur les politiques de routage d'appels nécessitent des échanges d'information entre l'applicatif de service (ici la téléphonie d'entreprise), l'équipement de routage des appels, les routeurs IP. De même, le sujet sur distribution de contenus vidéo passe par des collaborations entre opérateurs de data-centers, opérateurs de réseau de collecte, box télé des utilisateurs. Enfin, le sujet sur la mobilité réseau implique des collaborations entre hôtes distants, routeur mobile, routeurs du réseau fixe, couche de transport de l'application. Bref, ce principe de collaboration semble apparaître comme une constante.

Il se trouve que le traditionnel modèle conceptuel en couches des réseaux décrit des rôles pour chaque entité avec un périmètre d'actions précis. Pour autant, rien n'impose un cloisonnement

entre ces couches, et plus d'interaction est non seulement possible, mais visiblement préférable. Il ne s'agit pas de rendre transparentes certaines couches livrant ainsi des informations brutes aux couches adjacentes (approche dite *cross-layers* parfois explorée dans la littérature), mais plutôt d'enrichir ces différentes couches réseau. Aujourd'hui, ces couches réseau interagissent entre elles essentiellement pour des besoins fonctionnels (typiquement, gérer la transmission de la charge utile). Mais l'enjeu est ici de compléter ces interactions avec des informations non-fonctionnelles, et au niveau d'abstraction adéquate pour chaque couche (p.ex. indiquer les liens disponibles, la capacité, exprimer des préférences, etc.). Différentes solutions pratiques existent déjà (ouvrir des ports sur un pare-feu ou middlebox, relever les compteurs sur un routeur, etc.), mais ces solutions méritent d'être formalisées et généralisées. On peut évoquer ici les récents travaux du groupe "Homenet" [138] de l'IETF qui ont produit une poignée de RFC décrivant des mécanismes de dialogue entre équipements du domicile pour se découvrir les uns les autres et notamment le routeur (la box opérateur) est sa configuration IP. Et si ces mécanismes ont été pensés pour un réseau résidentiel, ils peuvent probablement s'utiliser dans d'autres contextes. Mais d'une manière générale, de tels mécanismes de signalisation enrichis apparaissent comme un prérequis à toutes les méthodes de gestion fine de la ressource réseau, avec une continuité depuis les couches physiques jusqu'aux couches applicatives. Cette gestion est à envisager sous un paradigme d'*indication* où chacun annonce d'une part les caractéristiques offertes, mais aussi la nature de ses besoins, et donc avec une forme de collaboration et de négociation, plutôt que sous un paradigme de contrôle-commande, qui trouve vite ses limites lorsqu'il s'opère entre entités de natures ou couches différentes. À court ou moyen terme, deux axes méritent d'être explorés. Tout d'abord, ces middleboxes qui doivent être mieux définies en termes de périmètre d'action et de rôle, et surtout d'interaction avec les services et les hôtes, avec des mécanismes de signalisation unifiés pour négocier l'ouverture et la fermeture d'accès, indiquer les transformations appliquées aux flux, etc. Ensuite, le succès de protocoles récents comme MPTCP ou QUIC indique un intérêt pour la gestion du multiaccès. Cette gestion du multiaccès doit alors se piloter à travers les différentes couches au sein de la machine (depuis les couches basses jusqu'à l'application, en passant par des services du système d'exploitation), et de manière unifiée et plutôt que spécifique à chaque protocole.

Chapitre 3

Systemes ambiants et habitat intelligent

Notre démarche s'intéresse aux technologies pour soutenir le quotidien de personnes fragiles. Les chapitres précédents ont apporté un éclairage sur les besoins utilisateurs, puis sur l'infrastructure Internet exploités par ces services. Le domicile est le lieu privilégié où peuvent être déployés des dispositifs et des services d'accompagnement favorisant l'autonomie des personnes fragiles. Dans ce chapitre, nous explorons les possibilités offertes par l'écosystème numérique de l'habitat.

L'informatique ambiante peut être définie comme l'ensemble des technologies où les personnes utilisent un ordinateur sans s'en rendre compte. Cette définition un peu grossière renvoie à plusieurs idées majeures. Tout d'abord, si l'utilisateur ne se rend pas compte qu'il y a un ordinateur, c'est que celui-ci a une apparence qui s'apparente à l'image d'un objet autre que l'image typique d'un ordinateur équipé de clavier écran souris câbles. L'informatique ambiante implique que l'ordinateur soit intégré dans des objets du quotidien (téléphone, télévision, voiture, montre, cadre, photo, station météo, etc.). La seconde idée est que cet ordinateur rend un service qui relève des problèmes du quotidien, et non pas un service lié à des besoins professionnels tel que faire le suivi de la comptabilité, produire des rapports, piloter des outils de productions, bref tout ce pourquoi la micro-informatique s'est diffusée dans la société à ses débuts. Enfin, conséquence des deux points précédents, il y a l'idée que cet ordinateur, enfoui dans des objets et contraint en capacité mais rendant des services du quotidien, il travaille rarement seul, qu'il est quasi systématiquement connecté à d'autres, et que c'est en fait ce système dans son ensemble qui apporte une valeur ajoutée pour l'utilisateur.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux systèmes ambiants qui peuvent être déployés dans l'habitat et qui vont pouvoir être fédérés pour fournir des services apportant confort, bien-être, sécurité, et autonomie dans leur vie quotidienne aux résidents. De tels systèmes incluent les équipements domotiques, capteurs, actionneurs, boîtiers de contrôle, interfaces de commandes, ainsi que les dispositifs variés apportés par le domaine de l'internet des objets.

3.1 Services d'aide à la vie quotidienne

L'émergence de l'informatique ambiante est apparue comme une réponse prometteuse aux difficultés que peuvent rencontrer les personnes fragiles ou en perte d'autonomie dans leur vie quotidienne. L'expression Ambient Assisted Living (AAL, ou parfois Active Assisted Living) a été popularisée par un programme de recherche du même nom, programme conjoint de la Commission Européenne, des états membres, et des partenaires industriels (premier appel 2008-2013, régulièrement renouvelé depuis) [194]. Ce domaine comprend des méthodes, des concepts, des équipements, et des services qui visent à faciliter la vie quotidienne des personnes âgées et

des personnes handicapées, leur permettre de retrouver ou de maintenir un niveau d'autonomie satisfaisant, bref, améliorer la qualité de vie. Les usagers ciblés sont les personnes fragiles elles-mêmes, mais aussi les personnes de leur entourage, leurs aidants naturels ou professionnels. Les plates-formes techniques et solutions peuvent inclure des applications mobiles, des tablettes et smartphones, des téléviseurs connectés, des systèmes téléphoniques classiques, des robots compagnons, des dispositifs domotiques, des capteurs physiologiques innovants, de l'actimétrie, des services de coaching, des jeux sérieux, des interactions sociales, etc.

3.1.1 De la domotique à l'actimétrie

Par essence, les solutions AAL se doivent de s'intégrer dans l'environnement existant de la personne, tant d'un point de vue technique que des usages. Ainsi, les systèmes d'alarme et de domotique offrent un premier socle. Par exemple, dans le cadre du projet SIGAAL 5.3.3 les fonctionnalités mises en place se composent de trois types : domotique, alarme, prévention.

En premier lieu, les services domotiques se proposent d'apporter du confort grâce à des automatismes et des commandes des équipements dans l'habitat : chauffage, éclairage, ouvrants. Certains gestes de la vie quotidienne peuvent parfois se révéler périlleux ou source de fatigue : se pencher à la fenêtre pour fermer un volet, tourner la manivelle, etc. Une motorisation est bien venue, mais aussi un pilotage centralisé. Certaines automatisations simples ajoutent à la tranquillité de l'utilisateur.

Les innovations dans ce domaine portent tout d'abord sur l'extension de la gamme des objets ainsi connectés et contrôlables, associées à la baisse des coûts. Mais viennent aussi des innovations sur les modalités d'interaction. Dans notre cas, nous avons choisi une interface sur la télévision, dispositif généralement central dans la maison et utilisable par tous les résidents. Mais des interfaces pour smartphones sont classiquement proposées, ainsi que quelques solutions capables de reconnaître des ordres simples par la voix.

Ces solutions domotiques sont aujourd'hui classiques et non spécifiques aux usagers en situation de fragilité. Cependant, elles offrent à ce public certaines facilités qui leur permettent de préserver une certaine forme d'autonomie et de liberté dans le quotidien.

Une seconde gamme de services également classiques portent sur la sécurisation des biens et des personnes.

Les solutions de type centrale d'alarme anti-intrusion et de contrôle incendie sont des services connus, déployés couramment chez les particuliers, rassurants tant les usagers que leur entourage, et venant avec un certain nombre d'équipements installés dans le domicile qui peuvent être réutilisés pour d'autres services (par exemple des capteurs de mouvements ou des capteurs d'ouverture). Ainsi, le partenaire DeltaDore fournisseur de la solution d'alarme dans le cadre du projet, a permis l'ouverture de son système, dans le respect des réglementations sur les systèmes d'alarme, pour que les données des capteurs puissent être accessibles à la box domotique.

De plus, les personnes âgées ou vulnérables peuvent se voir proposer des prestations de type alarme détresse, téléalarme, téléassistance : un bouton d'appel (porté par la personne, fixe dans le domicile, ou via une application sur un smartphone adapté) déclenche une communication (généralement téléphonique) vers un centre d'appels. L'opérateur procède alors à la levée de doutes en quelques mots, et suivant les circonstances, prévient les secours, un proche, ou apporte un soutien psychologique et réconfort. Là aussi, le partenaire Mondial Assistance avait ouvert son dispositif technique à notre système AAL. Cet interfaçage permet alors au système domotique d'être informé de l'alarme, et de dérouler des automatismes et scénarios de sécurisation complémentaires dans le domicile. De manière réciproque, l'alarme pourrait (même si ça n'a pas été implémenté dans le cadre du projet) bénéficier d'informations contextuelles collectées au domicile par la box domotique et aider l'opérateur dans sa décision. Ce dernier point implique une gestion fine des questions de vie privée.

Enfin, une troisième gamme de services vient à être proposée autour de questions de prévention. En utilisant les dispositifs techniques déjà en place (domotique, alarme), des stratégies et règles simples peuvent être implantées dans le système pour prévenir des situations indésirables.

On peut ainsi penser au scénario courant d'automatisation d'un balisage lumineux lors des déplacements nocturnes, par exemple vers les toilettes, lorsque le système détecte que l'utilisateur se lève du lit. D'autres points de vigilance classiques peuvent concerner l'oubli d'un robinet, d'un appareil de cuisson, de fenêtres ou portes laissées ouvertes, etc. Mais ces automatismes doivent s'accompagner d'une grande vigilance quant aux a priori et aux modalités d'interaction avec l'utilisateur : il est primordial que ces règles de supervision de l'habitat aient son assentiment, voire qu'elles soient de son fait, que la fréquence des alarmes soit savamment dosée, et qu'elles puissent être modulées ou débrayable au coup par coup. Si les bénéfices supposés sont séduisants, il y a un réel risque de rejet. Une conception fine et spécifique des interfaces utilisateur est nécessaire pour obtenir son adhésion. D'ailleurs, il peut être judicieux ici de s'appuyer sur d'autres acteurs, tels que des personnes de l'entourage ou un médiateur pour aider à ces paramétrages. La clef ici de l'acceptabilité est le respect des choix utilisateur. À titre de comparaison, considérons un appareil classique : le réveil. Même si l'on apprécie peu d'être tiré de son sommeil, on a choisi d'utiliser ce réveil, on a programmé soi-même l'heure de l'alarme, parce que l'on voit un bénéfice à profiter d'une nuit sereine en sachant qu'on sera à l'heure le lendemain matin grâce à cet appareil.

Nos équipements domotiques peuvent aussi observer et mesurer. Ainsi, sans nécessairement ambitionner de déployer d'emblée des algorithmes d'analyse des activités de la vie quotidienne, le projet s'est proposé de mettre en place un service d'actimétrie. Un service d'actimétrie vise à évaluer un taux d'activité, de façon factuelle, sans chercher à pousser des analyses ou jugements de valeur. Sur la base des données des capteurs de mouvements, d'ouverture de placards, de commande des appareils électriques, il s'agit de comptabiliser le temps et l'intensité des activités perçue dans chaque pièce, et d'offrir à l'utilisateur un écran lui montrant ces résultats. Libre à lui de consulter cet écran ou pas, et de construire lui-même son opinion et analyse, s'il se juge très actif, trop sédentaire, casanier, plus ou moins que la dernière fois, etc. Vient naturellement la question du respect de la vie privée. La question est moins celle de la collecte des données personnelles que celle du traitement et du partage qui en est fait. Il est important de pouvoir montrer à l'utilisateur ce que le système sait de lui, de manière sincère et véritable. Il est important de pouvoir clarifier à l'utilisateur si ces données sont stockées et traitées localement, ou si elles peuvent être exportées sur Internet et exposées à des tiers, et à qui. À titre de comparaison, considérons un autre appareil classique : le pèse-personne. Cet appareil collecte des données personnelles à caractère médical. Certains appareils modernes se proposent même d'historiser ces valeurs, ou d'évaluer le traditionnel indice de masse corporelle. Si cet appareil ne suscite pas de rejet en lui-même, c'est que l'utilisateur reste libre d'interpréter lui-même ces chiffres et d'en tirer ses propres conclusions et décisions.

Ces scénarios illustrent le potentiel des systèmes ambiants pour apporter une aide à l'autonomie de personnes fragiles. Les technologies sous-jacentes sont déjà disponibles et accessibles. Dans le cadre du projet nous utilisons des équipements grand public (domotique, alarme, téléassistance), une box domotique développée spécifiquement et basée sur le middleware OSGi, et des interfaces sur la télévision via la set-top-box développée pour les services relationnels (cf. chapitre 1) ; l'interconnexion entre ces deux box s'opérant grâce aux protocoles xAP et HTTP.

Le système a fait l'objet d'un déploiement au domicile de deux personnes pendant six mois. Cette expérimentation a permis d'ajuster le système, les interfaces, et de faire progresser son niveau de maturité technologique, c'est-à-dire de le sortir du laboratoire pour pouvoir le laisser entre les mains d'utilisateurs sur du long terme. Les expérimentateurs ont été choisis pour présenter des profils sociologiques variés, des personnes relevant d'un certain âge, mais sans présenter pour autant des marqueurs de fragilité prononcés, ceci pour se conformer au cadre d'expérimentation

offert par les pouvoirs publics qui nous accompagnent. Pour éviter tout malentendu, il convient de clarifier la question de recherche et les objectifs visés par cette modalité d'évaluation. L'ambition de cette expérimentation n'était donc pas de quantifier un impact ou un bénéfice sur une population, mais de valider la solidité de la proposition de manière qualitative, tant des services relationnels décrits au chapitre 1 que des services de domotique et d'actimétrie présentés ici. Ainsi, il en ressort que les services domotiques sont bien appréhendés par les usagers et globalement appréciés (notamment le pilotage des volets). Pour sa part, le service d'actimétrie suscite une curiosité prudente (nos expérimentateurs ne se sentent pas eux-mêmes comme concernés à court ou moyen terme par des questions de fragilité). On aurait pu craindre des formes de rejet ou de perception négative, ce qui n'a pas été constaté, ce qui nous conforte donc dans l'idée que de telles approches peuvent s'inscrire dans évolutions du rapport des usagers à ces nouveaux dispositifs d'aide.

3.1.2 Autoengagement et recommandations

Une première gamme de prestations explorée par les projets précédents apporte confort et certains indicateurs actimétriques. Mais suivant la nature de ses fragilités (maladies chroniques, handicap, pertes d'autonomie), ou de ses préoccupations (réduire des facteurs de risques), l'utilisateur peut souhaiter s'engager dans une forme de prévention active, et être épaulé par des solutions techniques pour l'accompagner dans ses efforts.

Le projet PRECIOUS 5.3.6 s'inscrit dans ce contexte. Il s'agit de développer un système pour promouvoir des modes de vie sains. Ce consortium de partenaires européens académiques et industriels fédère des compétences multiples. Des capteurs discrets observent des indicateurs de santé de l'utilisateur (alimentation, sommeil, activité physique), ainsi que des paramètres environnementaux du cadre de vie. Des profils individuels sont projetés sur des modèles virtuels pour déduire les risques pour la santé et suggérer des changements de comportement. Des techniques de motivation basée sur les approches de jeux sérieux activent un ensemble d'outils de retour d'information et d'incitations pour guider l'utilisateur vers les objectifs qu'il s'est choisis.

Une place importante est donnée à l'utilisateur. L'un des principaux défis est de motiver l'utilisateur, et de le garder motivé sur la durée. La nature humaine penche vers des bénéfices à court terme plutôt qu'à long terme : un facteur de risque n'est pas la pathologie, prévenir des comportements à risques hypothétiques est moins motivant que guérir la maladie lorsque l'on est face à elle. Mais justement, les techniques de jeu sérieux jouent sur ce trait de caractère en mettant le focus sur des petits défis atteignables à court terme, et qui s'inscrivent dans l'objectif global. Une autre ambition est de repérer les signaux faibles et la détection de signes précoces avant que des pathologies n'entament la qualité de vie. Il faut donc des données, des modèles utilisateur, et des modèles de risque.

Le projet PRECIOUS s'appuie sur des études de l'OMS et a choisi de se focaliser sur les facteurs de risques identifiés pour deux maladies chroniques : le diabète de type 2, et les maladies cardio-vasculaires. Il ne s'agit pas de prétendre se substituer à la médecine, mais au contraire d'exploiter les études pour viser des facteurs de risques dans les habitudes de vie qui sont atteignables par nos systèmes ambiants.

Dans ce contexte, nos contributions ont porté sur l'infrastructure de capteurs et d'actionneurs au domicile. La question de l'interopérabilité entre les différents produits est un verrou technologique maintenant bien identifié. Cette question se retrouve dans le domaine de la domotique, des objets connectés et de systèmes ambiants en général. Sur ce point précis, nous proposons la solution xAAL, détaillée section 3.2. La stratégie consiste à s'appuyer sur cette infrastructure domotique permettant d'interconnecter les dispositifs déjà présents au domicile, et de la compléter avec de nouveaux dispositifs nécessaires à la réalisation des services et pres-

tations identifiés pour le projet. L'argument mettant en lumière l'intérêt de l'interopérabilité est bien celui de la facilité d'ajouter des équipements complémentaires. Dès lors que l'utilisateur dispose déjà d'une installation domotique, et que celle-ci respecte le principe de cette interopérabilité ouverte, il suffit de proposer à l'utilisateur les quelques équipements nécessaires au déploiement d'un nouveau service. En l'absence d'interopérabilité, des doublons pourraient s'imposer. C'est donc un facteur favorisant l'acceptabilité qui joue tant sur le coût, que sur l'étendue des transformations dans l'habitat, ou encore sur les principes de sobriété numérique.

Dans le cadre du projet nous avons identifié les équipements suivants : un pèse-personne (un produit du marché, Oregon GR101), une station multicateurs mesurant la qualité de l'environnement intérieur (température, humidité, poussière, CO², niveau sonore, niveau de luminosité, que nous avons développée autour d'une solution GrovePI), et un capteur de présence (développé sur la base d'une matrice de capteurs infrarouges FLIR1, plus précis que les capteurs de mouvement, et moins intrusifs que des caméras). Puisque le service implique un retour d'information et des recommandations à l'utilisateur, nous avons également prévu des actionneurs pour cela dans l'environnement. Le libellé précis des recommandations est accessible sur l'application fournie à l'utilisateur. Cependant, il est intéressant de prévoir un mécanisme de notification basé sur les objets connectés du domicile eux-mêmes, puisque le service porte justement sur la qualité de l'environnement au sein du domicile. Pour ce faire, nous proposons diverses options : des notifications sur la télévision, sur l'ordinateur de l'utilisateur, des messages vocaux, des effets avec les lumières de l'habitat, un simple vibreur.

Le domicile est équipé de capteurs pour relever certains paramètres indispensables au service, et des actionneurs pour notifier l'utilisateur de points de vigilance ou recommandations. Mais la prise de décision pour ces notifications peut nécessiter de croiser d'autres informations, telles que des activités hors domicile de l'utilisateur et relevées par d'autres dispositifs, ou des informations plus générales (e.g. alertes météo, alertes pollution). Aussi, dans le cadre du projet il a été choisi une solution avec un serveur externe. Pour faire le lien entre l'infrastructure domotique et ce serveur externe, nous avons développé une passerelle (protocole xAAL pour la domotique, protocole MQTT pour le serveur). Cette passerelle est un équipement, une box, installée au domicile. Elle est à la main de l'utilisateur. Il dispose de moyens pour paramétrer ses propres choix : quelles sont les données de la maison exportées sur le serveur, et lorsque le serveur a des notifications transmettre, sous quelles formes elles seront transmises dans le domicile. Cette architecture apporte de réelles garanties à l'utilisateur sur le respect de sa vie privée, contrairement à d'autres architectures où ce sont finalement les serveurs qui ont le contrôle direct sur la maison, en continuant à espérer qu'ils n'en fassent rien de regrettable.

Nos solutions ont fait l'objet de prototypages et d'expérimentations auprès d'un panel d'utilisateurs [38, 40]. Il s'agit de procéder dans un premier temps à la validation fonctionnelle, mais aussi d'ajuster les interfaces utilisateur, et de questionner sur l'acceptabilité du dispositif. Les expérimentateurs sont invités à manipuler le dispositif installé au sein de notre living'lab pour en apprécier le fonctionnement, imaginer comment cela pourrait se transposer dans leur propre habitat, et exprimer leur ressenti, voir formuler des préconisations. Sont ainsi questionnées l'utilité et la facilité d'utilisation perçues pour chacun des capteurs et actionneurs, ainsi que leur localisation préférentielle dans la maison. Il en ressort que les capteurs pour mesurer le confort de l'environnement sont globalement bien évalués (température humidité poussière CO₂ bruit, mais le capteur de luminosité et jugé moins intéressant). Le pèse-personne est également apprécié. D'une manière générale, les objets connectés sont perçus comme plus intéressants que leurs équivalents traditionnels. Les pièces de vies (salon, chambre, cuisine) sont à privilégier. Les notifications sur smartphone sont préférées, mais aussi sur télévision ou ordinateur ; celles sur les luminaires, haut-parleurs, tablettes ou montres connectées sont jugées moins intéressantes. Cependant, il est jugé indispensable de pouvoir paramétrer ses propres choix.

La question de l'interopérabilité est présente également dans le domaine de la santé et des capteurs physiologiques. On peut ainsi mentionner les travaux de la Personal Connected Health Alliance (anciennement Continua Health Alliance) qui regroupe une communauté d'acteurs de la santé personnelle (entreprises de dispositifs de santé, opérateurs de téléphonie mobile, entreprises informatiques, organismes de réglementation de la santé, etc.) [202]. Il s'agit d'une part de sélectionner un sous-ensemble de solutions technique (USB, Bluetooth Low Energy, ZigBee) et de spécifier pour ceux-ci des formats d'échange de données standardisés. Dans un second temps, il s'agit de proposer une unification des données a posteriori, après collecte, avec des formats d'échange pour une mise à disposition auprès des différents acteurs, dans une démarche de continuité des soins entre l'hôpital et le domicile. Il se trouve que le domaine de la santé connectée, contrairement aux objets connectés en général, a l'avantage d'avoir un périmètre bien défini, basé sur des modèles de données établies de longue date, avec peu de variabilité ou nouveauté, et des critères d'analyses de ces données précis. Pour autant, même si ces stratégies pour les capteurs physiologiques sont difficilement transposables à d'autres domaines, ce travail de spécification mérite d'être utilisé et intégré à nos plates-formes.

Dans le domaine des capteurs physiologiques, il convient cependant de distinguer ceux qui ont une vocation médicale et utilisés dans des protocoles de soin, et ceux qui ont vocation à être utilisés par le grand public, pour du bien-être ou du sport loisir. Les premiers sont réputés fiables mais complexes à utiliser, les seconds sont plus accessibles, plus faciles à utiliser, mais possiblement moins précis. Le projet s'est ainsi intéressé aux appareils proposant des mesures du rythme cardiaque, avec plusieurs objectifs : évaluation de l'activité physique quotidienne, du stress, de la qualité du sommeil. On peut ainsi mentionner des équipements présentant une qualité effective croissante : montre-bracelet (e.g. PulseOn), ceinture pectorale (e.g. Suunto Ambit3), électrodes portatives (e.g. Firstbeat Bodyguard2). La question complémentaire à celle de l'efficacité objective est celle de l'acceptabilité de cette technologie par l'utilisateur, c'est-à-dire l'équilibre entre efficacité perçue et facilité d'utilisation perçue. Cette question a fait l'objet d'expérimentation auprès d'une cohorte d'utilisateurs testant ces dispositifs pendant plusieurs jours et exprimant leur ressenti [155]. (La ceinture pectorale semblait présenter le meilleur compromis.) Le degré de maturité technologique des dispositifs proposés impacte de façon importante sur cette question de l'acceptabilité. C'est un axe de travail à considérer pleinement.

3.1.3 De l'accompagnement au mentorat

La gamme des prestations à l'étude monte graduellement en sophistication pour aborder des services plus individualisés et ambitionnant possiblement plus d'engagement et d'impact. Ainsi, le projet e-VITA 5.3.12 se propose de développer un coach virtuel pour aider les personnes âgées à gérer leur propre santé [46, 53, 56-58, 60]. On parle alors de vieillissement actif. Cela inclut différents domaines tels que la cognition, l'activité physique, la mobilité, l'humeur, l'interaction sociale, les loisirs, et la spiritualité.

La plate-forme inclut : des capteurs, la collecte de données pour fournir des recommandations, un agent conversationnel, un dispositif physique incarnant cet agent conversationnel.

Des capteurs physiologiques, souvent portés par l'utilisateur, permettent d'apprécier la santé globale de l'utilisateur et son éventuelle évolution au cours du temps et des activités. Ces capteurs peuvent être utilisés sur la journée (p.ex. la bague Oura Ring qui mesure des paramètres physiologiques comme peuvent le faire des montres connectées, mais peut être avec une meilleure précision en étant plus près de la peau). D'autres capteurs physiologiques peuvent être portés pour des activités plus ponctuelles (p.ex. le bandeau NEU XB-01 qui se propose de mesurer l'activité cérébrale, le stress, l'activité cognitive lors de tâches précises). Des capteurs plus spécialisés s'intéressent plus particulièrement à la qualité du sommeil (p.ex. l'oreiller uSkin Pillow qui permet de mesurer les mouvements de la tête au cours de la nuit).

Des capteurs dans l'habitat permettent d'évaluer le niveau de confort et la qualité de l'environnement intérieur (p.ex. la station Netatmo dotée de capteurs de température, humidité, CO₂, niveau sonore). Des capteurs domotiques permettent d'évaluer les usages et l'activité de la personne à la maison (p.ex. capteurs de mouvements Delta Dore, capteurs d'ouverture sur les portes des pièces et placards). Des capteurs expérimentaux sont à l'étude, par exemple pour la détection et localisation multirésidents (à base de tags BLE) [189].

Outre ces capteurs, au contact des usagers sont proposés des dispositifs incarnant le système de dialogue et de coaching. Par la voix, mais aussi par des gestes ou des mimiques (suivant la nature de l'équipement), il s'agit de susciter l'engagement de l'utilisateur à qui sont adressés des conseils. Réciproquement, microphones et caméras permettent d'évaluer, dans une certaine mesure, l'état émotionnel de l'utilisateur lorsqu'il dialogue avec l'agent conversationnel, fournissant ainsi une source complémentaire de données. Sont expérimentés : un robot humanoïde Nao, un personnage virtuel holographique Gatebox GTBX-100, un robot humanoïde Android-AIST à l'apparence humaine réaliste [169], des compagnons robotiques CelesTE et DarumaTO dédiés au domaine de la spiritualité et figurant soit un ange catholique soit une poupée traditionnelle japonaise bouddhiste [170, 180].

Enfin, une application mobile pour smartphone et tablette propose des services dans le domaine du coaching pour des activités physiques, ainsi que dans le domaine des réseaux sociaux pour favoriser l'émulation et la motivation. En même temps, l'application utilise les fonctions internes de localisation ainsi que les gyroscopes pour évaluer la mobilité et l'activité physique (p.ex. compter les pas), apportant également des données supplémentaires au système.

Ces équipements utilisateurs sont en lien avec une plate-forme qui collecte les données, les traite pour générer un profil des utilisateurs, et produire des recommandations personnalisées. La plate-forme s'appuie sur la solution développée par le consortium européen FIWARE [199], une architecture à microservices, proposant notamment des modèles de données unifiés et standardisés, et un écosystème venant avec des implémentations open source. Un des composants clef est le Digital Enabler [201], permettant la collecte, l'authentification, l'intégration, l'harmonisation et l'interopérabilité de données multidomaines. Les données sont combinées, fusionnées, pour inférer des déductions sur les utilisateurs dans leur environnement, par exemple, les postures, la localisation dans la maison et les états physiologiques des utilisateurs. Dans le cadre du projet e-VITA, nos contributions portent plus spécifiquement sur la fusion de données multimodales, de l'architecture de la plate-forme de collecte et de traitements, et des traitements eux-mêmes 6.8. Après ces traitements, ces informations contextuelles peuvent alors être stockées dans des graphes de connaissances [190, 191] et exploitées par le système interactif de coaching vocal (basé sur la solution Rasa [196]) ; le concept de graphe de connaissances renvoie à une approche permettant d'intégrer des informations dans une ontologie et d'appliquer des traitements (un raisonnement) pour dériver de nouvelles connaissances.

Un premier travail de revue de la littérature par les membres du consortium a permis d'identifier les domaines à adresser concernant les fonctions physiques, la cognition, l'état émotionnel, la nutrition. Une analyse des besoins après des personnes âgées et des parties prenantes (famille, voisins, médecins) a été menée au sein des différents pays impliqués dans le consortium (Allemagne, France, Italie, Japon), sur la base d'interviews classiques ainsi que par des techniques de "design fiction" (un exercice de pensée, des méthodes de conceptions spéculatives, visant à concrétiser des signaux faibles autour d'une innovation, en faisant travailler les différentes implications possibles). Cette étude fait apparaître des différences culturelles, mais aussi la grande variabilité individuelle, et donc le besoin de personnalisation et de modularité de la solution. Les traits saillants communs font ressortir l'importance de la socialisation, des relations interpersonnelles pour l'accompagnement et les activités, les objectifs concernant l'autonomie, mais aussi les encouragements et la responsabilisation des usagers plutôt que des conseils paterna-

listes, mais aussi des préoccupations concernant la transparence pour la gestion des données et des aspects légaux.

Enfin, la solution proposée fait l'objet d'évaluation au cours du projet, au moyen d'expérimentations de manière itérative et incrémentale, dans les living'lab des différents partenaires.

3.1.4 Un bouquet de services ambiants axé sur l'autonomie active

Les dispositifs ambiants déployés dans le domicile de la personne permettent d'apporter une réponse au besoin d'autonomie. Les études sur l'analyse des besoins ainsi que sur les usages montrent que cela répond à des attentes réelles. La gamme des services proposée est graduelle : automatisation, actimétrie, recommandations, coaching. Dit autrement, cette graduation va de l'autonomie de l'utilisateur vis-à-vis des objets de son quotidien, à l'autonomie concernant la reprise en main de ses habitudes et comportements qui peuvent impacter sa qualité de vie. C'est pourquoi il est important de mettre en avant la dimension proactive, l'autodétermination, l'espace de choix qui est laissé à l'utilisateur.

En effet, il convient d'être vigilant dans la définition et la mise en œuvre des services que l'on déploie pour éviter certains risques de glissement vers une situation où l'utilisateur se trouve placé sous cloche ; sous prétexte de sa fragilité, les capteurs ne seraient déployés que pour surveiller (condition physiologique, comportements, accidents, etc.) ; la personne fragile reste à son domicile, en autonomie, parce que l'on (des personnes qui savent) s'est assuré qu'il n'y aurait pas de conséquences délétères pour elle. Cette démarche, parfois paternaliste, semble peu pertinente ni même robuste. Au contraire, si l'on parle d'apporter ou de restaurer l'autonomie de la personne fragile, cela doit s'accompagner d'une démarche active de la personne elle-même. C'est elle qui se connaît le mieux, qui connaît le mieux ses besoins, ses envies, ses habitudes, et qui est là pour faire les choses à chaque instant. Aussi bienveillants soient-ils, les aidants naturels et médecins, bien qu'indispensables à l'écosystème, restent en seconde ligne. L'expression *empowerment* traduit ce principe : les solutions déployées ne sont qu'un outil redonnant du pouvoir à la personne pour qu'elle accède à son autonomie. La gamme de services proposée est graduelle, et ce principe se décline à chaque niveau. L'automatisation du domicile implique que les scripts et scénarios domotiques soient choisis et définis avec l'utilisateur. L'actimétrie relève des mesures, mais les présente avant tout à l'utilisateur qui en décide par lui-même de ce qu'il en fait. Les systèmes de recommandations ou de coaching traitent des sujets choisis par l'utilisateur, avec des modalités et des niveaux d'implication choisis par l'utilisateur. L'utilisateur est au centre de la technologie.

3.2 Systèmes ambiants interopérables, l'approche xAAL

Les technologies d'assistance et d'aide à l'autonomie utilisent des produits et services numériques pour que les personnes fragiles puissent vivre à leur domicile de manière active, indépendante, en sécurité, en bonne santé physique et morale. Un ensemble d'équipements, de capteurs et d'actionneurs connectés devraient permettre l'émergence de nouveaux services. En pratique, il faut faire face à la question de l'interopérabilité entre les équipements. Chaque fabricant (ou, parfois, consortium de fabricants) vient avec sa propre technologie, qui est, sans surprises, non compatible avec les concurrents. La contrepartie est qu'une telle stratégie réfrène les consommateurs pour franchir le pas librement vers ces produits, ou qu'ils se retrouvent enfermés dans le marché ou la technologie du vendeur des équipements qu'ils ont déjà acquis.

Dans [149], les auteurs dressent un panorama des systèmes et plates-formes AAL. Ils constatent que la plupart des systèmes se limitent à un ensemble restreint de fonctionnali-

tés, que les normes et technologies sont utilisées de manière partielle ou isolée. Ils pointent un manque d'interopérabilité entre les technologies. Les auteurs de [183] ont proposé un état de l'art en considérant les modèles et architectures de référence. Ils ont remarqué que l'interopérabilité est désormais prise en compte, mais partiellement. Ceci est probablement dû au fait que les systèmes décrits sont généralement orientés vers la recherche, avec des préoccupations spécifiques. Mais selon les auteurs, il est encore nécessaire d'améliorer et de consolider les futures conceptions des modèles et architectures AAL.

Dans le projet SIGAAL, nous nous étions déjà confrontés à cette question de l'interopérabilité entre équipements à déployer. Nous avons alors initié des travaux en parallèle, pour donner naissance à la solution xAAL [36, 37, 41]. La solution s'est développée hors projets contractuels, mais a bénéficié à nos projets PRECIOUS et e-VITA.

Notre solution propose une architecture qui organise les services en composants fonctionnels le long d'un bus de communication. Un protocole de communication de type passage de messages est défini, ainsi que des interfaces entre composants. Ainsi, xAAL est une solution pour l'interopérabilité de la domotique. En termes simples, il permet à un équipement du fournisseur A (par exemple, un interrupteur) de parler à un équipement du fournisseur B (par exemple, une lampe). Les utilisations avancées incluent le bien-être [38, 40] ou la robotique d'assistance [39, 63]. Une configuration domotique simple peut être améliorée avec peu d'efforts pour obtenir une configuration avancée.

La spécification xAAL définit : (i) une architecture fonctionnelle distribuée ; (ii) un moyen de décrire et de découvrir l'interface et le comportement attendu des nœuds participants au moyen de ce que l'on appelle des schémas ; et (iii) une couche de communication sécurisée via un bus IP (multicast). Autre point, il s'agit d'un système distribué basé sur le principe du "best effort", adapté à des équipements contraints en capacité comme le sont généralement les capteurs et actionneurs domotiques. Chaque composant fait de son mieux en fonction de sa capacité pour que les choses se passent bien, c.-à-d. une obligation de moyen mais sans obligation de résultat. La spécification xAAL n'impose pas aux composants de fournir des garanties, et inversement chacun doit pouvoir faire avec ce que les autres peuvent fournir. Il est à noter que, au final, ce principe rend le système globalement résilient.

À des fins de test, la proposition a été mise en œuvre dans différents langages de programmation (principalement en Python et C, même si des piles en Java et Go existent mais ne sont plus activement maintenues) [204]. Les expériences à long terme nous ont amenés à faire évoluer xAAL. La version 0.4 et les versions antérieures ont introduit la définition générale de l'architecture distribuée, les rôles des principaux composants fonctionnels, et les principes de communication par messages texte sur un bus IP multicast. La version 0.5 a apporté la sécurité avec le chiffrement des messages. La version 0.6 a été une première tentative d'optimisation des communications en passant des messages texte aux messages binaires, sans autre changement. La version 0.7, présentée ici, est la dernière version, et propose plusieurs améliorations concernant l'architecture, les formats de messages et les schémas utilisés pour décrire formellement les équipements. Elle est considérée comme la dernière version stable, disponible sur étagère.

3.2.1 L'architecture de xAAL

Le système xAAL vise à répondre aux utilisations et aux besoins typiques des systèmes domotiques. Nous nous fixons les objectifs suivants :

- Le système doit être robuste : la défaillance d'un équipement ne doit pas empêcher les autres de faire leur travail.
- Le système doit être léger, même en termes de communication. Il doit utiliser les réseaux de communication existants à la maison, en impactant le moins possible la bande passante.

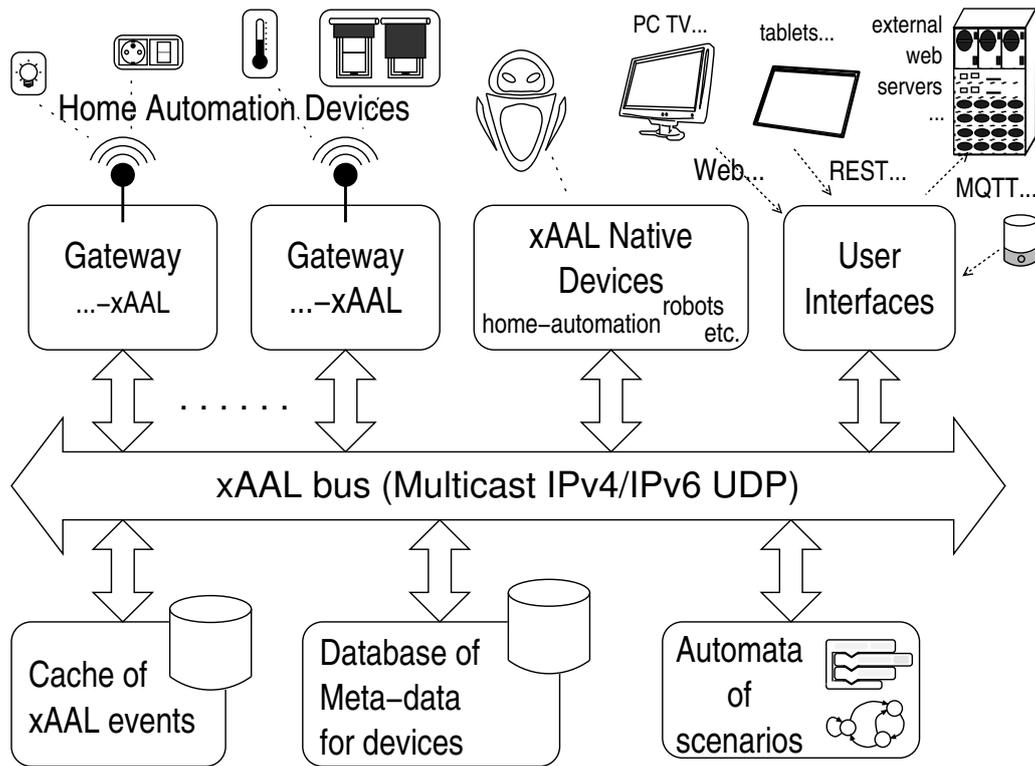


FIGURE 3.1 – Architecture fonctionnelle de xAAL

- Le système doit être flexible : l’ajout ou la suppression d’un équipement ne doit pas nécessiter de processus de configuration longs ou complexes pour le faire fonctionner ni perturber les autres équipements.
- Le système doit prendre en compte les considérations de sécurité et de vie privée.
- Enfin et surtout, le système doit gérer les questions d’interopérabilité.

Une architecture fonctionnelle distribuée

Les systèmes ambiants ont bien souvent une architecture centralisée. Typiquement, une “box” ou un service dans les nuages est chargé de gérer les équipements du domicile. Mais le panel des technologies supportées dépend des accords entre les fabricants et cet acteur central. Comme alternative, une architecture distribuée ouverte permet une gestion naturelle de l’interopérabilité.

Le système xAAL est composé d’entités fonctionnelles communiquant entre elles via un bus de messages sur IP. Chaque entité peut avoir plusieurs instances ou zéro, peut être partagée entre plusieurs boîtiers, et peut être physiquement située sur n’importe quel boîtier.

La figure 3.1 montre l’architecture fonctionnelle générale du système xAAL dans une installation domotique typique.

- Équipement natif
Certains équipements domotiques (capteurs, actionneurs) peuvent communiquer nativement à l’aide du protocole xAAL.
- Passerelles
En général, les équipements domotiques ne prennent en charge que leur propre protocole de protocole de communication propriétaire. Par conséquent, les *gateways* élémentaires ont la responsabilité de traduire les messages entre les protocoles des fabricants et le protocole xAAL.
- Base de métadonnées
Chaque équipement d’une installation est susceptible d’être associé à des éléments d’in-

formation définie par l'utilisateur. Classiquement, on y trouve des informations de localisation (p.ex. "lampe de la cuisine").

Toutes ces informations sont regroupées dans une *base de métadonnées*. Cette base de données contient en quelque sorte la configuration des équipements domotiques, du point de vue de l'utilisateur final.

— Cache

Les capteurs unidirectionnels sont assez courants : on ne peut pas les interroger, ils envoient leurs informations de manière sporadique (p.ex. un thermomètre qui n'envoie la température que si elle change).

Il devrait donc y avoir au moins un cache sur le bus xAAL qui stocke ces informations afin que d'autres entités puissent les interroger chaque fois que nécessaire.

— Automates de scénarios

Les scénarios sont des services domotiques avancés comme, par exemple, lancer toute une séquence d'actions à partir d'un clic de l'utilisateur, ou à des moments programmés, ou encore surveiller des séquences d'événements puis réagir, etc.

Pour ce faire, xAAL propose de les prendre en charge par une ou plusieurs entités du type automates de scénarios.

— Interfaces utilisateur

Une ou plusieurs interfaces peuvent être proposées aux utilisateurs.

Il peut s'agir d'un véritable équipement matériel avec un écran et des boutons, ou un microphone qui effectue une reconnaissance vocale. Cela peut être un logiciel qui génère des pages Web à utiliser par un navigateur sur un PC, une TV connectée, un smartphone. Ou encore, cela peut être un logiciel qui se connecte à un serveur externe dans le cloud pour des services tiers. Du point de vue du bus xAAL, ce sont des entités comme les autres équipements.

Canal de communication

L'architecture xAAL est basée sur les principes de communication *many-to-many*, concrètement un bus de communication. Tout composant peut envoyer des messages (p.ex. des données de capteur) à un autre, à plusieurs ou à tous les composants sans connexion préalable. Cela présente de nombreux avantages par rapport aux principes de communication client-serveur habituels. Les communications point à point sont évitées, ce qui économise les ressources mémoire de l'équipement. En effet, un composant domotique est généralement lié à de nombreux autres pour que les choses fonctionnent. Maintenir de nombreuses connexions permanentes en parallèle peut être extrêmement lourd pour les équipements contraints. Un bus apporte également des avantages fonctionnels. Cela permet la découverte : lorsqu'un nouveau composant apparaît dans l'installation, il s'annonce de lui-même. Toutes les autres entités peuvent alors en tenir compte. De même, lorsqu'un nouveau composant entre, il peut interroger le bus pour découvrir les autres composants déjà présents. Cela facilite grandement la configuration, permet la dynamique ainsi que les capacités d'évolution du système.

Pour ces raisons, le système xAAL a été conçu sur un *bus multicast IP*.

Messages multicast en WiFi Les faiblesses du WiFi sortent du cadre de l'étude domotique. Cependant, cela peut avoir un impact sur l'architecture xAAL. C'est pourquoi une discussion est la bienvenue.

Le WiFi (IEEE 802.11) est une technologie sans fil couramment utilisée pour les réseaux IP, également à domicile. Il est largement utilisé pour fournir un accès Internet aux équipements mobiles (smartphones, tablettes, ordinateurs portables, etc.). Il est également utilisé pour les

équipements non mobiles (TV connectée, consoles de jeux vidéo, caméras de vidéosurveillance IP, etc.) lorsque les utilisateurs sont réfractaires à l'installation de câbles Ethernet.

Malheureusement, les protocoles IEEE 802.11 souffrent de choix de conception concernant la gestion des paquets broadcast et multicast. Pour simplifier, il a été choisi de ne pas acquitter ces paquets au niveau radio, contrairement aux paquets unicast. En effet, éviter de gérer une liste de nœuds n'ayant pas acquitté de paquets simplifie grandement la mise en œuvre du protocole. Les paquets broadcast et multicast ne sont envoyés qu'une seule fois, et à un débit inférieur pour avoir une meilleure chance d'être reçus sans erreur.

Ce point a été étudié par la recherche dans les réseaux sans fil depuis les toutes premières années du WiFi. Plusieurs propositions ont été faites, en modifiant la couche MAC radio, en introduisant un coordinateur central, en remplaçant le multicast par l'unicast soit au niveau de la couche MAC soit au niveau de la couche application, etc. [89, 95, 106, 118]

Depuis plus de vingt ans, le groupe de travail Mboned IETF vise à faciliter le déploiement des technologies de multidiffusion pour Internet au sens large. Ce groupe de travail se penche également sur les enjeux de déploiement du multicast sur les réseaux WiFi [267]. Plusieurs solutions de contournement sont répertoriées, mais aucune n'est parfaite. La conclusion de cette étude est que "IEEE 802.1, 802.11 et 802.15 devraient être encouragés à revoir les problèmes de multidiffusion de la couche liaison".

Notons que la situation est similaire lors de la diffusion de paquets multicast sur des adaptateurs CPL HomePlug-AV [151, 152].

Est-ce grave ? Eh bien, cela dépend grandement de la qualité du point d'accès WiFi en cours d'utilisation. Selon nos tests informels en laboratoire avec un petit nombre d'AP différent, de nos jours les AP ne sont pas parfaits mais d'assez bonne qualité. De plus, probablement grâce à leur petite taille et leur émission sporadique, les messages xAAL ne sont pas vraiment affectés. Cependant, il n'y a aucune garantie formelle de la bonne transmission.

3.2.2 Schémas de description des équipements xAAL

Les équipements xAAL sont décrits par ce que l'on appelle des schémas. Les schémas sont des documents spécifiant les attributs, les notifications et les méthodes pour dialoguer avec les équipements domotiques.

Notons que l'idée de spécifier les équipements domotiques par des schémas s'inspire de l'approche UPnP [215]. Grâce à cela, les entités UPnP pourraient découvrir les équipements présents ou qui arrivent, des façons d'interagir avec eux, et éventuellement construire dynamiquement des interfaces utilisateur.

L'autre avantage d'une spécification formelle des équipements domotiques est pour la production de logiciels. Avoir une spécification d'API claire peut aider à construire automatiquement des squelettes de code. C'était le cas avec le XDR (External Data Representation) pour le RPC (Remote Procedure Call) de Sun depuis le milieu des années 1990. Maintenant, il y a un regain de cet intérêt avec OpenAPI et d'autres Langages de description d'API RESTful. La communauté domotique a les mêmes besoins.

Objectifs

- Les équipements xAAL doivent être spécifiés de manière claire pour que les autres sachent comment interagir avec eux, quels paramètres fournir, ce que l'on peut attendre en retour.
- Ces spécifications doivent décrire les équipements de manière générique et abstraite (par exemple, tous les thermomètres doivent avoir le même comportement, même si un fabricant ajoute de belles LED clignotantes, etc.).

- Ces spécifications devraient permettre aux extensions de décrire des équipements plus sophistiqués que ceux de base de la même classe d'équipements, sans casser le comportement de base, d'une manière rétrocompatible.
- Ces spécifications doivent suivre une syntaxe stricte pour être analysées par des logiciels procédant à traitements automatiques (par exemple, la construction de squelettes de logiciels ou la découverte automatique d'API).
- Le document de spécification doit être lisible par un humain (certes, avec quelques prérequis ou compétences en programmation).

Définition d'un équipement

Un équipement a un *type* et une *address*. Le nom du type est l'identifiant du schéma décrivant l'équipement. Ce nom de type est codé en dur dans l'équipement. Cet identifiant de schéma indique une classe d'équipement et une variante dans la classe (p.ex. dans la classe lampe, on peut avoir une lampe on-off, une lampe avec gradateur, une lampe RGB).

L'adresse est l'identifiant l'équipement, unique sur le bus. Cet identifiant est un UUID [237], un nombre de 128 bits. Les adresses sont auto-attribuées. Par exemple, elles peuvent être codées en dur en usine. Ou bien, elles peuvent être générées automatiquement (aléatoirement) au moment de l'installation. (Cependant, il est recommandé que cette adresse reste persistante, sauvegardée si possible pendant les coupures de courant.)

Par contre, il n'y a aucun service de nommage nulle part. Un équipement ne demande à aucune entité pour obtenir son adresse. Il n'y a pas superviseur/coordonateur de bus d'aucune sorte pour assigner des adresses ou autre. Nous définissons une architecture complètement distribuée.

3.2.3 La spécification du type d'un équipement sous forme de schéma

Chaque équipement est typé, c'est-à-dire décrit par un schéma.

Un schéma xAAL est un objet JSON avec une forme spécifique qui doit valider des règles CDDL (Concise Data Definition Language [263]) données par la spécification xAAL.

Le schéma fournit des éléments de sémantique pour un équipement et décrit ses capacités :

- Tout d'abord, une liste d'*attributs*, c.-à-d. les données qui caractérisent son fonctionnement en temps réel. (P.ex. la température pour un thermomètre, l'état d'un interrupteur, etc.). Si la valeur change, l'équipement génère spontanément une notification au bus.
- Ensuite, une liste des *méthodes* possibles à invoquer sur cet équipement (mécanisme de requête-réponse), pour l'interroger sur son état, agir sur son comportement, etc. Ces méthodes peuvent prendre des paramètres en entrée, et fournir des données en retour. Ceci est spécifié par le schéma.
- Enfin, une liste des *notifications* qu'il émet spontanément, éventuellement en incluant des données.
- Et en parallèle de ceci, le schéma spécifie *modèle des données* utilisées. Tous les attributs et paramètres manipulés par le schéma doivent être également décrits formellement. Le type de chaque donnée est décrit par une règle CDDL. Il convient également de préciser une unité, et autant que possible une unité standardisée (possiblement l'une du registre IANA Sensor Measurement Lists (SenML) [184], ou bien du Bureau International de Poids et Mesures).

Héritage entre schémas

Pour déclarer qu'un équipement apporte des fonctionnalités complémentaires à un type d'équipements préexistant, cela passe par une notion d'héritage entre les schémas. Ainsi, un schéma peut étendre un schéma existant. Nous définissons les trois premiers niveaux de cette généalogie xAAL :

1. Un schéma générique de base commun à tous les équipements existants, spécifiant les fonctionnalités minimales que chacun doit implémenter.
Principalement, ce schéma de base déclare qu'il existe une notification émise chaque fois que la valeur d'un attribut a changé (**attributes_change**), ainsi qu'une notification émise au démarrage de l'équipement puis régulièrement par la suite (**is_alive**).
De plus, sont déclarées une méthode permettant d'interroger un équipement sur la valeur de ses attributs (**get_attributes**), une méthode permettant de savoir si l'équipement est toujours actif et permettant un mécanisme de découverte (**is_alive**), ainsi qu'une méthode (**get_description**) permettant d'avoir des informations complémentaires sur l'équipement (constructeur, modèle, documentation, etc.).
Ce schéma de base déclare que ces notifications et méthodes existent, et qu'elles existent pour tout le monde. Les schémas suivants, qui héritent de ce schéma de base, seront amenés à les surcharger et les préciser.
2. Un schéma de base pour chaque classe (par exemple, **lamp.basic**, **thermometer.basic**, **switch.basic**).
Ces schémas de base héritent du schéma générique et l'étendent en définissant des fonctionnalités minimales partagées par toutes les variantes d'équipements de la classe correspondante (p.ex. les lampes peuvent essentiellement s'allumer / s'éteindre).
3. Des schémas avancés pour des équipements plus complexes, étendant le schéma de base de la classe correspondante, et définissant de nouvelles fonctionnalités (par exemple, les lampes s'allument / s'éteignent, mais certaines lampes plus sophistiquées sont à intensité variable, d'autres offrent un contrôle de la couleur).
4. Par la suite, les fabricants qui souhaitent proposer des équipements plus sophistiqués ou plus diversifiés ont la possibilité de définir leurs propres schémas, toujours par héritage des précédents.

3.2.4 Le protocole de communication xAAL

xAAL est un système distribué. Les entités participantes doivent communiquer entre elles. Le protocole de communication xAAL a été conçu avec les objectifs suivants à l'esprit :

- Le protocole de communication doit permettre la découverte automatique, permettant à une nouvelle entité de rejoindre le groupe et permettant aux autres entités de savoir qu'une nouvelle entité arrive.
- La pile protocolaire doit être simple et légère à mettre en œuvre dans des équipements contraints, sans état à garder en mémoire, sans avoir à maintenir actifs plusieurs canaux de communication en parallèle.
- La communication doit être légère en termes de taille et de nombre de messages, proche du bruit de fond d'un réseau domestique habituel.
- Le protocole doit assurer la sécurité et la confidentialité des utilisateurs.
- La communication doit être simple à configurer pour l'utilisateur final.

Aussi, les messages xAAL sont transportés par des paquets multicast UDP, et utilisent le format CBOR (Concise Binary Object Representation [253], un format de sérialisation de données similaire à Json mais binaire et plus compact). Les messages xAAL sont constitués

de deux couches : (i) une couche de sécurité avec des champs en clair obligatoires pour le transport vers les récepteurs, suivie d'une charge utile chiffrée ; et (ii) une couche applicative qui est en fait la charge utile déchiffrée et contenant toutes les informations pour les applications participantes.

La couche de sécurité est un tableau CBOR contenant : un numéro de version du protocole (0.7 en l'occurrence), un horodatage des messages (seconde et microsecondes depuis l'Epoch Unix, c.-à-d. 1^{er} janvier 1970), une liste d'adresses de destinations (éventuellement vide pour un message adressé à tous), et la charge utile applicative chiffrée et sous la forme d'une chaîne d'octets.

La couche applicative, une fois déchiffrée, est également un tableau CBOR et contenant : l'adresse source, le type de l'équipement source (nom du schéma), le type du message (notification, requête, ou réponse), le nom de la notification ou de la méthode invoquée, et optionnellement la liste (c.-à-d. un dictionnaire au sens CBOR) des paramètres et leur valeur associés à la notification ou méthode.

La sécurité du bus xAAL est assuré par une clé symétrique, pré-partagée dans tous les équipements participants. L'algorithme cryptographique Poly1305/Chacha20 a été choisi pour ses performances [256] et utilisé selon les recommandations de l'IETF [259] (c'est-à-dire avec un nonce 96 bits et une clé 256 bits). Comme nonce (numéro aussi unique que possible à chaque message), nous utilisons l'horodatage des messages. La liste des adresses de destinations est couverte par la signature cryptographique, mais est lisible en claire dans la couche de sécurité pour que chaque équipement xAAL puisse décider si le message le concerne ou pas avant de le déchiffrer.

L'horodatage des messages permet d'éviter les attaques par rejeu (technique consistant à injecter un message ancien que l'on ne sait pas forcément décoder mais dont on connaît les effets sur le système). Cependant, puisque les équipements domotiques peuvent difficilement être synchronisés entre eux de manière très précise, il convient de se définir une fenêtre d'acceptation. Nos expériences nous amènent à préconiser une fenêtre d'acceptation de l'ordre de deux minutes.

Évaluation quantitative du protocole xAAL

xAAL est déployé dans notre laboratoire. Au moment des tests, celui-ci comprend 121 équipements xAAL. On constate une moyenne de 4,82 messages par seconde, soit environ un message toutes les 25 secondes pour un équipement, et avec une moyenne de 128 octets, soit une bande passante moyenne de 5 octets par seconde pour un équipement.

Ainsi, nous considérons que xAAL consomme de faibles ressources sur le réseau IP du domicile.

Notons que certains paramétrages des équipements xAAL peuvent influencer le nombre de messages sur le bus (délai de réémission des notifications *alive*, le recours aux requêtes *get_description* souvent utilisées par les applications type IHM). Cependant, grâce aux principes de communication par bus, un message de réponse à une application est utilisé par d'autres applications. Avoir plusieurs applications sur le bus n'augmente pas tellement le nombre de messages.

Considérations de sécurité et confidentialité

Communications locales De par leur conception, les protocoles domotiques sur IP bénéficient de la sécurité offerte par le réseau domestique, qui est constitué de fils physiques ou de réseaux WiFi avec sécurité WPA. Il est donc au moins aussi difficile de prendre le contrôle d'une installation domotique depuis l'extérieur que de pouvoir se connecter au réseau domestique. Un protocole avec des messages en clair aurait pu convenir.

Cependant, les principales menaces ne viennent probablement pas de l'extérieur. De nos jours, les utilisateurs finaux (happy eye balls, RFC 8305) sont habitués à apporter à la maison

de nombreux équipements connectés, à installer de nombreuses applications prometteuses, mais incorporant parfois du code suspect. Si le protocole domotique ne possède pas de sécurité, une application malveillante pourrait en prendre le contrôle (par exemple, désactiver l'alarme, déverrouiller la porte pour les voleurs). Plus probablement, une telle application tierce pourrait espionner l'activité domotique, surveiller les habitudes et les préférences des utilisateurs pour alimenter les publicités et les systèmes de recommandation de sites marchands.

Une telle situation n'est pas souhaitable, ou alors, du moins, avec un avis éclairé de l'utilisateur final et son accord. C'est pourquoi un certain niveau de sécurité doit être ajouté aux systèmes domotiques. Les messages ne doivent pas être en clair, ni chiffrés avec une clé statique codée en dur ; les clés secrètes doivent différer d'un logement à l'autre ; les clés secrètes ne doivent pas être préconfigurées par les entreprises, mais choisies par l'utilisateur final.

Dans xAAL, les messages sont chiffrés à l'aide de l'algorithme Poly1305/Chacha20. Selon les experts, il est au moins aussi fort que d'autres (par exemple, AES). Il est maintenant dans les suites de chiffrement pour TLS [259]. Du fait de son principe de communication par bus, les équipements xAAL ne peuvent pas négocier les paramètres cryptographiques avant d'envoyer des données utiles, contrairement au principe de communication client-serveur (négociation préalable d'un algorithme de chiffrement, d'un nonce, de clés Diffie-Hellman, etc.). Les messages xAAL doivent être auto-suffisant, pas seulement pour les données applicatives, mais également en ce qui concerne les paramètres de sécurité. Aussi, xAAL utilise une clé symétrique pré-partagée. C'est le seul paramètre que l'utilisateur final doit configurer. Le nonce est un horodatage avec une petite fenêtre d'acceptation pour permettre les dérives d'horloge.

La sécurité proposée par xAAL est un compromis. Il convient de garder à l'esprit qu'un niveau de sécurité plus élevé briserait la simplicité et l'efficacité de xAAL. La sécurité proposée par xAAL est suffisamment élevée pour protéger les données transportées par les communications domotiques et répond aux exigences pour faire face aux menaces que le modèle considère.

Communication avec les nuages Dans le cadre de la domotique, les utilisateurs sont chez eux, et les services sont rendus chez eux par le domicile. On peut se demander où localiser et exécuter le service : à la maison, ou par des serveurs externes (autrement dit, dans les nuages). Le système xAAL, comme bien d'autres, propose de placer les services domotiques à domicile. Il s'agit d'une première étape pour résoudre les problèmes de sécurité et de confidentialité. Cependant, de nos jours, les consommateurs acceptent les solutions dans les nuages. Cela implique de faire confiance aux entreprises impliquées, de leur donner le contrôle de la maison, de leur donner une vision des activités menées par les personnes dans leur maison, de croire en leur éthique aujourd'hui comme demain. Accepter cela a un coût (éthique) pour le consommateur. La contrepartie est la promesse d'obtenir un service simple d'utilisation.

Terminaux mobiles et serveurs dans les nuages. La première promesse est celle de la simplicité. En règle générale, l'expression "équipement intelligent" doit être lue comme "équipement ayant accès à Internet et connecté aux serveurs du fabricant dans les nuages". Le consommateur achète et installe des équipements domotiques (prises intelligentes, prises intelligentes, lampes intelligentes, etc.). Ces équipements peuvent embarquer une interface réseau WiFi, ou être connectés via un protocole radio dédié à un hub/passerelle/box également présent à la maison, qui dispose d'une interface réseau WiFi et parfois Ethernet. Il existe une connexion permanente entre les équipements à la maison et les ordinateurs externes de l'entreprise : généralement, les équipements transmettent les mesures et les événements des capteurs en temps réel, et peuvent être contrôlés à distance à partir de ces ordinateurs externes. De son côté, le consommateur utilise une application mobile également connectée à ces ordinateurs externes du fabricant ou de ses partenaires. Par ce moyen, l'utilisateur est informé des événements à la maison et peut envoyer des commandes à ses équipements. Les fabricants proposent généralement

ces services gratuitement, ou gratuitement les premières années. Ce processus est conforme, aujourd'hui, à la conception habituelle des applications mobiles : les applications utilisateurs sont les *clients* de *serveurs cloud*. Ce processus est transparent pour l'utilisateur. De plus, l'utilisateur bénéficie du même niveau de service qu'il soit chez lui à proximité d'équipements, ou à l'extérieur. Le contrôle de la maison de l'extérieur par les membres de la famille est souvent présenté comme un avantage malgré l'absence de demandes claires des consommateurs.

Les applications mobiles sont rarement conçues pour atteindre les serveurs locaux. Aujourd'hui, peu de services aux utilisateurs finaux supposent qu'il existe des serveurs de quoi que ce soit à la maison ; tout est censé être dans les nuages. L'une des exceptions concerne les *media servers*, qui permet aux utilisateurs de stocker chez eux des photos, des vidéos et de la musique. Mais ces services sont désormais également concurrencés par les services cloud.

Ces media servers sont basés sur des protocoles tels que DLNA qui offre des fonctionnalités de découverte : les applications utilisateurs peuvent retrouver ces appareils sur le réseau local et les utiliser. On peut également évoquer le récent Home Networking Control Protocol (HNCP [258]) qui fournit un mécanisme de découverte générique pour les services locaux (imprimantes, routeurs, etc.). Le système xAAL dispose également d'une telle fonctionnalité de découverte qui peut être utilisée par une application xAAL native.

En fait, des solutions alternatives au cloud existent pour offrir un usage tout aussi simple.

Interopérabilité dans les nuages. Une autre promesse est l'interopérabilité dans les nuages. En effet, de nombreux éditeurs de domotique proposent d'interconnecter leur solution avec des assistants vocaux populaires (Google Home, Amazon Alexa, Apple Siri, etc.). Ces équipements appelés "assistants vocaux", "enceintes connectées", "enceintes intelligentes", mais rarement "microphones connectés", sont des services cloud : la reconnaissance vocale de ces géants d'Internet est disponible à leurs partenaires (des accords commerciaux). Ainsi, les ordinateurs cloud des assistants vocaux sont connectés aux ordinateurs cloud des vendeurs de domotique. Un tel microphone connecté enregistre les sons à la maison tout le temps ; lorsqu'un son correspond à un mot-clé donné, le flux sonore est poussé vers les ordinateurs de la société du microphone connecté ; la phrase est analysée par un processus de reconnaissance vocale ; et si des mots-clés associés à la domotique sont reconnus alors le texte est poussé vers les ordinateurs de la société de domotique ; ensuite, si certaines commandes domotiques sont reconnues alors ces ordinateurs envoient des commandes aux équipements de la maison auxquels ils sont connectés en permanence. En conséquence, l'utilisateur final peut faire part de ses demandes à sa maison et la voir en action, ce qui est très impressionnant. Ce genre d'interface universelle est en quelque sorte une sorte d'interopérabilité dans le cas où il existe plusieurs technologies domotiques chez soi. En fait, il n'y a pas de réelle interopération entre eux, juste une interface utilisateur unique. Pour l'instant, cela se fait dans le cloud, c'est pourquoi de telles solutions sont appelées "interopérabilité dans le cloud". En fait, cela pourrait également être effectué localement à la maison.

La reconnaissance de la parole est un processus complexe, et constitue une valeur ajoutée précieuse pour les entreprises qui le gèrent. Les solutions en ligne (cloud) semblent être de meilleure qualité que les solutions hors ligne (locales). Cependant, en fonction des besoins réels et du ressenti de l'utilisateur, les solutions locales suffisent généralement pour une interaction simple (reconnaître des mots-clés), comme cela peut être le cas des services domotiques.

De plus, il n'y a aucune preuve convaincante que les algorithmes de synthèse vocale exécutés de nos jours par des ordinateurs en nuage ne pourraient pas être exécutés par des équipements locaux. Les entreprises promettent des améliorations continues de leurs algorithmes secrets en collectant la voix et les phrases de leurs consommateurs dans le cloud, pas toujours de manière aussi automatique que cela [171], éventuellement avec des humains enrôlés dans des services de "digital labor" [154].

Ce processus d'interopérabilité dans les nuages atteint également ses limites lorsqu'il s'agit d'obtenir l'interopérabilité entre des solutions concurrentes. Par exemple, il n'existe aujourd'hui aucun moyen de faire interagir une box Alexa et un système Google Home. Il n'y a aucun signe d'effort dans ce sens, même si les deux solutions sont fonctionnellement très proches. Concrètement, il n'est pas possible de mettre en place un scénario mêlant des équipements appartenant à ces deux mondes. Le consommateur doit acheter des équipements en double, ou rester lié à un seul monde. (Le futur standard "Matter", encore expérimental, promet des équipements supportant l'un ou l'autre des deux mondes.) L'interopérabilité est repoussée dans les nuages, mais pas vraiment abordée.

En résumé, réaliser de la domotique "dans les nuages" pose de nombreux problèmes de sûreté, de sécurité, de performance et d'éthique, sans réellement apporter d'interopérabilité. Il n'y a pas de véritables obstacles techniques pour effectuer cela complètement localement, à la maison, sans aucune fuite d'informations dans les nuages ou à des tiers. xAAL est conçu avec cette idée à l'esprit.

3.2.5 Alternative Home Automation Protocols over IP

Le protocole de communication xAAL a été inspiré par UPnP, xAP, xPL et d'autres protocoles. Certaines solutions évoquées ici s'intéressent uniquement à l'aspect protocolaire, d'autres sont des solutions domotiques à part entière.

UPnP (Universal Plug and Play) apporte un modèle de conceptions rigoureux pour les communications d'équipement à équipement sur les réseaux domestiques. Les fonctions sont bien définies, les équipements sont formellement décrits par des schémas, le système permet la découverte, etc. Le principal reproche porte sur sa lourdeur : il est basé sur HTTP, SSDP, XML, SOAP, ZeroConf. Les nœuds participants ont souvent besoin de toutes ces couches, chaque action nécessite plusieurs connexions TCP.

De nos jours, l'UPnP reste utilisé pour les téléviseurs "intelligents" pour afficher les vidéos des serveurs multimédias domestiques, via le profil UPnP DLNA (Digital Living Network Alliance) [158]. Le profil UPnP domotique n'a jamais vraiment été utilisé dans les produits, sauf pour les démonstrations de preuve de concept.

xAP et xPL [210, 213] sont des protocoles domotiques pragmatiques ad hoc, textuels, sur du broadcast IPv4. (xPL est une variante de xAP.) Le mode d'adressage des équipements n'est pas très rigoureux, et finalement peu employé (en pratique, tous les messages sont adressés à tous les participants). Les équipements sont supposément décrits par des schémas, mais assez mouvants, et rarement respectés. Concrètement, il est assez difficile d'interopérer avec un équipement que l'on n'a pas codé soi-même. Bref, la principale critique tient à son côté ad hoc. Cependant, ces protocoles ont participé à fonder les bases des protocoles domotiques sur IP en termes d'expression des besoins et en termes de bases de solutions pour l'interopérabilité : systèmes distribués, communications équipement à équipement, schémas de définition des équipements, pile de communication légère.

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport [153]) est un protocole de communication par passage de messages, dédié aux échanges de machine à machine (M2M) : envoi de commandes à un ensemble de dispositifs, collecte de données de capteurs (p.ex. capteurs de pollution dans la ville), etc. C'est un système de communication basé sur une architecture en étoile autour d'un nœud central (et donc possiblement une source de fragilité).

MQTT est adapté à des communications à travers Internet, mais il a été proposé des variantes allégées (et ad hoc) pour de la domotique et utilisant le réseau IP domestique (à base de broadcast IPv4), tel que MQTT-UDP [206].

Il s'agit en fait uniquement de la définition d'un protocole d'échange, la définition fonctionnelle des équipements est implicite ou déportée aux domaines applicatifs. Dès lors, les questions d'interopérabilité ne sont pas couvertes : on peut se parler, mais on ne sait pas quoi se dire.

CoAP (Constrained Application Protocol [254]) est un protocole machines à machines adapté aux appareils contraints. C'est une architecture client-serveur et s'inspire des méthodes de communication HTTP, en format binaire. Il est basé sur UDP. La charge utile est à spécifier selon les domaines applicatifs. En cela, CoAP apparaît plus comme un protocole de transport que comme un protocole applicatif. Il aurait également pu être un bon candidat pour la domotique et pour le système xAAL. Malheureusement, son approche client-serveur ne correspond pas aux besoins de communication de groupe. Pour la domotique, une communication par bus, entièrement distribuée, est plus efficace qu'une communication client-serveur même si cela pourrait fonctionner. Un autre obstacle à l'utilisation de CoAP est la définition d'un mécanisme de sécurité pour les communications en groupe. CoAP utilise DTLS (TLS pour les datagrammes), qui nécessite une étape de négociation préalable avant l'envoi des données : pour s'accorder sur un algorithme de chiffrement, des clés de session, un nonce, etc. Ceci convient pour une communication client-serveur, mais pas pour une communication par bus : chacun poste ses messages sur le bus sans aucune connaissance préalable des autres. C'est pourquoi un protocole de communication dédié a été conçu au sein du système xAAL.

Aqara est une société de domotique de Lumi United Technology [205]. Les produits Aqara sont généralement vendus par Xiaomi.

Techniquement, les équipements Aqara sont connectés à un hub Aqara à la maison via le protocole radio Zigbee. Ce hub est une petite passerelle domotique avec une interface WiFi pour la connexion Internet, et qui est chargée de transmettre les messages des équipements domestiques vers et depuis les serveurs cloud d'Aqara, dans un protocole UDP non publié mais verbeux. Les services cloud permettent aux consommateurs de contrôler leurs équipements domestiques via une application mobile, de récupérer les événements des capteurs et de configurer des scripts d'automatisation. Certaines automatisations (par exemple, les alarmes) sont exécutées localement par le hub, d'autres processus plus complexes sont exécutés par des services cloud. La principale critique concerne les problèmes de confidentialité causés par des services cloud.

Certains modèles d'Aqara Hubs peuvent être configurés pour activer une interface locale en plus de la connexion au cloud. Cela permet aux applications utilisateur de contrôler directement les équipements domestiques, sans utiliser les services cloud. Cette communication locale utilise deux sockets UDP : multicast pour le mécanisme de découverte, et unicast pour du commande-contrôle. Ce mode de communication locale, manifestement assez bien conçu, n'est pas documenté, et semble-t-il assez changeant. La sécurité, bien qu'existante, a été parfois critiquée [193]. De plus, il n'y a aucune tentative d'organiser ou de formaliser des descriptions des équipements.

Il s'agit d'une solution de domotique sur IP de conception intéressante, mais fermée, spécifique à un industriel de grande taille. Les questions d'interopérabilité ne sont pas à l'ordre du jour.

Tuya est une solution d'IoT de type business-to-business L'entreprise ne vend pas de domotique en elle-même (ou très peu), mais fournit des services à d'autres entreprises pour que celles-ci proposent leurs propres équipements aux consommateurs. Tuya compte environ 75

grandes entreprises et environ 93 000 petites ou moyennes entreprises comme clients, plus de 200 pays, pour environ 90 000 produits compatibles [174, 203]. Tuya s’est imposé comme une solution technique pour les équipements IoT à faible coût.

Un très grand nombre de produits domotiques et IoT utilisent la technologie propriétaire de Tuya comme backend. Tout est ‘compatible Tuya’. Tuya se présente donc comme une solution d’interopérabilité. Mais il convient de s’interroger si une position industrielle dominante peut réellement être considérée comme une solution d’interopérabilité.

Le service fourni par Tuya est en trois parties. Le cœur de son service est une plateforme cloud : des équipements compatibles peuvent s’y connecter, envoyer des données et recevoir des commandes. La deuxième partie est une application mobile générique permettant aux consommateurs de prendre le contrôle de leur équipement via la plateforme Tuya, ainsi que des APIs permettant aux entreprises de développer leur variante d’application mobile avec leur logo. La troisième partie des services Tuya consiste à fournir des composants électroniques prêts à l’emploi pour être intégrés dans des produits tiers.

Là encore, le protocole de communication n’est pas documenté et visiblement assez changeant (visiblement du HTTP, HTTPS, MQTT, parfois avec du chiffrement AES-128 selon les versions) [178, 179]. Il n’y a pas de spécification formelle des équipements. Tuya contrôle l’ensemble de la chaîne (équipements électroniques, services cloud, applications utilisateur final) ; il n’est donc pas nécessaire de fournir des spécifications de quoi que ce soit. Tuya est largement déployé, mais souffre de problèmes de sûreté, de sécurité et de confidentialité.

Matter [172] est un standard de connectivité domotique porté par un consortium incluant Amazon, Apple, Google, Comcast, Huawei, Schneider, IKEA, et la ZigBee Alliance. Concrètement, il s’agit de s’accorder sur l’utilisation du protocole radio ZigBee pour être implanté dans les objets domotiques commercialisés par ces industriels. Des interfaces d’accès IP pour les applications mobiles et le cloud sont également uniformisées. Les services sont dits “sur IP” car ils sont réalisés dans les nuages. La spécification est couverte par des licences, mais le code de démonstration est proposé en open source. Il s’agit donc d’adresser la question de l’interopérabilité sous l’angle d’un standard industriel, et accessoirement de concurrencer Aquara et Tuya.

OpenHAB (Open Home Automation Bus [211]) est une solution logicielle open source populaire pour la domotique. Il ne s’agit pas d’un protocole réseau, mais d’un logiciel pour “box” domotique. C’est une solution centralisée. Plusieurs fonctions domotiques sont concentrées dans un seul logiciel : interface utilisateur, scénarios d’automatisation, passerelles protocolaires vers divers constructeurs ou technologies de matériel domotique. Pour résoudre les problèmes d’interopérabilité, ce logiciel prend en charge plusieurs protocoles domotiques propriétaires au moyen de modules complémentaires à ajouter dans l’application. Ils sont aujourd’hui essentiellement développés par la communauté open source, mais les entreprises domotiques sont invitées à développer des modules pour leurs propres équipements, et à s’intégrer (ou se faire absorber) au sein de cette box. Le logiciel est développé avec le langage Java, et utilise une architecture OSGi (Open Services Gateway initiative [212]), qui définit un bus logiciel entre modules. Cette solution open-source est parfois reprise par certains équipementiers domotique pour refaire leur propre interface utilisateur et y apposer leur logo.

Confluens [144] vise l’interopérabilité domotique. C’est à la fois une solution logicielle et un consortium créé par des sociétés de domotique : CDVI (systèmes de contrôle d’accès), Delta Dore (équipements de commande de chauffage), Hager, Legrand, Schneider-Electric (matériel électrique) et Somfy (automatisme de commande de volets). Techniquement, il s’agit d’un système de communication inter boxes. L’idée est qu’un consommateur peut avoir chez lui

plusieurs produits d'entreprises différentes, chacun géré par la box domotique de l'entreprise correspondante. Il peut y avoir plusieurs boxes dans la maison qui peuvent communiquer entre elles. La communication est basée sur un protocole MQTT local au réseau IP de la maison. Un mécanisme de découverte permet de rejoindre de nouvelles box et d'élire la box qui jouera le rôle de concentrateur MQTT. Les communications sont sécurisées par TLS. La société Confluens est l'autorité de certification, signe les certificats TLS et gère leur déploiement sur les box des partenaires.

Confluens est désormais un projet terminé. Aucun produit n'a été vendu avec cette technologie expérimentale, mais le code a été versé à la communauté open source [182].

Une box domotique est une solution centralisée. Confluens propose une approche multiboxes. Ceci est moins distribué que l'approche xAAL, mais c'est une première étape. Le protocole MQTT est un protocole machine à machine conçu pour l'Internet, et peut être lourd à utiliser à l'intérieur d'un réseau domestique. Le mécanisme de signature pyramidale des certificats de TLS ne peut permettre à des tiers d'entrer dans la boucle sans accord préalable entre entreprises. La sécurité est entre les mains des entreprises et non de celles des utilisateurs finaux. À l'inverse, xAAL permet aux utilisateurs de gérer leur confidentialité.

3.2.6 Bilan des études sur l'interopérabilité des systèmes ambiants

Les systèmes ambiants doivent pouvoir détecter, raisonner et agir sur leur environnement. Les solutions actuelles fonctionnent en silos, propres à chaque fabricant, ou consortium. Cette situation est avant tout le fait de choix industriels, avec un modèle de clients captifs, ou de position hégémonique. Les lignes bougent face à la demande des consommateurs. Mais ce qui tend à être proposé, c'est moins de l'interopérabilité technique qu'une unification au niveau des services et interfaces utilisateur. Une première conséquence est que des scénarios d'usage mixant des équipements d'horizons différents restent toujours très difficiles, permettant mal le déploiement de services d'assistance tel que nous l'envisageons dans nos projets. La seconde conséquence est l'impact sur le respect de la vie privée, liée au fait que les données de la maison et des usagers circulent entre serveurs de partenaires divers dans les nuages.

Au contraire, la solution xAAL s'intéresse à la question de l'interopérabilité des systèmes ambiants en choisissant une approche distribuée, ouverte, avec des communications chiffrées sur un bus. Les communications, les données, les services sont localisés au sein de la maison. Il n'est pas besoin d'avoir recours à des services externes dans les nuages. En cela, on peut qualifier xAAL d'une solution d'*intranet des objets*. Le système fournit un mécanisme de découverte pour intégrer dynamiquement de nouveaux équipements. La sémantique de chaque équipement est rigoureusement décrite du point de vue fonctionnel, et permet ainsi à d'autres d'interagir avec lui, indépendamment du fabricant. Un dialecte de spécification de ces schémas est donc fourni pour définir les équipements participants, avec les fonctions et les modèles de données associés. Un mécanisme d'héritage permet d'étendre ouvertement les schémas, et donc d'intégrer des équipements aux fonctionnalités plus sophistiquées. Le protocole de communication pivot proposé est compact, léger et chiffré pour résoudre les problèmes de sécurité et de confidentialité. Le projet vient avec des piles d'implémentation de référence open source, un ensemble de schémas pour les équipements typiques et des expériences dans le monde réel.

Outre l'interopérabilité, l'approche proposée offre un certain nombre de garanties pour le respect de la vie privée, principalement grâce au fait que les données et le contrôle des équipements ne sortent pas de la maison de l'utilisateur, contrairement aux solutions orientées cloud. Et dans le même temps, si l'utilisateur souhaite bénéficier de services cloud, l'interfaçage est réalisable simplement, et permet une étanchéité entre ce qui est externalisé et ce qui doit rester au sein de la maison. L'utilisateur garde le contrôle de ses objets connectés de ses données. Nous émettons là une critique forte à l'encontre des solutions cloud qui sont proposées au-

jourd'hui massivement : l'utilisateur a l'impression de contrôler sa maison, alors qu'en réalité il ne fait qu'envoyer des requêtes aux serveurs cloud qui eux contrôlent effectivement la maison. Les promoteurs du cloud mettent en avant certains bénéfices supposés : la capacité de stockage et traitement sur ces serveurs, et un accès en mobilité. Objectivement, ces arguments tiennent assez peu : certes les data-centers disposent de plus de ressources que les équipements de l'utilisateur (boxes, smartphones, etc.), mais cela doit être divisé par le nombre de clients et de services hébergés, avec un résultat assez peu en faveur du cloud face aux équipements personnels qui bénéficient de capacités remarquables. De plus, les équipements de l'utilisateur sont déjà là, et justement plutôt sous-utilisés. On devine que l'intérêt sous-jacent pour l'opérateur de services cloud est de justifier la facturation d'un abonnement à l'utilisateur, puisqu'il a la main sur ses données. Reste la question de l'accès aux services domotiques en mobilité. Nos expérimentations nous donnent à penser que l'envie de contrôler les équipements de la maison alors que l'on n'est pas à côté est un besoin très secondaire pour nos usagers. Et si le besoin se fait sentir, il est tout à fait possible d'offrir ce service sans recourir aux approches cloud, comme le montrent les études rapportées dans le chapitre 2.3. Il se trouve que le cloud a connu un certain essor au fil des ans et les technologies sont aujourd'hui bien maîtrisées par les développeurs, qui tendent alors à les placer pour répondre à tout type de services, par facilité, même lorsque cela n'est pas réellement indispensable ni même souhaitable. C'est pourquoi il convient d'étudier des solutions alternatives, comme xAAL, lorsque le contexte requiert une maîtrise de la circulation des données, comme c'est le cas avec les données personnelles des systèmes ambiants.

Dans ce contexte a émergé le concept du *edge computing*, qui se présente comme une alternative, ou tout du moins un complément au cloud computing. Pour schématiser, il s'agit de relocaliser les données et les traitements au plus proche de l'utilisateur, à la "bordure" entre le réseau personnel et le réseau Internet. Accessoirement, il y a la question de savoir de quel "côté" de la bordure on le place, même si l'on est tout proche. Ainsi, les opérateurs de réseaux d'accès embrayent sur ce mouvement vers le edge computing pour développer une offre de data-center sur le modèle des Telco CDN évoqués dans le chapitre 2.2. En effet, une des conséquences techniques du déploiement de la 5G et de la fibre est que nombre d'équipements matériels historiques dédiés sont remplacés par des solutions logicielles s'exécutant sur du matériel informatique générique. Ainsi, des mini-datacenters sont déployés sur les plaques régionales, voire au pied des antennes. Or, les fonctions d'opérateurs (gestion des utilisateurs, autorisations d'accès, facturation, etc.) ne consomment qu'une petite partie des ressources informatiques matérielles effectivement déployées. D'où l'idée de proposer une offre de prestation pour un service de data-centers distribués proches des consommateurs, où ces ressources disponibles sont accessibles à des partenaires (concrètement, mis à disposition de machines virtuelles un peu partout sur le territoire). Il s'agit là d'une certaine vision du edge computing, qui offre un véritable intérêt pour certains services (distribué, proche des clients), mais qui malgré tout se place de l'autre côté de la bordure par rapport à l'utilisateur, dans l'Internet et non pas son intranet à lui. Nous défendons au contraire l'idée que les données personnelles et les traitements doivent rester à la main de l'utilisateur, et ne pas se propager hors du domicile. Il convient donc de développer cet axe : des solutions de type edge computing pour des services ambiants. L'approche xAAL répond déjà à la question de la gestion et la collecte des données. En revanche, pour la question du traitement de ces données (implanter des algorithmes, déployer des services), des travaux futurs sont à mener. L'ambition est que l'utilisateur puisse souscrire à de nouveaux services, activer de nouveaux traitements, et que ceux-ci soient rapatriés et exécutés sur les équipements locaux, au domicile, sur les données qui restent locales. Pour l'instant, cela n'est réalisable que de manière ad hoc et parcellaire. Pour atteindre cet objectif, il convient de définir certains formalismes, des abstractions de ces traitements, des modèles d'exécutions, et des modèles de données requis.

L'écosystème xAAL offre déjà un cadre, notamment sur le modèle des données. Des étapes de prototypage concret sont également nécessaires à la validation de la démarche.

3.3 Analyse de données et intelligence ambiante

Les systèmes ambiants apparaissent comme une réponse prometteuse pour faciliter le quotidien des personnes à domicile, leur redonner le contrôle sur les objets de leur environnement. Mais c'est aussi un vecteur pour collecter des données, les traces des interactions des usagers avec chacun des dispositifs connectés de l'environnement, sans avoir recours à des caméras, sujet sensible pour le respect de la vie privée. Cela offre de grandes perspectives pour de nouveaux services. L'ambition est de mettre au point des systèmes capables de comprendre et de reconnaître automatiquement les habitudes de vies et les activités des personnes. Ainsi, une maison "intelligente" pourrait proposer des services personnalisés d'aide à domicile pour améliorer la qualité de vie, l'autonomie, le bien-être de ses résidents, et notamment des personnes âgées ou fragiles.

Dans le contexte de l'aide à l'autonomie aux personnes fragiles, on s'intéresse aux activités de la vie quotidienne (AVQ). Ce sont les activités qu'une personne effectue pour gérer les besoins identifiés comme fondamentaux (se nourrir, se déplacer, s'habiller, faire sa toilette, etc.). Et d'ailleurs, la grille AGGIR (Autonomie Gérontologie Groupe Iso-Ressources) permet à un expert ou un praticien d'évaluer le niveau de dépendance d'une personne au regard de ce référentiel d'actes quotidiens fondamentaux. Mais plus largement, il semble intéressant d'élaborer un dispositif capable de repérer automatiquement les routines de vie d'une personne, repérer les éventuels glissements, ruptures ou anomalies dans ces habitudes.

Aussi, des premiers travaux ont été menés dans l'équipe sur ce sujet [156]. Pour faire face à la grande variabilité des utilisateurs et des installations de capteurs ambiants, des méthodes non supervisées ont été explorées. L'idée étant que, si le système a collecté une quantité de données suffisamment grande, ces algorithmes devraient pouvoir repérer des récurrences. Les traces des événements de capteurs ambiants constituent une série temporelle, au sein de laquelle certains motifs se retrouvent de manière répétée, car ils correspondent à des activités que la personne effectue souvent et de manière semblable à des périodes de temps réguliers. Même si le système ne sait pas attribuer un label à ces motifs, ceux-ci correspondent à des activités de la vie quotidienne, ce qui permettrait à terme de repérer d'éventuelles dérives ou anomalies dans ces routines de vie. Ces travaux de thèse menés dans l'équipe ont ainsi permis d'élaborer des algorithmes de découverte étendue des épisodes récurrents : un premier est conçu pour l'analyse de bases de données statiques, un second permet de gérer des données évolutives et des habitudes de vie qui changent. Ils sont dérivés de méthodes par mélange de Gaussiennes.

Ces approches d'analyse de données non supervisées peuvent reconnaître des motifs, non pas parce qu'ils ressemblent à des choses connues et répertoriées dans une base de connaissances, mais parce qu'ils se répètent et sont semblables à eux-mêmes au sein du flot de données. Ces méthodes ont l'avantage de ne pas nécessiter de données d'apprentissage labellisées, une étape longue et fastidieuse puisque généralement effectuée par un humain. Cependant, elles nécessitent de disposer d'un grand jeu de données, et de données globalement stables. De plus, elles ne permettent pas de fournir un étiquetage lorsqu'elles reconnaissent un motif. Aussi, d'autres techniques d'apprentissage peuvent être considérées.

3.3.1 Méthodes d'apprentissage supervisées pour la reconnaissance d'activités humaines

Les méthodes d'apprentissage supervisées se proposent de reconnaître des motifs dans un jeu de données en les confrontant à des exemples annotés. Pour ce faire, il faut disposer d'une base de connaissances incluant un ensemble d'exemples couvrant autant que possible les différents cas de figure envisagés, et que ces exemples soient qualifiés et étiquetés par l'expertise d'un humain. La machine apprend à refaire la même chose que l'humain. À la différence des méthodes non supervisées, la quantité de données d'apprentissage nécessaire est a priori moindre. Et justement, dans notre domaine d'application, la masse de données générées par les occupants d'un habitat au travers de capteurs ambiants est finalement de taille assez modeste. Ces considérations pragmatiques nous amènent à explorer les méthodes supervisées. C'est l'objet du projet de thèse menée par Damien BOUCHABOU (cf. 6.6), en collaboration avec Delta Dore.

Étude des algorithmes méthodes existantes

Ces algorithmes de reconnaissance procèdent donc en deux phases : une phase d'apprentissage pour entraîner un modèle à l'aide de données préalablement labellisées, puis une phase d'inférence où le modèle a pour travail d'attribuer des labels à des nouvelles données qui lui sont fournies en entrée, au fur et à mesure qu'elles sont produites par les humains en activité dans l'habitat. Dans notre cas, ces données sont un flux d'événements de capteurs. D'une activité à l'autre, le nombre de capteurs impliqués et la durée peuvent être très variables. Diverses stratégies peuvent être expérimentées pour encoder et segmenter ces événements de capteurs (fenêtres glissante, de taille fixe ou bien variable, en nombre d'événements ou en durée, remplissage éventuel pour compléter des activités plus courtes avec des zéros ou par recopie des données précédentes, etc.).

Ensuite, il faut définir les caractéristiques sur ces données d'entrée que les algorithmes doivent scruter pour la reconnaissance et l'inférence. Il s'agit d'identifier les caractéristiques permettant de discriminer au mieux les activités les unes des autres. En premier lieu, il y a naturellement la valeur des données fournies par ces capteurs. Il peut s'agir de valeurs binaires (capteur de présence, ouverture de porte, lumières, etc.), ou de valeurs scalaires (température, hauteur d'ouverture de store, variateur de lumière, niveau de CO₂, etc.). La date de ces événements de capteurs est également importante, mais suivant que l'on considère la date calendaire (dans l'année, la semaine), ou le moment de la journée, on mettra possiblement l'accent sur un aspect plutôt qu'un autre. Les informations contextuelles relatives aux capteurs peuvent être prises en compte d'une manière ou d'une autre, typiquement leur nature (le fait que ce soit un capteur de présence, de température, un interrupteur, etc.) ; ou encore leur localisation dans l'habitat (avec l'idée que les activités humaines sont généralement liées à des pièces précises, p.ex. manger, dormir, faire sa toilette, etc.).

Les caractéristiques évoquées jusqu'ici ne sont en fait rien d'autre que les données brutes fournies par les capteurs. Mais on peut envisager de construire explicitement des caractéristiques par-dessus les informations existantes pour orienter l'algorithme de reconnaissance : par exemple si l'on s'intéresse particulièrement au délai écoulé entre les événements on peut calculer la valeur de ce délai et le fournir également en entrée à l'algorithme, ou on peut ajouter l'indication de la précédente activité reconnue, etc. On peut également procéder à des analyses statistiques sur la base de données d'entraînement pour, par exemple, repérer le ou les capteurs fortement corrélés à chaque activité (notion de capteur "principal"), ceux qui indiquent souvent le début de l'activité, ou la fin, ou bien le nombre de capteurs impliqués dans chaque activité. Mais notons qu'il y a là un risque de refaire de manière ad hoc ce que les algorithmes d'apprentissage font déjà par eux-mêmes.

Ces listes de caractéristiques mentionnées jusqu'ici sont typiquement construites à la main, sur la base d'une certaine expertise du domaine, voire des a priori. Cependant, grâce à la base de données d'apprentissage, il peut être envisagé d'extraire ou de découvrir de manière automatique des caractéristiques efficaces. Une stratégie peut être de recourir aux méthodes d'apprentissage non supervisées telles qu'évoquées précédemment. Pour autant, on retrouve les limites liées à ces méthodes, c'est-à-dire la nécessité de disposer de données suffisamment vastes et globalement similaires. D'autres domaines de la théorie des données peuvent être sollicités, par exemple les techniques d'autoencodage qui recherchent des méthodes de compression-décompression de données, pour réduire la dimension de l'espace des données et filtrer le bruit, mais qui nécessitent tout de même une phase d'expertise manuelle et toujours un grand nombre de données à étudier.

Ces étapes sont un préalable à la mise en place d'algorithmes d'apprentissage, et elles peuvent impacter les performances finales. Une revue méthodique de l'état de l'art a permis d'apprécier ces questions dans le contexte de la reconnaissance d'activités humaines dans un habitat connecté [44]. Les algorithmes classiques du domaine sont également passés en revue. Ainsi, on peut noter les *réseaux de neurones convolutifs* CNN (Convolutional Neural Networks). Ils ont été développés principalement pour le traitement des images (segmentation, reconnaissance). Ils sont capables de traiter des images de grande taille (ou de grande résolution, c'est-à-dire avec beaucoup de pixels en entrée) grâce à une stratégie de découpage de l'image en petites portions traitées individuellement, puis de mise en commun des traitements. L'idée de base est que chaque bribe d'information trouve son sens en la reliant aux informations voisines, le contexte. Ainsi, à chaque couche de réseaux de neurones, chaque neurone traite une portion des données de l'image, ou des sorties des neurones de la couche précédente, et ceci de manière hiérarchique. En fait, les CNN ont la capacité à construire automatiquement les caractéristiques évoquées précédemment. Les CNN connaissent un certain succès et sont expérimentés dans des domaines autres que la vision par ordinateur. Ainsi, ils ont été employés pour la reconnaissance d'activités humaines [164, 165, 185]. L'idée générale consiste à transformer les données de capteurs domotiques en image 2D avant de dérouler un CNN ; par exemple en axe X la succession des événements de capteurs, en axe Y les capteurs regroupés suivant les pièces de la maison, chaque pixel représentant une activation de capteur codée par une couleur ou un niveau de gris suivant les stratégies testées. Ainsi, chaque activité humaine peut être représentée par une image que le CNN va essayer de classifier et de reconnaître (en s'appuyant sur les différentes variantes fournies par la base de données d'apprentissage). Ces stratégies donnent des résultats jugés généralement satisfaisants, mais souffrent de deux problèmes. Tout d'abord, la taille variable de ces images : certaines activités impliquent significativement plus d'activations de capteurs que d'autres, il faudra alors les compléter (padding) pour uniformiser leurs tailles avant de les passer au CNN ; celui-ci risque alors de se focaliser plus sur ce padding que sur les données effectives. Ensuite, certaines activités plus fréquentes peuvent être illustrées par plus d'exemples que d'autres dans la base de données d'apprentissage et seront donc mieux reconnues, déséquilibrant sensiblement les performances globales et biaisant la comparaison des différentes stratégies.

Mais d'autres algorithmes ont été développés pour traiter plus spécifiquement les données qui ont une nature séquentielle (multi dimensionnelle ou pas). Et justement dans notre domaine d'application, nos données sont des séries temporelles. On peut ainsi évoquer les *réseaux récurrents* RNN (Recurrent Neural Network). À la différence des réseaux de neurones traditionnels où l'information se propage dans une seule direction depuis les entrées vers les sorties, les RNN ont une topologie qui inclut des boucles, plus précisément des sorties calculées par des neurones sont réinjectées parmi les entrées des neurones d'une itération à l'autre. L'idée est qu'ainsi, le réseau garde en mémoire une trace des événements et des décisions passés. L'inconvénient est que dans certaines circonstances, la phase d'apprentissage du neurone peut être freinée voir bloquée par ce mécanisme, les données passées devenant prépondérantes sur les nouvelles.

Aussi, diverses variantes ont été proposées, comme les réseaux récurrents à *mémoire court et long terme* LSTM (Long Short-Term Memory) qui incluent un mécanisme pour “oublier” [84], ou encore les *réseaux récurrents à portes* GRU (Gated Recurrent Unit) qui peuvent être vus comme une simplification des LSTM dédiée aux séries temporelles [147].

Des stratégies supplémentaires ont été proposées pour améliorer la reconnaissance comme les LSTM bidirectionnels (Bi-LSTM), où chaque unité de calcul combine deux neurones LSTM, qui ont été construits lors de la phase d’apprentissage de la manière suivante : l’un est alimenté par les données “en avant” (depuis le passé vers le futur, comme dans le cas du LSTM classique), et l’autre est alimenté par les données “en arrière” (depuis le futur vers le passé, c’est-à-dire à l’envers). L’idée est que l’information à un instant donné est contextualisée non seulement par les informations passées, mais aussi par les informations futures. Un exemple d’utilisation est pour la reconnaissance du langage naturel : un mot dans la phrase est reconnu non seulement grâce aux mots qui le précèdent, mais également par ceux qui le suivent. Ces considérations peuvent être étendues à d’autres domaines où la donnée prend du sens par la place qu’elle occupe dans la série par rapport à ses voisines. À ce stade, il convient d’évoquer également la variante CNN-1D développée justement pour la classification dans les séries temporelles [162, 175]. Comme les CNN classiques, le temps d’entraînement est plutôt rapide, et les performances pour la reconnaissance d’activités humaines sont plutôt satisfaisantes, quoiqu’inférieures aux LSTM [177, 188]. Mais s’ils permettent d’appréhender l’aspect temporel des séquences, ils prennent peu en compte les dépendances à long terme, et s’accommodent mal les séquences de tailles variables.

Propositions d’extensions et améliorations

Fort de ces constatations sur les classifieurs, les travaux se sont penchés sur la question de l’encodage des données d’entrée. L’idée est que, même si les LSTM semblent être une solution pertinente pour réaliser la reconnaissance d’activités humaines, les performances pourraient être améliorées par des stratégies d’encodage des données qui puissent capter certaines propriétés saillantes et ainsi enrichir les méthodes de classification. Comme évoqué précédemment, la reconnaissance de motifs dans les séries de données est particulièrement étudiée dans le domaine du traitement du langage naturel avec un focus particulier sur les notions de contexte, de place d’un mot dans la phrase, la façon dont ils sont associés aux autres mots, etc. Elles sont employées dans des tâches de traduction ou de génération de texte. On peut distinguer les approches proposant des encodages statiques basées sur l’occurrence des mots dans les textes, telles que Word2vec [145], GloVe [150], FastText [157], et les approches contextualisées s’intéressant à la proximité des mots avec leurs voisins, telles que ELMo [167], BERT [173], GPT [168]. Il s’agit essentiellement de méthodes d’encodage non supervisé, ou parfois incluant des étapes semi-supervisées, c’est-à-dire qu’un modèle construit de manière non supervisée est ensuite affiné avec un apprentissage supervisé sur un échantillon labellisé (ce que ces méthodes dénomment échantillon est parfois potentiellement de taille importante comme pour GPT-3, ou du moins de taille non précisée...). Ces méthodes de représentation des mots contextualisées modélisent à la fois les règles complexes du langage (syntaxe, sémantique), mais appréhendent également les interprétations variables par exemple en cas de polysémie.

Il s’agit donc ici de faire le parallèle entre les mots d’un texte et les séquences d’activations de capteurs lors d’activités humaines [42, 43, 51]. Diverses stratégies ont donc été expérimentées. La première étape, triviale, consiste à fabriquer des mots à partir de ces activations de capteurs, typiquement en se donnant une nomenclature portant sur la nature du capteur, un identifiant lié à l’installation domotique, et la valeur captée lors de l’événement (par exemple, l’activation du capteur de mouvement numéro un devient "M001ON"). La séquence d’activation de capteurs se traduit alors par une suite de mots. Les encodages Word2vec et ELMo ont été expérimentés,

en conjonction avec les classifieurs LSTM, Bi-LSTM et également FCN. Les expérimentations ont été conduites sur les jeux de données couramment utilisés dans le domaine, celles issues du projet CASAS [142] (université d'État de Washington) collectées en situation réelle, avec un résident (jeux de données *Aruba* et *Milan*) ou bien deux personnes (*Cairo*), parfois accompagnés d'un animal de compagnie (*Aruba*, *Cairo*), dans des maisons et appartements équipés avec une trentaine de capteurs de type détecteur de mouvement et ouverture de porte, pour une quinzaine d'activités différentes, et sur plusieurs mois.

Des premières expériences menées avec un encodage classique ont mis en évidence l'intérêt des LSTM et Bi-LSTM sur les FCN, comme déjà observé dans la littérature, et que ces derniers sont particulièrement sensibles au type de padding employés pour compléter les séquences plus courtes que les autres (avec quelques différences de performance suivant le type de padding : compléments avec des zéros, avec répétition des données, ou de manière symétrique). Les performances des FCN sont également moindres dans le cas d'habitats avec plusieurs résidents et des activités parallèles. La seconde série d'expériences avec les encodages Word2vec et ELMo, encodages construits de manière non supervisée sur chaque jeu de données, a montré que ces encodages étaient capables de procéder par eux-mêmes à des regroupements qui se trouvent coïncider avec les activités effectives d'une part, et avec la localisation des capteurs dans l'habitat d'autre part. Ceci confirme l'idée que ces techniques d'encodage sont pertinentes. Et à ce titre, l'encodage ELMo produit des regroupements plus marqués que Word2vec et plus robustes dans le cas de résidents multiples. Au final, il apparaît que la combinaison de ELMo avec un Bi-LSTM produit des performances supérieures aux autres stratégies.

Des expérimentations complémentaires ont permis d'explorer des stratégies connexes. Par exemple, la littérature suggère que ELMo peut être approximé par une ou deux couches de Bi-LSTM, ce qui a pu être confirmé tout en constatant que ELMo restait supérieur. Par ailleurs, des stratégies d'apprentissage par transfert ont aussi été expérimentées : c'est-à-dire entraîner un encodeur ELMo sur le dataset d'une maison, puis l'utiliser lors de la classification d'un autre dataset. Les performances sont alors quasiment similaires au cas où l'encodeur ELMo avait été entraîné sur le dataset cible. Mais ce résultat encourageant doit être nuancé par l'observation que dans le contexte de nos expériences, les datasets ont été produits par des capteurs et des configurations d'habitats très similaires ; mais très probablement que si cela n'avait pas été le cas, le "vocabulaire" manipulé par ELMo aurait été trop éloigné d'un habitat à l'autre pour que ce transfert ait un sens sans une phase de traduction sur ce vocabulaire. À ce titre, des encodeurs comme BERT ou GPT mériteraient d'être expérimentés plus avant [52]. Un autre point est que cette démarche consistant à appréhender des activations de capteurs comme s'ils étaient les mots d'un vocabulaire, cela présuppose que l'on connaisse au préalable l'ensemble des différentes valeurs retournées par ces capteurs et que l'on construise autant de mots, ce qui pourrait aboutir à un vocabulaire particulièrement large. Pour développer de telles approches de manière réaliste dans le cas général avec des capteurs variés, il conviendrait alors de se tourner vers d'autres techniques du traitement du langage naturel qui seraient capables de travailler sur la décomposition interne des mots (racine, préfixe, suffixe, etc.).

Il ressort de ces travaux qu'une stratégie avec ELMo comme encodeur suivi d'un classifieur Bi-LSTM donne des résultats satisfaisants. Pour autant, il peut être intéressant de poursuivre la recherche d'améliorations possibles [45]. Une première tentative part de l'observation que les activités humaines sont souvent liées les unes aux autres dans un enchaînement routinier (p.ex. préparer le repas, manger, faire la vaisselle, etc.). Même si les LSTM ont pour vocation de repérer les dépendances à plus ou moins long terme, il peut être intéressant d'ajouter au vecteur d'entrée du classifieur de données courantes, les données d'activités précédentes. Malheureusement, les tests ont montré que cette idée n'améliorait pas la reconnaissance, et dans certains cas la dégradait même (avec comme explication possible que les segments d'entrée sont alors trop longs, trop semblables les uns aux autres). Une autre suggestion s'appuie sur l'idée que les

routines d'activités humaines sont possiblement très liées au moment de la journée, alors que les encodages d'informations mis en œuvre exploitent peu l'horodatage des événements de capteurs. Une première tentative consistant à ajouter l'horaire du début du segment d'activité n'a montré aucun impact, ni dans un sens ni dans l'autre. (La combinaison de ces informations procède par une couche de projection linéaire, puis concaténation au vecteur de sortie du Bi-LSTM, qui est enfin donné à une couche softmax pour procéder à la classification proprement dite.) Par contre, en ajoutant en plus la position temporelle de chaque événement depuis le début du segment a sensiblement amélioré la classification, et surtout dans le cas de classes d'activités déséquilibrées en termes d'échantillons d'apprentissage. (Les données temporelles sont encodées séparément, passées à un Bi-LSTM, dont les résultats sont concaténés avec le premier, puis classifiés par un softmax.) Cela nous conforte bien dans l'idée que l'information temporelle est un critère important, et que si l'encodeur choisi pour les événements de capteurs ne l'intègre pas complètement, un traitement en parallèle comme ici reste pertinent.

Obtention de données d'apprentissage par transfert ou synthèse

Les travaux mentionnés précédemment nous ont permis d'explorer différentes facettes des techniques d'apprentissage supervisé pour la reconnaissance d'activités humaines. Entrent en ligne de compte le choix des algorithmes de classification, les questions d'encodage des données, mais aussi le réglage fin des différents paramètres de ces algorithmes. Un autre aspect d'importance est la disponibilité d'une base de données d'apprentissage étiquetée qui soit de qualité (bonne couverture des différentes variantes pour chaque type d'activité, nombres d'échantillons équilibrés entre les différentes classes d'activité, idéalement sur une installation similaire à l'habitation ciblée, des labels cohérents et stables dans le temps tout au long de l'expérience même s'ils sont produits par un humain, etc.). En pratique, de telles conditions sont difficiles à réunir. Et il est peu raisonnable de demander à l'utilisateur final de passer plusieurs mois à étiqueter ses propres données avant d'espérer voir le système de reconnaissance entrer en fonction une fois cet apprentissage effectué. Ceci motive l'intérêt pour les techniques d'apprentissage par transfert : le classifieur d'une habitation (entraîné avec tous les efforts requis, c'est-à-dire avec des données d'apprentissage labellisées par un humain) va être utilisé pour labelliser automatiquement les données du classifieur d'une autre habitation et servir de base à son apprentissage. Le second apprend à refaire ce que le premier a appris à faire (qui lui, l'a appris à partir d'un humain). Si l'idée est séduisante, en pratique cela implique tout de même que les deux habitations soient suffisamment semblables en termes d'installation de capteurs et de profils des habitants (et de leurs habitudes). C'est pourquoi on peut alors s'intéresser aux techniques permettant de synthétiser des données d'apprentissage : pour cela nous avons développé (sur la base d'un outil existant) un simulateur d'habitation connectée dans lequel un avatar déroule des activités scriptées et déclenche des événements de capteurs virtuels, fournissant ainsi des jeux de données dument labellisées [50]. L'habitat virtuel en question peut être élaboré à la main, ou bien (à terme) produit à partir de l'habitat réel de l'utilisateur grâce à des techniques de vision par ordinateur [69]. Il s'agit là, d'une certaine manière, de s'inspirer du principe de *jumeau numérique* : à partir d'un système cyberphysique réel est dérivé un système virtuel, sur lequel des connaissances sont produites, qui seront ensuite réinjectées et exploitées dans le système réel.

Classification en temps réel

Les algorithmes de reconnaissance d'activités humaines évoqués précédemment requièrent que les données soient présentes et disponibles dans leur intégralité au moment où ces algorithmes doivent les classer. Sous-entendu : ces algorithmes ne sont pas prévus pour travailler sur des données qui arrivent au fil de l'eau, au fur et à mesure qu'elles sont produites par les capteurs.

Pour pouvoir traiter en temps réel un flux de données, certains ajustements et compromis sont nécessaires [48, 49].

La première tâche consiste donc à repenser les techniques de segmentation. Il s’agit de déterminer les données qui vont “ensembles”, avant que cet ensemble ne soit donné à un algorithme de classification qui doit reconnaître (en termes d’activité humaine) ce qu’est effectivement cet ensemble. Sans une bonne segmentation (c.-à-d. éviter de fournir un ensemble qui soit partiel, ou à cheval sur plusieurs motifs), la classification peut difficilement atteindre de bonnes performances. Dans le cas de l’analyse sur un jeu de données a posteriori (non temps réel), il est courant d’employer des stratégies simples de fenêtres glissantes (même s’il reste des paramètres à se fixer, comme la taille, que ce soit en durée ou en nombre d’événements), car la “convolution” mise en œuvre dans les algorithmes des réseaux de neurones qui vont suivre permettra finalement de retrouver les segments pertinents et finalement classifier les motifs. Mais cela amène à faire des calculs “pour rien” sur des fenêtres qui seront de toute façon non pertinentes, avant de tomber sur “la bonne” fenêtre qui peut produire une réponse. Aussi, dans le cas du temps réel qui va chercher à éviter les calculs pour rien, la problématique se résume ainsi : est-ce que cette nouvelle donnée qui vient d’être produite par un capteur appartient au segment (activité) déjà en cours, ou est-ce le début d’un nouveau segment ? (Auquel cas, les données du segment qui vient de s’achever pourront être données à un algorithme de reconnaissance d’activités.) Il faut donc répondre à cette question en ayant à disposition uniquement les connaissances des événements passés, sans pouvoir considérer les données qui vont suivre et qui n’existent pas encore. Intuitivement, l’idée générale est de rechercher ce qui se passait “d’habitude”, c’est-à-dire à procéder à quelques analyses statistiques au sein de la base de données d’apprentissage labellisée. Pour concrétiser cette idée, la proposition a consisté à évaluer la corrélation des occurrences des événements les unes avec les autres au cours d’une activité (indépendamment du label de l’activité en question), tel qu’elles sont apparues dans la base de données d’apprentissage [47]. Cette approche donne de bons résultats (c.-à-d. très proche des segments labellisés manuellement), mais des précautions particulières doivent être prises pour éviter la fragmentation de ces segments dans le cas d’activités concurrentes par plusieurs personnes. Incidemment, cela peut être une approche pour repérer l’entrelacement d’activités concurrentes.

Ensuite, d’autres études visent à simplifier le processus en travaillant sur la manière dont l’information est encodée avant de la passer aux algorithmes de classification. Puisque la littérature indique que les CNN sont plutôt moins gourmands en calculs que d’autres algorithmes (p.ex. LSTM) tout en offrant de bonnes performances de reconnaissance, il s’agit de rechercher comment les utiliser au mieux et de contourner une de leur contrainte, le fait qu’il faille leur fournir des données de taille fixe. Diverses variantes de CNN ont été proposées. Il s’agissait à l’origine de classifier des images, et comme évoqué précédemment, la stratégie habituelle consiste généralement à encoder les données sous la forme d’une matrice 2D, c.-à-d. une image (p.ex. chaque ligne est dédiée à un capteur, et chaque colonne indique son activation au cours du temps, mais cela nécessite de choisir de manière arbitraire une taille pour cette fenêtre temporelle). La proposition ici a été d’explorer une autre forme de représentation : on considère une matrice carrée de la taille du nombre de capteurs, et chaque pixel indique le temps écoulé entre l’activation du capteur X (une ligne de la matrice) depuis l’activation du capteur Y (colonne de la matrice), avec un facteur “d’évaporation” par rapport à l’instant présent, un peu sur le principe des algorithmes des fourmis [55]. Quelques raffinements supplémentaires peuvent être adoptés, par exemple lorsque des séquences de capteurs apparaissent dans deux ou plusieurs activités différentes, on peut alors définir un coefficient supplémentaire pour augmenter le contraste entre ces activités. Cette approche donne des résultats supérieurs aux différentes variantes de fenêtrages employés habituellement avec des CNN (ou aux SVM), mais qui sont, il est vrai, légèrement inférieurs à un bi-LSTM. Pour autant, cette approche reste beaucoup

plus simple d'un point de vue calculatoire. C'est un compromis appréciable qui en fait une très bonne candidate pour des solutions temps réel.

De plus, au-delà de la question de l'optimisation des classifieurs temps réel, on peut s'interroger sur la configuration minimale de capteurs dans le domicile qui sont nécessaires pour fournir un service de reconnaissance d'activité. Cette préoccupation est motivée tant par des questions de coût, que de sobriété numérique, que pour la charge de calcul pour un service temps réel. Là encore, la stratégie consiste à explorer la base des données d'apprentissage, c'est-à-dire les événements de capteurs collectés au cours d'une longue période, accompagnés des activités correspondantes labellisées à la main. L'étude de cet historique est riche d'enseignement ; notamment on va y rechercher quel a pu être le gain d'information apporté par chaque capteur pour la reconnaissance des activités. La stratégie retenue consiste ici à utiliser les concepts d'entropie et de taux d'information mutuelle développés dans le domaine de la théorie de l'information [54]. Ainsi, on est capable d'évaluer la contribution de chaque capteur à la reconnaissance d'une activité, et d'évaluer si deux capteurs liés à une activité apportent plus d'information qu'un seul et de combien (et pour chaque paire de capteurs). Ainsi, et en se fixant un seuil sur le taux de contribution à l'information, on est à même de sélectionner les capteurs principaux et ceux que l'on peut se permettre d'écarter. Le temps de calcul pour la reconnaissance d'activité en temps réel s'en trouve allégé, tout en conservant un taux de succès satisfaisant.

3.3.2 Bilan sur l'analyse de données et l'intelligence ambiante

Les données produites par les appareils ambiants sont des traces précieuses des activités humaines. La question est alors de savoir comment les exploiter pour aider au mieux l'utilisateur, et tout d'abord rendre le système capable de comprendre, même grossièrement, ce qu'il se passe dans la maison.

Notre domaine d'application a certaines spécificités. Tout d'abord, les données sont temporisées : c'est-à-dire que non seulement elles sont produites au fil du temps et doivent être analysées en temps réel, mais aussi que le temps est un élément important pour l'interprétation et la compréhension du sens qu'elles portent. Ensuite, les données ne sont pas si massives que cela et même plutôt éparpillées, avec une grande variabilité entre les différents usagers et habitations, alors que les algorithmes proposés par la littérature sont tous de nature probabiliste et qui par construction offrent des résultats intéressants plutôt sur des grands nombres. Enfin, les données que nous manipulons ont trait à la vie privée des individus et les plates-formes de traitement que nous proposons se doivent d'offrir un certain nombre de garanties pour préserver cette vie privée.

La science des données fait habituellement la distinction entre méthodes supervisées et non supervisées. Nous avons exploré ces domaines et rejoignons le constat finalement assez partagé qu'une stratégie pertinente consiste à combiner les deux : certaines étapes de la chaîne de traitement comme la classification exploitent des approches supervisées, alors que d'autres étapes comme la segmentation ou l'encodage peuvent bénéficier d'astuces tirées des méthodes non supervisées.

Le domaine de la reconnaissance d'activités humaines sur des données d'objets connectés voit émerger de nouvelles approches plus sophistiquées. Par exemple, l'étape de l'encodage commence à explorer les techniques de graphes de connaissances (cf. projets TALK [208] ou VirtualHome2KG [187]), ces techniques qui permettent de manipuler de manière structurée des informations hétéroclites, un peu comme une extension des approches à base d'ontologies. Par exemple, dans notre domaine d'application, il y a des informations que l'on peut connaître par ailleurs à propos de nos données et qui sont pour l'instant mal exploitées (nature des capteurs, emplacement dans la maison, etc.). De même, nos expériences nous ont convaincus qu'il faut

mieux considérer les relations temporelles et le séquençement des événements de capteurs (cf. l'idée d'exploiter des approches tirées du traitement automatique du langage). La promesse apportée par le concept de graphes de connaissances est un cadre de travail pour appréhender ces informations hétéroclites mais porteuses de sens.

Enfin, un second axe de travail prometteur porte sur les techniques d'apprentissage fédéré. L'idée consiste alors à apprendre collectivement à résoudre un problème présent chez chacun. Dans notre domaine d'application il s'agit d'apprendre à reconnaître les activités humaines dans une maison, tout en ayant à l'esprit que ces activités sont d'une part très similaire chez les uns et les autres (repas, toilette, sommeil, loisirs, etc.), mais d'autre part qu'elles se manifestent de manières différentes chez chacun (capteurs, habitats, utilisateurs, etc.). Chaque maison apprend à reconnaître les activités de ses propres habitants, mais ces maisons peuvent échanger et partager entre elles des connaissances acquises lors de ces apprentissages. L'approche naïve consisterait à mettre en commun l'intégralité des données brutes des utilisateurs, ce qui n'est évidemment pas souhaitable pour le respect de la vie privée (même si c'est justement ce que proposent les solutions cloud). La seconde approche consiste à partager, non pas les données brutes, mais les paramètres des réseaux de neurones construits lors de l'apprentissage. Dans le cas où à la fois les réseaux de neurones et les données d'entrée sont très similaires, des combinaisons arithmétiques peuvent être suffisantes (mais avec l'hypothèse forte que les maisons, capteurs, et habitants sont très similaires). Dans le cas contraire, une approche s'inspirant des techniques d'apprentissage par transfert offre une solution pragmatique et efficace : pour schématiser, le classifieur de chaque maison va procéder à des transferts d'apprentissage croisés depuis et vers un classifieur générique commun [186, 192], et possiblement de manière incrémentale. Mais, d'autres approches s'intéressant spécifiquement à l'espace latent pourraient être explorées, un domaine très dynamique notamment pour traiter des questions d'explicabilité ou des méthodes génératives.

3.4 Bilan et perspectives

Ce chapitre a retracé les différents axes que nous avons développés pour accompagner les personnes fragiles dans leur quotidien grâce à des dispositifs techniques ambiants déployés dans leur environnement. Le premier axe s'est intéressé aux différents types de services qui pouvaient être proposés à l'utilisateur pour l'accompagner. Le second axe s'est attelé aux problèmes d'interopérabilité entre les dispositifs techniques qui peuvent être déployés au domicile. Enfin, le troisième axe plonge dans les algorithmes d'intelligence artificielle qui peuvent être développés pour analyser les données de ces dispositifs ambiants.

Ainsi, nous pouvons identifier une gamme de services possible avec une certaine progression dans le niveau de prise de décision de cet habitat dit intelligent, ou tout du moins connecté. En premier lieu, le recours à des objets connectés permet à l'utilisateur de les piloter plus aisément, et ainsi de recouvrer une certaine maîtrise de son environnement. Des scénarios et automatismes sophistiqués lui permettent de se décharger de certaines contraintes récurrentes.

Dans un second temps, et pour peu que l'on adosse à l'infrastructure communicante des capacités de stockage et d'historisation des données qui soient respectueuses de la vie privée, il est alors possible de proposer des services d'actimétrie. Il peut s'agir de métriques sur l'environnement (qualité de l'air, niveau sonore, luminosité, température, consommation énergétique, etc.), ou sur l'utilisateur lui-même (temps passé dans chaque pièce, à l'extérieur de la maison, niveau de mobilité, sommeil, etc.). En évitant soigneusement toute forme de jugement de valeur sur d'éventuels comportements normés, il s'agit simplement de fournir à l'utilisateur un regard objectif (et privé) des indicateurs qu'il aura choisis. Il importe donc, lors de la construction de ces services, d'être vigilant quant aux questions d'acceptabilité, de respect de l'utilisateur, et

de partage de l'autorité. C'est un sujet qui doit être abordé avec précaution notamment si l'on introduit des systèmes de détection d'anomalie ou d'alerte vers des tiers (prévoir par exemple une étape de levée de doute auprès de l'utilisateur lui-même).

Enfin, on voit émerger des systèmes dotés d'un niveau d'analyse plus complexe des données, autrement dit introduisant des algorithmes d'intelligence artificielle. L'ambition est alors, à terme, de proposer des services d'accompagnement et de mentorat. Là encore, l'acceptabilité prime. L'utilisateur choisit de s'inscrire dans une démarche par laquelle il souhaite changer certaines de ses habitudes (nutrition, sédentarisation, etc.) et pour laquelle il sollicite un dispositif technique proactif qui puisse l'accompagner. Pour autant, la mise en place de tels services présuppose tout d'abord de disposer de ces fameux algorithmes si prometteurs, et dont l'efficacité devra être confrontée aux situations réelles. Il y a là deux voies pour des travaux futurs : explorer plus avant les algorithmes d'analyse de données, et procéder à des déploiements et expérimentations en situation pour valider la pertinence et l'acceptabilité de ces services.

La seconde étude rapportée dans ce chapitre s'est confrontée à un verrou technique, celui de l'interopérabilité des systèmes ambiants et objets communicants. Les constructeurs développent leur gamme dans une stratégie de marchés captifs (les produits d'un constructeur ne communiquent qu'avec eux-mêmes, possiblement avec ceux des partenaires, voire parfois partiellement), et en silo (des domaines de services particulièrement étanches : confort, énergie, sécurité, santé, etc.). L'interopérabilité fait apparaître un atout certain pour l'utilisateur, plus d'ouverture dans le choix de ses équipements, et la possibilité d'accéder à des prestations plus riches. Il y a également des intérêts pour des industriels, surtout ceux qui ne peuvent se permettre de développer tous les composants d'un silo avant de pouvoir aborder sa clientèle.

L'approche proposée, appelée xAAL, s'appuie sur des concepts de systèmes distribués. Les fonctionnalités nécessaires à un système ambiant ainsi que les interfaces d'utilisation et les modèles de données sont formalisés. Les communications sont chiffrées sur un bus IP, local au réseau internet de la maison. Le système est ouvert et permet à tous les acteurs d'interagir directement et localement. Son extensibilité offre les moyens nécessaires à des constructeurs pour proposer, si besoin, des équipements spécialisés, tout en assurant la compatibilité avec ceux déjà existants. Et si la preuve de concept a nécessité de notre part le développement de passerelles pour gérer les équipements de différents constructeurs, il est possible qu'à terme les constructeurs implémentent nativement ce protocole xAAL.

Dès lors, xAAL nous permet de déployer des services ambiants d'assistance aux personnes fragiles, d'intégrer facilement de nouveaux dispositifs, de procéder à de l'analyse des données en local en sécurité et dans le respect de la confidentialité des usagers. La solution xAAL apparaît déjà comme une première brique pragmatique de l'approche dite de *edge computing* qui consiste justement à relocaliser le traitement des données numériques au plus près de l'utilisateur. Des travaux complémentaires viendront poursuivre les efforts sur cet axe.

La troisième étude rapportée dans ce chapitre s'est penchée sur les algorithmes d'intelligence artificielle que l'on peut mettre en place pour apporter des services ambiants à l'utilisateur. Nombre de ces services ont besoin que le système puisse reconnaître de manière autonome les activités classiques de la vie quotidienne que l'utilisateur mène dans son habitat. L'utilisation des objets connectés génère des traces que le système peut collecter et analyser sous forme de séries temporelles. Les approches classiques d'apprentissage machine ont été étudiées, avec un focus particulier sur les méthodes supervisées.

Les méthodes proposées par la littérature donnent déjà des résultats très prometteurs. Pour autant, nous avons pu constater qu'il était possible d'améliorer les performances des algorithmes en question en piochant des approches dans les domaines connexes. On peut mentionner par exemple l'apport des étapes d'encodage des données embarquant des informations liant les données à leur contexte, facilitant ainsi le travail du classifieur. Certaines propositions ont déjà fait l'objet d'évaluations, d'autres méritent d'être explorées plus avant. Par ailleurs, constatant la

difficulté à disposer de données d'apprentissage suffisamment vastes et variées pour entraîner nos algorithmes, nous avons cherché à développer des méthodes de synthèse de données, en s'inspirant des approches dites de jumeau numérique, où l'on cherche à produire une version simulée d'un habitat, de ses occupants, et de leurs activités. Des travaux complémentaires devront venir compléter cette chaîne de traitements encore partielle aujourd'hui. Dans le même temps, des approches génératives pourront être explorées pour procéder à l'augmentation des données d'apprentissage. Enfin, un dernier axe d'études de ces algorithmes consiste à s'intéresser aux techniques d'apprentissage fédéré, où plusieurs instances d'algorithmes (ici, chacun s'occupant d'une maison) vont pouvoir collaborer en s'échangeant des connaissances apprises par chacun, pour s'améliorer collectivement.

Outre des travaux sur l'amélioration des performances de ces algorithmes, il convient de revenir au besoin initial : offrir des services aux les usagers. Suivant les besoins, certains de ces services peuvent ne pas être soumis à des contraintes temps-réelles, et donc où l'on considère comme acceptable de faire les calculs en temps différé, lorsqu'il n'y a plus d'activité dans la maison (la nuit, pendant les horaires de bureau, etc.) En revanche, s'il y a un besoin de réaction du système en temps réel, certains choix peuvent venir contraindre les algorithmes retenus. Des premiers travaux ont ainsi proposé des méthodes de segmentation des données et d'inférence des labels d'activité qui offrent de bons compromis. Ainsi, l'exécution de ces algorithmes sur des petits équipements domestiques embarqués nous renforce dans l'idée que l'approche edge computing est tout à fait atteignable. Une fois ces divers travaux consolidés, il conviendra de procéder à prototypages robustes et des déploiements et des expérimentations auprès d'utilisateurs, comme cela a pu être mené à propos des services relationnels décrits dans le chapitre 1. Les questions à étudier incluent là encore l'évaluation des besoins qu'il conviendra probablement d'ajuster et de compléter, ainsi que l'acceptabilité.

Chapitre 4

Conclusion

Ce mémoire a retracé les activités de recherche que j'ai menées sur la question des «systèmes ambiants pour l'aide aux personnes dépendantes».

Le chapitre 1 présente les problématiques des personnes en situation de dépendance, dépendance due à l'âge ou au handicap. Pour cerner au mieux les usagers et leurs besoins, des collaborations étroites avec des équipes de sociologues ont été mises en place. Il s'agit de mettre en place à la fois une approche pluridisciplinaire et également une démarche de co-conception. Par co-conception nous entendons le fait que l'utilisateur soit partie prenante pour la conception et l'évaluation des solutions développées. Par ailleurs, puisque les usagers ciblés sont par définition des personnes fragiles, et pour pouvoir aller à leur rencontre de manière efficiente, il importe de s'adjoindre les compétences de collègues sociologues, ainsi que l'éclairage d'acteurs du domaine et pouvoirs publics, et ceci dans un contexte de collaboration étroite menant à cette approche dite pluridisciplinaire.

Cette méthode de travail a permis d'identifier les besoins de notre public, leurs contraintes et appréhensions, mais aussi le contexte matériel (la maison) et humain (les aidants) dans lequel elles évoluent. Un fait saillant a émergé, souvent masqué par les questions médicales certes importantes, mais déjà adressées par ailleurs : le besoin de renforcer, voire reconstruire, les liens sociaux qui tendent à se déliter avec la progression de la dépendance. La dépendance va bien souvent de pair avec l'isolement. Dans ce contexte, des propositions techniques autour du concept de «télé connectée» ont émergées. En premier lieu il y a ce choix de l'objet technique, la télévision et sa télécommande, qui a été préféré à d'autres (ordinateur, tablette, etc.). Ensuite vient l'élaboration du bouquet de services relationnels qui sont attendus sur cette télé. Une fois menée cette phase d'analyse des besoins, vient alors la phase de conception et de prototype, qui explore alors des problématiques informatiques, systèmes distribués, communication et réseau, systèmes embarqués, interfaces humain-système, ergonomie. Les contributions scientifiques et techniques qui ont été menées dans ces disciplines visent non seulement à améliorer l'état des connaissances du domaine, mais aussi à servir l'objectif final qui est celui des services pour aider les personnes fragiles. Par ailleurs, ces contributions technologiques se doivent d'être robustes : dans les dernières phases de nos projets successifs, les prototypes ainsi développés ont vocation à être mis effectivement dans les mains de nos utilisateurs finaux, et expérimentés en situation réelle sur des périodes longues. Ces expérimentations ont permis de valider le choix des services, les choix de leur mise en œuvre, mais aussi de mieux comprendre les relations interpersonnelles qui se nouent autour de leurs usages. Ces observations nous ont amenées à émettre un certain nombre de préconisations précises.

Cet axe de travail atteint aujourd'hui une certaine forme d'aboutissement sur le plan de la recherche scientifique ; les éléments sont maintenant à la main du monde industriel. En parallèle de la question de recherche à l'étude, ces travaux ont été également l'occasion d'avancées sur

la méthodologie déployée : co-conception, pluridisciplinarité, ainsi que le montage d'un outil de travail spécifique aux travaux sur les technologies centrées sur l'humain, un living'lab.

Le chapitre 2 explore différentes problématiques liées à l'infrastructure Internet pour la fourniture de services de communication et de contenus multimédias, tels que ceux qui peuvent être notamment utilisés dans le chapitre 1.

Un premier axe de travail s'est intéressé à la téléphonie, ce service de télécommunication entre humains par excellence, qui a maintenant fini par migrer entièrement sur l'infrastructure Internet, et qui a parfois permis d'offrir un point d'accroche à d'autres services ; la fameuse "convergence" pour reprendre le vocabulaire alors employé. Ces changements de technologies s'accompagnent d'un changement de concept : l'essentiel de la gestion se fait en périphérie et non plus en cœur de réseau. Un des enjeux est alors d'offrir des moyens concrets à l'utilisateur pour qu'il puisse contrôler ses flux en sortie et en entrée, en fonction de ses critères de préférence et pas seulement de contraintes techniques, et pour qu'il puisse voir ses choix effectivement appliqués.

Le second axe de travail s'est intéressé à la distribution de contenus multimédia. Pour pouvoir offrir une bonne qualité de service à l'utilisateur, il s'agit d'optimiser le placement des contenus dans le réseau en fonction de critères de stockage, de bande passante, et d'estimation des demandes utilisateurs. Pour cette étude, on se place alors du point de vue de fournisseurs de contenus ou de leurs partenaires opérants des data-centers distribués.

Enfin, le troisième axe de travail s'est intéressé aux problématiques de connectivité avec accès multiples, et en mobilité. La question peut se poser éventuellement en des termes légèrement différents suivant qu'elle s'adresse à l'entreprise, la maison, le véhicule, le piéton. Mais le point commun est l'exigence sur le moyen de garder le contrôle des flux sortants et entrants, sans sacrifier la capacité à être joint directement.

Les travaux menés dans ses différents axes amènent à des propositions qui portent sur l'architecture réseau Internet, les composants à introduire, les protocoles à utiliser ou à modifier. Les résultats sont d'abord sur un plan technologique, mais apportent également des enseignements sur des principes plus généraux. Les usagers et les services viennent certes avec des exigences fonctionnelles de communication, mais de plus en plus avec des exigences sur la manière avec laquelle le service est rendu. Pour opérer effectivement cette gestion, il apparaît alors nécessaire que les différentes parties prenantes s'échangent des méta-informations (protocoles de signalisation), c'est-à-dire des informations non pas sur le contenu de la communication elle-même, mais des informations où chacun décrit ses capacités, son état, ses besoins, etc. Ces échanges de méta-informations peuvent s'orchestrer à différentes échelles de temps (flux par flux, lors de changement d'état du système, par configuration ou paramétrage statique, etc.). Certains acteurs peuvent collaborer de bonne foi autour d'objectifs communs, d'autres peuvent privilégier des objectifs particuliers ; les solutions proposées doivent être robustes à ces différents aspects. Les phases d'échanges d'information et de décision peuvent s'opérer en dehors des services de communication eux-mêmes et ne pas ralentir ni impacter l'utilisateur dans ses usages. Par contre, ces mécanismes introduisent potentiellement une complexité nouvelle. Malheureusement, pour ne pas avoir à gérer cette éventuelle complexité, il est courant de s'en remettre à la surcapacité de l'infrastructure Internet objectivement disponible aujourd'hui, et par des approches qui ne donnent pas complètement satisfaction mais qui globalement fonctionnent. On pense ici à l'hégémonie des solutions cloud, où tout est "dans les nuages" et où l'utilisateur est un consommateur. Or, la surcapacité des réseaux par rapport aux besoins n'est possiblement qu'un effet transitoire de notre époque, et d'autres préoccupations émergent comme les considérations éthiques (vie privée, données personnelles, non-traçage des activités Internet des usagers, exigence de sobriété numérique). Nos mécanismes de gestion des services de communication ont été travaillés dans des axes spécifiques, mais ont naturellement vocation

à se retrouver dans d'autres contextes, et notamment dans le domaine des services numériques pour l'aide aux personnes fragiles.

Le chapitre 3 retrace différents travaux visant à offrir un cadre de vie et un habitat plus "intelligent" aux personnes en perte d'autonomie.

La première partie de ce chapitre décrit les différentes catégories de services qui ont pu être étudiés au travers de nos projets. On identifie ainsi un échelonnement à la fois dans la sophistication des services proposés et dans la montée en autonomie des systèmes ambiants. Cela va du contrôle simple et direct sur les capteurs et actionneurs connectés, en passant par les automatismes préprogrammés, jusqu'aux algorithmes d'analyse et d'accompagnement, voire de coaching. Les services dotés d'autonomie se doivent de se montrer particulièrement précautionneux sur la question du partage de l'autorité, l'utilisateur doit garder l'initiative en toute circonstance. Il en va simplement de l'acceptabilité. Ajoutons que chacun de ces différents niveaux de service a son intérêt pour nos usagers, un système sophistiqué doit aussi proposer les fonctions élémentaires à l'utilisateur.

La seconde partie du chapitre s'intéresse aux mécanismes pratiques qui permettent de mettre en œuvre effectivement les services décrits. Le verrou technologique récurrent est celui de l'interopérabilité entre les solutions proposées par les constructeurs d'équipements connectés. En se basant sur une étude des différentes solutions existantes à ce propos, nous avons pu procéder à un découpage fonctionnel et apporter une proposition fondée sur les principes des systèmes distribués. La solution, baptisée xAAL, consiste en une architecture qui organise les élémentaires services en composants fonctionnels le long d'un bus de communication. Ainsi est défini un protocole de communication sécurisé de type passage de messages, des interfaces génériques et extensibles entre composants, et des modèles de données formels. Dès lors, chaque composant dispose des connaissances et primitives nécessaires pour découvrir et dialoguer avec les autres composants qui participent au système global. En plus de l'interopérabilité, la solution présente diverses propriétés : facilité pour intégrer et déployer de nouveaux équipements, extensibilité, robustesse du système global, efficacité des communications, maîtrise des données personnelles.

Enfin, la troisième partie du chapitre explore différentes techniques d'analyse des données produites par l'utilisateur au sein de systèmes ambiants. L'ambition est de pouvoir doter le système de capacité de compréhension de ce que fait l'utilisateur, compréhension à la base de services plus évolués. La littérature est riche de solutions utilisant des caméras et des algorithmes de vision par ordinateur, qui donnent de très bons résultats, mais dont l'usage se heurte aux questions d'acceptabilité. Des solutions à base de capteurs portés sont également intéressantes, mais renvoient généralement à des services autour de l'analyse de la marche, de l'activité physique, de capteurs physiologiques, du médical ou paramédical. Aussi, nos études se focalisent sur les capteurs ambiants, jugés plus acceptables, moins invasifs, et dont la granularité d'analyse des activités humaines ainsi reconnues convient bien aux niveaux de services que l'on vise. Les algorithmes étudiés se confrontent à des défis spécifiques : les données sont plutôt assez peu nombreuses, chacune est peu porteuse d'information (un capteur d'ouverture en dit moins qu'une caméra filmant le geste), et si la temporalité a de l'importance ces données sont sporadiques et événementielles. Les travaux actuellement menés ont donc cherché comment les techniques et algorithmes d'IA pouvaient être exploités ou combinés pour procéder à la reconnaissance d'activités humaines par des systèmes ambiants. Les résultats sont particulièrement prometteurs et permettent d'envisager effectivement un usage en temps réel dans des solutions embarquées au domicile, dans le respect de la vie privée.

Perspectives

Services ambiants intelligents

Pour accompagner les personnes dépendantes dans leur quotidien, les systèmes ambiants ont un rôle majeur à jouer. L'ambition aujourd'hui est de doter ces systèmes de capacités pour comprendre l'utilisateur humain (à des degrés divers, inférer les habitudes de vie, reconnaître les activités en cours, etc.). Les premiers travaux autour des algorithmes d'IA sont particulièrement prometteurs. Tout naturellement il convient de poursuivre les travaux en ce sens. Le domaine est particulièrement actif et le contexte des données de capteurs ambiants vient avec son lot de spécificités ; aussi, les approches classiques d'IA doivent être adaptées. En premier lieu, il convient d'explorer plus avant les techniques d'encodage pour exploiter au mieux l'information portée par les capteurs ambiants (en s'inspirant des graphes de connaissances, ou d'autres approches provenant du traitement du langage naturel). Ensuite, les approches d'apprentissage fédéré offrent possiblement un vrai intérêt dans notre contexte (plusieurs maisons apprenant ensemble à reconnaître les activités de leurs occupants), il convient de les expérimenter. Enfin, la disponibilité et la qualité de nos données d'apprentissage étant une problématique en soi (peu massives, grande variabilité, nécessité de temps long, labellisation humaine sujette aux dérives, etc.), différentes stratégies peuvent être développées : techniques d'augmentation de données (méthodes génératives, réutilisation d'auto-encodeurs, etc.), ainsi que des techniques pour synthèse de données en exploitant les approches de type jumeau numérique.

La mise au point d'algorithmes d'IA doit inclure d'autres enjeux que l'amélioration de la performance brute des calculs. En premier lieu, les questions de respect de la vie privée imposent que les données et analyses doivent être traitées dans des plates-formes de confiance. Si les approches "dans les nuages" ne sont pas nécessairement à exclure d'entrée de jeu, il convient de les considérer avec précaution. De cette préoccupation émergent les approches de type "edge computing". On quitte ici les questions d'IA pour revenir aux questions d'architecture logicielle et de plate-forme d'exécution. L'objectif est que l'utilisateur puisse souscrire à de nouveaux services nécessitant d'une part l'exploitation de ses propres données et d'autre part des traitements possiblement coûteux en calculs (algorithmes d'IA), mais que cela soit réalisé au plus près de l'utilisateur, typiquement en utilisant les équipements qui sont à sa main (box, smartphone, etc.). Pour ce faire, il convient de repenser l'écosystème des équipements utilisateurs en termes de plate-forme distribuée ouverte (des équipements aux caractéristiques variés tant du point de vue technique que des usages), et orchestrer l'exécution des traitements souhaités sur les données à disposition. Aujourd'hui, ces questions sont abordées selon deux axes : décliner des solutions cloud en des variantes plus ou moins allégées parfois appelées "cloudlet" (allocation dynamique de machines virtuelles, migration, etc.), et proposer des variantes d'algorithmes d'IA pour de l'embarqué (compression de modèles, élagage, distillation, etc.). En fait, ces approches présupposent une plate-forme d'exécution certes contrainte mais connue à l'avance et maîtrisée dès la conception du service, et pas seulement au moment du déploiement voire de l'exécution. Elles s'accrochent donc mal à un écosystème constitué d'équipements utilisateurs. Aussi, il convient de repenser l'approche sous l'angle du déploiement dynamique de composants logiciels sur une plate-forme d'exécution distribuée ouverte, avec des problématiques de modélisation des traitements, des données, du matériel.

Enfin, il est primordial de conduire des expérimentations en situation réelle. Ces algorithmes d'IA affichent tous des performances remarquables, du moins lorsque l'on conduit des mesures sur des datasets, sur ordinateur, en laboratoire. Il convient de ne pas perdre de vue que ces algorithmes ont pour vocation d'équiper des services à offrir aux utilisateurs. Et la performance brute d'un algorithme n'est pas la seule condition du succès. Aussi, il convient de produire des prototypes fonctionnels robustes, complets (calculs et services), qui puissent ainsi être expérimentés auprès d'utilisateurs en situation réelle. L'objectif est alors d'évaluer l'acceptabilité,

l'utilisabilité, le bénéfice perçu, et le cas échéant de pouvoir rephaser les services rendus avec les besoins.

Robotique d'assistance

Depuis plusieurs années maintenant a émergé l'idée que des robots d'assistance pouvaient réellement faire leur entrée dans le quotidien et le domicile des usagers. (Ainsi, notre équipe s'est dotée d'un robot Nao dès 2013, puis d'autres robots avec le projet VITAAL 5.3.7). La question a plusieurs facettes. D'abord d'un point de vue technique, il y a l'idée de rapprocher le robot et l'infrastructure domotique : soit considérer que c'est un objet certes un peu plus "intelligent" que les autres mais un équipement ambiant quand-même et pleinement intégré à cette infrastructure, soit considérer au contraire que l'infrastructure domotique en elle-même est comparable à un robot car dotée de ses caractéristiques clefs (percevoir - décider - agir) avec une intégration entre les deux basée sur une approche multi-robots. Ensuite, il y a le point de vue des usages attendus de ces robots, ce qui amène à distinguer d'une part les robots compagnons humanoïdes conçus pour des interactions aussi fluides et naturelles que possible avec des humains, et d'autre part des plates-formes robotiques pas nécessairement avenantes mais dédiées à l'exécution de tâches domestiques pratiques (plate-forme mobile, bras préhenseur, etc.). Pour le moment, les avancées en mécatronique font que les deux types d'usages sont assurés par des robots très différents (p.ex. les robots au design humanoïde impliquent des choix techniques et mécaniques qui ne leur permettent pas vraiment porter des objets usuels, et inversement des plates-formes robotiques équipées de bras préhenseurs performants sont des objets suscitant difficilement sympathie ou empathie). Mais même si ces deux types de robots venaient à converger, il conviendrait de distinguer les deux familles de services.

Fort de ces considérations, des travaux ont été initiés pour intégrer les équipements robotiques dans nos solutions pour aider au quotidien des personnes en perte d'autonomie. Un premier ensemble d'études s'intéresse aux compétences internes de ces robots, notamment les algorithmes de perception et de décisions (voir sections 6.7 6.9). Un second ensemble d'études porte sur l'intégration de robots dans des services pour l'utilisateur que ce soit pour l'accomplissement de tâches quotidiennes ou pour du coaching (voir sections 6.4 6.5). L'ambition est de faire progresser ces axes de front.

Le premier ensemble d'études part du constat que les solutions robotiques actuellement disponibles sur étagère doivent encore gagner en fonctionnalités et en autonomie. Il convient donc d'améliorer ces dispositifs en eux-mêmes. Par exemple, si les capacités des robots à cartographier et à naviguer dans une pièce ont beaucoup progressé, elles restent encore très en deçà de celles d'un humain. Il est de fait compliqué d'assurer un service où un robot se déplacerait côte à côte avec un utilisateur, à son rythme, et en confiance ; car il s'agit bien là du niveau de service espéré. Autre exemple, il peut être attendu d'un robot qu'il perçoive son environnement, pas seulement par des caractéristiques géométriques ou matérielles, mais également en associant une signification aux objets et aux situations. On pense ici aux relations que ces objets peuvent avoir entre eux, les usages et effets qui peuvent leur être associés, et possiblement dans un contexte de nouveauté. Notre équipe de recherche RAMBO s'est étoffée en compétences en ce sens, qu'il est dès lors naturel d'accompagner dans cette perspective de robotique d'assistance pour l'accompagnement de personnes fragiles.

Le second ensemble d'études porte sur la coopération des systèmes robotiques avec les autres systèmes ambiants autour de l'utilisateur. Le constat est qu'aujourd'hui les solutions intégrant des robots sont conçues de manière complètement ad hoc et fermées. Il convient donc de faire évoluer cette situation pour espérer que les robots compagnons puissent réellement prendre une place au sein des solutions d'assistance dans des scénarios globalisés : l'utilisateur qui fait face à de nouveaux besoins doit pouvoir bénéficier librement de services robotiques qui viennent en complément de

ceux existants, sans devoir se ré-équiper complètement. Cette souplesse implique nécessairement de dépasser les approches ad hoc, et typiquement d'introduire la notion d'interface. On revient là à des questions d'architecture logicielle. Le robot, vu comme un composant, doit présenter une interface vis-à-vis de l'extérieur pour pouvoir être intégré dans un système plus large (et possiblement avec certaines propriétés comme la reconfiguration dynamique, c.-à-d. certains composants peuvent apparaître ou disparaître en cours de route). De telles interfaces doivent spécifier les capacités du robot et les modèles de données requis pour le solliciter. Les capacités en question doivent être formalisées et génériques. Chez un robot elles peuvent avoir trait à des compétences physiques (se déplacer, prendre et poser un objet, etc.) ou cognitives (reconnaître un objet, un lieu, etc.). D'une certaine manière, il s'agit là de décliner la méthodologie qui a été suivie avec xAAL pour la domotique, mais pour des robots, et donc avec un échelon de complexité accrue.

Chapitre 5

Projets

Mes activités de recherches ont été menées dans le cadre de projets contractuels. Ils s'articulent autour de trois axes : (i) le génie logiciel et l'aide à la conception de systèmes embarqués, (ii) les services de communication et distribution de contenu, (iii) et les systèmes innovants pour l'assistance aux personnes fragiles qui englobent les services relationnels sur télé connectée, les systèmes ambiants domotiques, et dans une certaine mesure la robotique d'assistance.

5.1 Aides à la conception de systèmes embarqués

5.1.1 AMIGOS (GET, 2006-2007)

AMIGOS (Analyse et Modélisation des Systèmes d'Exploitation) est un projet financé par le GET (Groupe des Écoles de Télécommunications). Il s'inscrit dans le programme du GET pour le soutien aux jeunes chercheurs. Il s'agit du premier projet que je mène au sein de l'ENST Bretagne. J'assure la responsabilité administrative pour l'ENST Bretagne.

Ce projet vise à définir un profil UML formel prenant en compte explicitement les caractéristiques logiques et temporelles des systèmes d'exploitation. L'accent est mis sur la modélisation et validation des systèmes embarqués. Il s'inscrit en cela dans la continuité des travaux de thèse. Un profil UML appelé TURTLE-OS est défini et permet d'exprimer les contraintes temporelles matérielles et logicielles de ces systèmes. Les outils de vérification formelle développés précédemment sont étendus et exploités pour conduire la validation de preuves.

Consortium : ENST Bretagne, ENST Paris, EURECOM.

5.1.2 SPaCIFY (ANR, 2007-2009)

Le projet SPaCIFY est labellisé par le Pôle de Compétitivité AeroSpace Valley et est financé par l'ANR. C'est un projet de recherche et développement qui a pour but la conception et le développement de logiciels critiques embarqués. Il s'intéresse à l'ingénierie des modèles et méthodes formelles intégrées pour le développement des logiciels de vol spatial.

Notre équipe se focalise sur la plate-forme d'exécution des logiciels de contrôle de satellites en incorporant le support de la reconfiguration à chaud du logiciel, c'est-à-dire la capacité à mettre à jour ou étendre un système logiciel sans en interrompre l'exécution ni dégrader les services qu'il offre. La contribution porte d'une part sur les questions de modélisation (structuration des services et du comportement lors de la reconfiguration), mais aussi sur les techniques pour l'implémenter, que ce soit à l'aide de langages facilitant l'introspection comme Camel ou avec le chargement de libraires dynamiques en C.

Consortium : Anyware Technologies, Astrium EADS, CERT Onera, CNES, ENST Bretagne, IRISA, IRIT ENSEEIHT, LABRI, Thales Alenia Space, TNI Software.

5.2 Services de communication et distribution de contenu

5.2.1 Companym@ges (FUI, 2007-2009) - Sous-projet MONA

Companym@ges a été labellisé par le Pôle de Compétitivité Images et Réseaux, et est financé par la DGE et les collectivités de la Région Bretagne.

Le projet Companym@ges fournit une plate-forme multimédia ainsi que des services sur cette plate-forme. Les services Companym@ges sont soit des services de données, soit des services multimédias reposant sur la signalisation SIP.

Les entreprises sont reliées au reste du monde par différents accès réseau, et les utilisateurs de la plate-forme peuvent même accéder au serveur de téléphonie de manière nomade. Il est donc nécessaire de permettre à l'entreprise de mettre en œuvre des règles et politiques pour optimiser l'utilisation de ses différents liens d'accès.

L'objectif de MONA (Module to Optimize Network Accesses), un sous-projet de Companym@ges, est de gérer les flux de l'entreprise au niveau de ses réseaux d'accès. MONA est chargé d'assurer la sécurité de l'ensemble du trafic réseau à la frontière interne-externe de l'entreprise. Pour le trafic de données, cela est effectué par un pare-feu. Pour le trafic multimédia, cela est effectué par l'équipement appelé Session Border Controller (SBC), qui est un élément clé dans les architectures multimédias IP. MONA est également chargé de contrôler le routage des flux multimédia sur les accès réseau disponibles et de procéder à des choix des accès en fonction de politiques de routage et d'administration.

La contribution a porté sur la définition de règles et politique de routage des flux associées aux profils utilisateurs et profils de coûts des liens réseau. Des extensions au protocole Diameter et au protocole SIP pour implémenter ces politiques de routage au niveau du SBC, tant pour les flux entrants que sortants. C'est dans ce contexte que s'est déroulée la thèse de Sajjad MUSHTAQ (section 6.1).

Consortium : Alcatel Lucent, ENST Bretagne, NeoTIP / Comverse, Nexcom System.

5.2.2 Vipeer (ANR, 2010-2013)

Le projet Vipeer (VIdéo Traffic Engineering in an Intra-Domain Context using Peer-to-Peer Paradigms, ingénierie du trafic vidéo en intradomaine basée sur les paradigmes du pair à pair) est un projet supporté par le programme ANR VERSO.

L'objectif principal du projet Vipeer est de fournir des méthodes permettant à un opérateur de réseau d'avoir un contrôle explicite sur les flux de trafic liés à la distribution vidéo. Vipeer s'appuie sur la collaboration entre un CDN traditionnel (Content Delivery Network) et un CDN assisté par les pairs ou "CDN distribué" (dCDN), c'est-à-dire un overlay contrôlé par l'opérateur de réseau en utilisant des paradigmes P2P. Les pairs du dCDN peuvent être des éléments de réseau tels que des nœuds de réseau, ou bien des boîtiers situés chez les clients. Dans ce dernier cas, le boîtier est en fait partagé entre une partie privée qui est directement sous le contrôle du client et une partie publique qui est gérée au sein de l'overlay, par l'opérateur réseau.

Les contributions ont porté sur la définition et le prototypage de l'orchestration entre les différents serveurs de l'architecture technique et le recours aux mécanismes de redirection HTTP

appliqués aux ressources décrites dans les manifestes MPEG-DASH lors de la requête d'un client.

Consortium : Envivio, Eurecom, Irisa, NDS, Orange, Télécom Bretagne.

5.2.3 TMS (FUI, 2011-2014)

Le projet TMS (Terminal Marine Stabilisé), soutenu par le Fonds unique interministériel (FUI) et labellisé par le Pôle Images et Réseaux et le Pôle Mer Bretagne Atlantique, vise à réaliser un terminal donnant accès aux réseaux haut débit sans fil à des utilisateurs naviguant dans la zone maritime côtière (jusqu'à une dizaine de milles nautiques). Le terminal TMS cible l'ensemble des usagers de la zone côtière (plaisanciers et professionnels) et toutes les applications liées au haut débit, dont les applications de sécurité maritime pour lesquelles l'amélioration des communications terre-mer est un point crucial.

Il s'agit de développer et de mettre en œuvre de terminaux marins équipés de systèmes de stabilisation d'antennes permettant une communication très haut débit (notamment 4G/LTE) sur les zones portuaires et la bande côtière (20 à 30 kms).

Le sous-projet "Routeur Intelligent" du projet TMS vise à concevoir et prototyper un module autonome de sélection de réseau d'accès (liaisons satellites, LTE, WiFi, etc.). Il s'agit de commander le routage des applications IP afin de sélectionner le réseau d'accès optimal. Pour ce faire, les différentes architectures pour la mobilité dans les réseaux IPv4 & IPv6, réseaux véhiculaires, et pour les accès multi-liens ont été investiguées. Une solution originale combinant les protocoles NEMO et MPTCP a été proposée. C'est dans ce contexte que s'est déroulée la thèse de Pratibha MITHARWAL (section 6.3).

Consortium : Alcatel Lucent, Deti SA, Ifremer, Imagin'Lab Images et Réseaux, Satimo, Thales Communication & Security, Télécom Bretagne, TES.

5.3 Assistance aux personnes fragiles

5.3.1 M@LIS (SFR, 2006-2007)

Le cahier de vie M@LIS (M@intien du Lien Social), soutenu par le Fonds de Soutien SFR, vise à faciliter la communication entre des parents et leur enfant souffrant de troubles psychomoteurs et/ou psychocognitifs, en utilisant comme lien, la photo numérique, les séquences vidéo et les messages multimédias, comme éléments instantanés de la vie et de l'activité, dans le plus possible de lieux, d'instantanés et de situations. Afin de rendre le dispositif simple d'accès et d'utilisation pour l'enfant et les parents, l'idée est d'utiliser comme support de diffusion des objets du quotidien à savoir la télévision, une télécommande et le téléphone portable.

Dans ce projet, l'Atelier de Recherche Sociologique de l'Université de Bretagne Occidentale y apporte ses compétences dans les phases d'enquêtes et d'analyse des besoins.

Ce projet est une variante d'un précédent projet porté par l'équipe : le projet T@PA, et partage la même souche technique. Les usagers de T@PA sont des personnes âgées à domicile (une expérimentation est dans le quartier de Bellevue à Brest) qui aiment recevoir des contenus de leurs proches (messages, photos, vidéo). On peut également mentionner un autre projet de l'équipe, le projet T@PA-Lannilis qui s'adresse à des personnes âgées hébergées en EHPAD (expérimenté à Lannilis).

Dans le cadre du projet M@LIS, les usagers sont des enfants qui aiment recevoir des contenus liés à leurs centres d'intérêt (p.ex. animaux) postés par des proches, qui aiment se revoir avec un regard extérieur au travers de photos et vidéos prises lors de leurs activités au centre de

rééducation, et également montrer leurs capacités à leurs proches, parents, frères et sœurs. La réponse technique est globalement la même que T@PA : une box télé (un mini-pc silencieux), une télécommande ergonomique, et une architecture client-serveur modulaire (les fonctionnalités génériques sont préinstallées sur la box, les services spécifiques à chaque utilisateur sont téléchargés dynamiquement).

Ce projet suit une démarche de co-conception : les usagers sont associés tout au long du projet. Très en amont, et sous l'égide des collègues sociologues, les usagers et leurs proches sont questionnés sur leurs besoins et envies. Par des allers-retours avec les propositions des informaticiens, le bouquet de services à offrir et la plate-forme technique se dessinent. Une fois l'implémentation mature, le système est testé en situation réelle sur de longues périodes auprès d'un panel d'utilisateurs, et toujours en accompagnement de la part des collègues sociologues. Après plusieurs mois d'expérimentation, comme pour T@PA, il a été constaté un réel bénéfice pour les utilisateurs par les parents et le personnel du centre de rééducation (animateurs et enseignants, le personnel médical se montrant distant).

La démarche de co-conception place les usages aux cœurs des travaux.

Consortium : Atelier de Recherche Sociologique UBO, ENST Bretagne, Institut d'Éducation Motrice (IEM) du Centre Mathieu Donnart (LADAPT).

5.3.2 Companym@ges (FUI, 2007-2009) - Sous-projet AIPA

Le projet Companym@ges, labellisé par le Pôle de Compétitivité Images et Réseaux et financé par la DGE et les collectivités de la Région Bretagne, vise à développer une plate-forme de services innovants basés sur l'image : aide par l'image aux personnes dépendantes, maintenance vidéo assistée par l'image, télévision interactive couplée au service communication d'un service clientèle, etc.

Le sous-projet AIPA (Aide par l'Image aux Personnes Agées) a pour objectif de développer une plate-forme générique, capable d'accueillir un ensemble de services identifiés par les sociologues en liaison étroite avec les personnes âgées et les professionnels de la santé. Le projet inclut une phase d'expérimentation de six mois au sein d'une résidence de personnes âgées du quartier de Bellevue à Brest (EHPAD de Kerlevenez). Ce quartier a été retenu car il avait été le terrain d'expérimentations précédentes sur ce sujet (projet T@PA). Notre équipe a tissé des liens avec plusieurs acteurs, mairie de quartier, associations, services sociaux, etc.

Le projet suit également une méthodologie de co-conception pluridisciplinaire avec les sociologues de l'UBO, qui aident à tisser le lien entre les usagers et les informaticiens, tant pour la phase de définition de la solution que pour la phase d'expérimentation en situation réelle. Les ergonomes de Dixid aident à la définition des interfaces utilisateur pour personnes âgées sur téléviseur ; la souche technologique s'appuie sur les technologies Alcatel-Lucent pour les solutions réseau et serveur, le stockage et réplique de données avec Active-Circle, la gestion des sessions multimédia avec Comverse et NextiraOne, la box télé de Iwedia, et Le Télégramme apporte du contenu.

En parallèle de ce projet, notre équipe met en place un living'lab (laboratoire du vivant), nommé Experiment'HAAL. Concrètement il s'agit d'un espace aménagé comme un petit appartement (coin cuisine, pièce d'eau, coin salon télé) dans lequel nous déployons nos solutions techniques et invitons des personnes âgées volontaires pour tester nos dispositifs. Il s'agit de valider les fonctionnalités et l'ergonomie de nos prototypes avant un déploiement sur le terrain.

La longue phase d'expérimentation en situation réelle impose un haut degré de maturité du prototype déployé, mais a permis de valider la pertinence de la solution.

Consortium : Active Circle, Alcatel Lucent, Atelier de Recherche Sociologique UBO, Comverse, Dixid, ENST Bretagne, Iwedia, Le Télégramme, NextiraOne.

5.3.3 SIGAAL (FUI, 2009-2012)

Le projet de SIGAAL (Services Inter Générationnels pour l'Assistance aux Aînés dans leur Logement) a été labellisé par le Pôle Images et Réseaux, et est porté par la DGCIS et les collectivités locales. J'assume la responsabilité du projet pour Télécom Bretagne.

Ce projet a pour objectif de limiter la solitude chez les personnes âgées en leur offrant des services permettant, pour un faible coût, de maintenir ou même de renforcer le lien social et de détecter des fragilités naissantes des personnes âgées.

Ce projet intègre deux thématiques : d'une part les services relationnels sur la télévision dans la continuité des projets T@PA et Companym@ges-AIPA, et d'autre part des services domotiques apportés par le CSTB et DeltaDore avec une préoccupation d'actimétrie. Notons que l'état de l'art d'alors ne permet pas une analyse fine des activités quotidiennes des personnes à domicile ; la métrique concrètement exploitable est le temps passé par l'utilisateur dans chaque pièce ou à l'extérieur de l'appartement, un indicateur à gros grains du degré de mobilité, voire de bien-être.

Techniquement, la solution proposée repose sur l'utilisation de deux box : une box télé et une box domotique. Un certain nombre d'architectures différentes sont étudiées, et plusieurs arguments ont poussé à l'utilisation de deux box plutôt qu'une seule (par exemple la box télé peut naturellement être éteinte, alors que la box domotique doit rester en activité). Ces deux box doivent cependant être interconnectées en réseau, et des études sont menées sur la question des protocoles domotiques sur IP et conduisent à choisir un protocole existant (xAP), dont les limitations motivent la conception d'une alternative, notre protocole xAAL.

Le projet déroule une démarche de co-conception, avec des acteurs multiples : promoteur immobilier, collectivités locales, compagnie d'assistance, fournisseur de contenu, gériatres, sociologues, représentant des usagers. Ce projet offre également l'opportunité aux collègues de Télécom Bretagne de mener des travaux scientifiques dans leurs domaines respectifs : composants logiciels pour l'adaptation de services, analyse des usages de consommation de contenus textuels sur un écran, analyse des modèles économiques des dispositifs de santé.

Après un passage de notre prototype dans notre living'lab, une longue phase d'expérimentation en situation réelle est conduite dans deux appartements sociaux à Chevilly-Larue mis à disposition par Icade. Les bailleurs sociaux et l'équipe de sociologues choisissent deux candidats testeurs aux profils, à l'environnement familial, et aux parcours très différents. Sans surprise, le bénéfice constaté par les sociologues est varié. L'intérêt de tels services est avéré et met en avant la nécessité de contenus réguliers et personnalisés.

Consortium : AgeVillage, Atelier de Recherche Sociologique UBO, CHU Nice, CSTB, DeltaDore, Elderis, Icade, Iwedia, Juxy, Le Télégramme, Mondial Assistance GTS, Nexcom System, Niji, Télécom Bretagne, Université de Nice Sophia Antipolis (UNSA), Voxygen.

5.3.4 Mazadoo 2.0 (DGCIS, 2010-2012)

Le projet Mazadoo («mes aïeux» en breton) a été labellisé par le Pôle Images et Réseaux et est supporté par la DGCIS dans le cadre de l'appel Web innovant. Il a pour objectif de développer des services Web 2.0 innovants à destination d'une population spécifique que sont les personnes âgées en institution. Ces services visent à maintenir le lien social, créer des réseaux sociaux, tisser des liens intercommunautaires.

Ce projet se monte dans la continuité du projet Companym@ages-AIPA, avec un groupe de partenaires plus resserré, et en parallèle du projet SIGAAL. L'ambition est de consolider le principe de services relationnels sur la télévision pour personnes âgées. La démarche de co-conception est également bien maîtrisée. Elle aboutit à une solution technique légèrement différente : le projet s'appuie sur Facebook. On entre de plain-pied dans la mouvance des réseaux sociaux. Les sociologues découvrent un phénomène : les réseaux sociaux, avec leur lot de fantasmes et de craintes, laissent de marbre les personnes âgées, sont parfaitement maîtrisés par les petits-enfants, mais effraient la génération intermédiaire. Des sessions de formation (et de démystification) sont organisées. Mazadoo a permis de mettre en relation des personnes âgées avec leurs petits-enfants, plutôt avec leurs enfants.

Notre living'lab offre un premier terrain d'expérimentation pour valider les fonctionnalités et l'ergonomie auprès d'un panel d'utilisateurs, des personnes âgées volontaires. Le dispositif est ensuite testé pendant de longs mois à la maison de retraite de Kerlevenz à Brest et à la résidence Saint-Anne à Lannion, avec des témoignages élogieux des participants, personnel en charge de l'animation, et même du corps médical.

Les problématiques techniques de type box télé, systèmes embarqués, interfaces graphiques pour personnes âgées sur télévision sont maintenant bien maîtrisés. Mais apparaissent d'autres problématiques : l'instabilité et le manque de maturité technique de Facebook et de ses interfaces de programmation. Finalement, de cet engouement pour les réseaux sociaux on retiendra avant tout les usages, plus que les solutions technologiques des grands acteurs du domaine.

Consortium : Alcatel Lucent, Carpe Diem Finistère, Imagin'Lab Images et Réseaux, Iwedia, Lannion Tregor, Le Télégramme, Niji, SmarDTV, Télécom Bretagne.

5.3.5 AMALYS (ANR, 2011-2013)

L'objectif du projet Amalys («Aides au Maintien du Lien social des Séniors»), soutenu par l'ANR, est d'amener à maturation une partie des six années de recherche et d'expérimentations réalisées par notre équipe, et de procéder à un transfert technologique vers une start'up Elderis. Le produit s'adresse aux personnes âgées et/ou dépendantes vivant en institution ou à domicile ; il veut leur offrir des services d'aide par l'image via le média privilégié aujourd'hui par cette population : la télévision.

L'entreprise Elderis est fondée par des ingénieurs et l'ancien directeur technique de SmarDTV, qui a racheté Iwedia, deux entreprises spécialisées dans les décodeurs et box télé avec lesquelles notre équipe a beaucoup interagi dans de précédents projets collaboratifs. Concrètement, ce transfert technologique se traduit par un ingénieur de Elderis venant passer plusieurs mois à plein temps dans notre laboratoire pour acquérir les compétences développées, et les porter dans la propre offre de Elderis. Pour notre équipe, c'est un aboutissement de nos travaux sur la thématique du lien social et des services relationnels sur la télé.

Consortium : Alcatel Lucent, Alyacom, Carpe Diem Finistère, Elderis, LC&I / Lagassé, Télécom Bretagne, Incubateur Télécom Bretagne.

5.3.6 PRECIOUS (FP7, 2014-2016)

PRECIOUS (PREventive Care Infrastructure based On Ubiquitous Sensing) est un projet européen FP7. Il a pour objectif de fournir un système préventif pour la santé et la promotion de modes de vie sains. Il se compose de trois éléments : (i) des capteurs discrets pour monitorer des indicateurs de santé (alimentation, sommeil, activité physique) qui fournissent des données sur le comportement de l'utilisateur ; (ii) une modélisation individuelle des utilisateurs qui permet

de déduire des risques sanitaires et les changements de comportement souhaités; et (iii) des techniques de coaching et de motivation (basées sur des jeux et des entretiens) pour déclencher des rétroactions et modifier les habitudes de l'utilisateur vers un comportement plus sain.

Le projet PRECIOUS aborde des cas d'usage légèrement différents des précédents sujets traités par l'équipe. Il s'agit de traiter des facteurs de risques de maladies chroniques (diabète, maladies cardio-vasculaires). Le projet ne vise pas nécessairement les personnes âgées, mais des usagers aux profils variés, éventuellement de jeunes adultes, généralement sédentaires, aux comportements alimentaires problématiques, amateur de tabac ou d'alcool. Il s'agit de fournir aux usagers des métriques objectives de leur qualité de vie et de réinscrire leurs habitudes dans un cercle vertueux. Le projet s'inscrit dans le domaine de la santé et du bien-être sans rentrer dans les problématiques médicales où les contraintes d'expérimentations et exigences réglementaires sont très élevées.

Dans le projet, l'équipe est chargée de la solution permettant d'évaluer la qualité de l'environnement au domicile (température, humidité, poussières, niveau sonore, lumineux, etc.). De fait, le projet nous permet d'explorer plus avant les travaux sur les systèmes domotiques sur IP, sujet initié lors du projet SIGAAL, et poursuivi hors-projet entre temps. Notre protocole xAAL est ainsi mis au point et de premières versions sont prototypées, avec toute la chaîne depuis les capteurs jusqu'aux services, avec un accent particulier sur le respect des données personnelles et de l'éthique (les données ne sortent pas de la maison, sauf agrégées et filtrées par les préférences utilisateurs, et en retour les actionneurs dans la maison ne sont pas télé-opérés depuis le serveur dans le cloud, mais déclenchés localement).

La solution xAAL et services de PRECIOUS sont déployés dans notre living'lab. Un panel de testeurs est invité à les expérimenter et à se prêter au jeu de questionnaires et interview. Cela nous permet de valider notre proposition et notamment les dispositifs de retour d'information et coaching à l'utilisateur (messages sur la télé, smartphone, objets connectés, luminaires, etc.).

Consortium : Aalto University, Campden BRI, EuroFIR, Firstbeat, Télécom Bretagne, University of Helsinki, University of Vienna, Vall d'Hebron Institute of Research (VHIR).

5.3.7 VITAAL (CPER, 2015-2020)

Le projet VITAAL (Vaincre l'isolement par les TIC par l'«Ambient Assisted Living»), financé par le Contrat de Plan État-Région Bretagne 2015-2020 dans la catégorie «équipements scientifiques pour la recherche», a pour objectif principal de lutter contre l'isolement grâce à l'exploitation des nouvelles technologies et services du numérique dans un contexte de santé et bien-être. Dans nos sociétés modernes l'isolement, qu'il soit matériel (géographique, physique) ou ressenti (sentiment d'isolement des personnes fragiles) est un problème croissant.

Sur le volet isolement matériel, le projet s'intéresse en particulier à l'isolement de personnes vieillissantes, handicapées, ou souffrant de pathologies diverses et qui sont éloignées des centres de soins. Les outils numériques sont alors destinés à améliorer le confort, à virtualiser une relation qui n'est pas possible physiquement, à permettre les soins ou l'intervention de personnels de santé à distance.

Le projet fédère les initiatives de plusieurs équipes du Lab-STICC (UMR 6285, CNRS) (IMT Atlantique (anciennement Télécom Bretagne), UBS, UBO, ENIB, ENSIBS) et du LATIM (INSERM) (services de rééducation fonctionnelle et d'ophtalmologie du CHRU de Brest).

Le projet VITAAL se décline en quatre axes :

- Analyse d'activité à domicile : Concevoir une maison intelligente pour les personnes fragiles et proposer des services d'assistance à la personne.
- Nouveaux environnements interactifs d'accompagnement : Compagnons artificiels et nouveaux dispositifs de communication.

- Télé-rééducation fonctionnelle : Développer des systèmes portables et agréables de stimulation de l'activité des personnes âgées ou handicapées.
- Télé-rééducation visuelle : Concevoir une plate-forme de télé-orthoptie permettant la rééducation de la vision pour les personnes âgées ou handicapées

Le CPER VITAAL est, au sein de l'action transverse HAAL du Lab-STICC, un projet fédérateur autour de la santé et du bien-être, de l'assistance aux personnes fragiles. Ce projet est l'occasion de renforcer les liens entre établissements (ENIB, UBO, UBS, Kerpape). Le projet adresse les questions de lien social, des plates-formes de télé-médecine (ou de domo-médecine), de domotique, d'actimétrie, de robotique, etc. Les projets de type CPER permettent de financer de l'investissement. Il permet à l'équipe d'équiper de manière conséquente notre living'lab Experiment'HAAL.

Ce projet est un levier pour procéder en parallèle à des montages de projet permettant le financement de personnel et donc d'actions, ou parfois à travers de simples projets étudiants. Cela permet notamment de renforcer certains domaines (domotique, actimétrie). C'est également l'occasion de se plonger dans un nouveau domaine : la robotique d'assistance. La robotique d'assistance nous paraît être un domaine et une réponse pertinente aux problématiques des personnes fragiles.

Consortium : CHU Brest, ENIB, IMT Atlantique, Kerpape, UBO, UBS.

5.3.8 SolSens (IMT, 2017-2018)

Le projet SolSens (Sol Sensitif), du Fond d'Amorçage IMT Santé Autonomie et Qualité de Vie, se propose d'introduire et mettre en œuvre à l'aide du sol sensitif une approche innovante de suivi et de prévention d'états cognitifs et actimétriques potentiellement fragiles chez la personne âgée. Pour ce faire nous nous proposons de créer des serious games qui "s'appuient" sur le sol sensitif pour des personnes atteintes de troubles cognitifs, s'accompagnant généralement de difficultés de se mouvoir dans l'espace (problèmes de démarche et d'équilibre).

Ce fonds d'amorçage accompagne les projets fédérant des équipes de différentes écoles de l'IMT travaillent sur les questions de santé bien-être. En l'occurrence, nos équipes sont déjà fédérées au travers du projet SHELL qui met en réseau les différents living'labs santé-autonomie des écoles de l'IMT. Le projet SHELL permet de structurer, mais le Fonds d'Amorçage permet de financer des activités communes.

Les travaux du projet SolSens portent sur l'utilisation d'un sol sensitif pour mesurer la qualité de la marche des personnes âgées, et proposer des jeux sérieux pour renforcer cette aptitude. Le tapis de marche sensitif avait été acquis grâce au CPER VITAAL. Le fonds d'amorçage a permis de financer quelques mois d'un jeune ingénieur pour implémenter le démonstrateur.

Ce projet est l'occasion de renforcer les liens entre collègues de l'IMT. Il permet également de nouer de nouveaux contacts et partenaires apportés par les uns et les autres. C'est potentiellement un tremplin pour de nouveaux montages de projets.

Consortium : CHU Brest, Essilor, Future Shape, IMT, IMT Atlantique, IMT Lille Douai, IMT Mines Ales, Telecom Sud Paris, Trecobat, Institute for New Media & Information Systems of Siegen University.

5.3.9 Chaire M@D (2017-2021, 2022-2024)

La chaire M@D (Maintien à Domicile) est un projet mené conjointement par l'ENSIBS (école d'ingénieurs de l'Université Bretagne Sud) et IMT Atlantique, en partenariat avec le centre de rééducation de Kerpape.

La problématique soutenue par la Chaire M@D concerne l'accompagnement des personnes dans leur habitat, en situation de handicap ou en perte d'autonomie, dans un contexte global de maintien à domicile. Elle contribue au développement des activités de recherche et de formation pour :

- faciliter le maintien à domicile le plus longtemps possible selon le souhait des personnes, en étudiant, développant, testant des équipements et/ou des services aidant les personnes dans les gestes de la vie quotidienne ;
- lutter contre l'isolement (physique, cognitif, affectif et ressenti) des personnes, grâce à l'exploitation des nouvelles technologies et services du numérique dans un contexte de santé et de bien-être.

L'activité de la chaire s'appuie sur les living'lab de IMT Atlantique, de l'ENSIBS et du centre de rééducation de Kerpape.

Le montage de la Chaire M@D est un des résultats des collaborations entre es équipes partenaires du CPER VITAAL et de l'action transverse HAAL du Lab-STICC, et qui avaient déjà donné lieu à un co-encadrement de thèse (Molham DARWISH, section 6.2). La chaire offre une visibilité et un cadre de financement pour travaux de thésards post-doctorat (Samia BENFERHAT, section 6.4, et Cédric LE BONO 6.7), et post-doctorat. Les mécènes sont des partenaires privés et publics historiques avec lesquels nos équipes ont l'habitude de travailler.

Consortium : Bruno JANET Conseil, Brest Métropole, Conseil Régional de Bretagne, Crédit Agricole, ENSIBS, Fondation UBS, Fondation IMT, Hill Rom, ID2Santé, IMT Atlantique, Kerpape, Orange

5.3.10 HIT (PIA3, 2020-2027)

Le projet HIT (Handicap Innovation Territoire) vise à développer des innovations techniques, sociales et organisationnelles pour favoriser l'insertion des personnes en situation de handicap sur le territoire de Lorient agglomération. Lauréat de l'appel à projets national Territoires d'Innovation (du Programme d'Investissements d'avenir, PIA3), ce projet de huit ans est piloté par Lorient Agglomération en collaboration avec le Centre de Rééducation et de Réadaptation Fonctionnelles de Kerpape et Biotech Santé Bretagne et regroupe 87 partenaires.

Le projet a pour ambition de structurer un territoire inclusif de référence en Europe. Il permet de mettre en place des parcours de vie personnalisés avec un haut niveau de participation sociale, base du «Handicapowerment». Son effet transformant se matérialise sur tout le parcours de vie des personnes en situation de handicap (établissements de soins et médico-sociaux, à domicile, dans la cité et lors des parcours professionnels), en incluant les aidants et les professionnels.

Ce sont plus de 70 actions qui sont mises en œuvre pour développer des solutions techniques, de service ou organisationnelles innovantes ainsi que de nouvelles coopérations entre acteurs (acteurs économiques, de la recherche, de la formation, de la santé, des institutions, des citoyens).

Les établissements de recherche scientifique du territoire sont aussi partie prenante. La Chaire M@D est ainsi impliquée sur trois actions d'innovation technologique. L'équipe d'IMT Atlantique propose un travail de thèse sur un système ambiant de cartographie et aide au déplacement pour des personnes malvoyantes.

Consortium :

Établissements de soins et structures médico-sociales : CMRRF Kerpape, Fondation Ildys, Pôle St Hélier, CHU Rennes, CHU Brest, GHBS, HAD Lorient, Cap Autonomie Santé, Mutualité française 29-56

Entreprises et accompagnants : BA Healthcare, Artefacto, Hill-Rom, Hoppen, Crédit Mutuel Arkéa, CCIM, Audelor Lorient Technopole, GrHandiOse, Intsys Europe, Learn&Go, Altran, Coriolis Composites, CTRL, Microsoft, Wandercraft, Zeebox

Collectivités territoriales et institutions : Lorient Agglomération, Conseil Régional de Bretagne, ARS Bretagne, Conseil Départemental 56, Mutualité française 29-56, CPAM56, Ville de Lorient, Ville de Lanester, MGEN, URPS Pharmaciens en Bretagne, Lorient Habitat, Bretagne Sud Habitat, Sellor, GCS e-santé

Représentants d’usagers/société : ADAPEI56, France Assos Santé, APF France Handicap, ADAPT, ALIS, Asperansa, Approche, Commission Intercommunale d’Accessibilité, ESAT Alter Ego

Centres d’Innovations Technologiques : Biotech Santé Bretagne, SATT, B<>Com, I&R

Recherche et formation : UBS, IMT Atlantique, UBO, Chaire M@D(UBS-IMT), UR2 LP3C, LTSI/LATIM, IRMA, Lab-STICC, IFPEK, ASKORIA, CIRRIS, PIMMS Lorient, Rectorat de Rennes, ADIEPH56

Start-ups associées : Apizee, AudioSpot, Captiv, Courseur, Covirtua, CoWork’HIT, Ekinnox, Ezygain, Faciligo, FeelObject, Gyrolift, Hypra, I wheel Share, Kompaï Robotics, MaPui, My Car Lot, My Cyber Royaume, Panda Guide, Watchelp, WeGoTo

5.3.11 HERON (SAD APRE, 2020-2022)

Porté par la Région Bretagne et le Département du Finistère, le projet HERON (Habitat intelligent Et RObotique d’assistance basés sur le jumeau Numérique) s’intéresse à la modélisation du système cyber-physique constitué par l’utilisateur, l’habitat intelligent et les robots d’assistance, en se basant pour chacun sur la notion de «jumeau numérique». L’établissement de cette relation de dualité entre le monde réel et ses répliques sous la forme de jumeau numérique sert alors de base de référence/vérité sur laquelle les différents services d’assistance pourront se développer. Par sa vocation à modéliser la dynamique d’un système, le jumeau numérique facilite le monitoring, le diagnostic et le pronostic de son comportement. S’inspirant de l’exploitation de jumeaux numériques dans des domaines tels que l’Industrie du Futur, l’Internet des Objets ou l’aéronautique, le projet HERON étend cette perspective dans le domaine de l’assistance à la personne. Cette transposition permettra d’accélérer la mise en œuvre des services concernés au niveau technologique d’une part et le passage à l’échelle par l’amélioration de leur acceptabilité par les utilisateurs finaux.

Le projet HERON propose une approche utilisant des techniques de vision par ordinateur et des caméras hybrides RGB-D pour scanner un appartement, reconstruire un modèle 3D et inférer la sémantique des objets reconnus. De plus, des expérimentations menées au sein de notre living’lab Experiment’HAAL permettent de valider l’approche, ainsi qu’au living’lab de l’ENSIBS dans le cadre de la Chaire M@D (Maintien en Domicile).

Consortium : IMT Atlantique, Chaire M@D

5.3.12 e-VITA (H2020, 2021-2024)

Le projet e-VITA (European-Japanese Virtual Coach for Smart Ageing), de l’appel Horizon 2020 “Digital Transformation in Health and Care”, est basé sur une coopération internationale entre l’Europe et le Japon.

e-VITA propose une approche innovante d’accompagnement virtuel qui porte sur les domaines cruciaux dans le maintien d’un vieillissement actif et sain : cognition, activité physique,

mobilité, humeur, l'interaction sociale, les loisirs et la spiritualité. Il s'agit d'offrir aux personnes âgées des outils pour se prendre en charge, mieux gérer sa propre santé, ses activités quotidiennes, son bien-être. Le coach virtuel e-VITA fournit une gestion individualisée et des recommandations personnalisées basées sur l'analyse des données massives et l'informatique socio-émotionnelle.

Le coach virtuel détecte et prévient les risques potentiels dans l'environnement de vie quotidien de l'utilisateur en collectant des données de sources externes et de capteurs non intrusifs. Il apporte son soutien par des interactions naturelles avec des hologrammes 3D, des objets émotionnels ou des technologies robotiques en utilisant la technologie du dialogue multimodal, des représentations graphiques de connaissances avancées, et la fusion de données. L'interopérabilité et la confidentialité des données sont assurées grâce à une plate-forme de données fédérées. Le système de coaching est déployé et évalué dans les milieux de vie de personnes âgées en bonne santé en France, en Allemagne, en Italie et au Japon afin d'en évaluer la faisabilité et l'efficacité.

Nos contributions portent sur l'interopérabilité des systèmes ambiants, la fusion de données, et des évaluations dans notre living'lab.

Consortium :

Europe : Universitaet Siegen, Age Platform Europe Aisbl, Diocesan Caritas Association Cologne E.V., DeltaDore S.A., Engineering - Ingegneria Informatica Spa, Fraunhofer Gesellschaft Zur Foerderung Der Angewandten Forschung E.V., Assistance Publique des Hôpitaux de Paris, Istituto Nazionale Di Riposo E Cura Anziani, Institut Mines-Telecom, Institut Für Angewandte Informatik E.V., Institut Fur Experimentelle Psychophysiologie Gmbh, Universita Politecnica Delle Marche

Japon : Tohoku University / Smart Ageing Research Center, AIST / Ai Research Center Tokyo, AIST / Human Augmentation Research Center Chiba, Waseda University / Institute Of Liberal Studies, National Center Of Gerontology And Geriatrics, Japan Quality Assurance Ltd., J. F. Oberlin University / Institute Of Gerontology, Gatebox Inc., Misawa Homes Institute Of Research And Development Co. Ltd., Neu Corporation Ltd.

5.3.13 HARSHEE (ANR Plan France Relance, 2022-2023)

Le projet HARSHEE (Human Activity Recognition in Smart Home on Embedded Equipments), fruit d'une collaboration entre IMT Atlantique et DeltaDore, se place dans un contexte de reconnaissance des activités de la vie quotidienne en environnement de type «smart home», c'est-à-dire une maison équipée de capteurs, d'actionneurs, et d'intelligence artificielle. L'ambition est de concevoir et déployer une telle intelligence artificielle qui utilise cette perception et la capacité d'agir pour, comprendre, assister, sécuriser et faciliter le quotidien des habitants.

Des travaux de recherche scientifique précédents ont permis d'explorer les algorithmes de réseaux de neurones qui montrent de très bonnes performances sur le problème de classification de séquences d'activités humaines dans un cadre dit «offline». Un premier axe du projet est de conduire des expérimentations plus poussées pour évaluer ces algorithmes sur une variété de datasets et développer la capacité à classifier les séquences en mode «online». Autrement dit, il s'agit dès lors de reconnaître les activités humaines directement sur le flux des événements capteurs et non plus sur une séquence prédécoupée.

Le second axe du projet s'intéresse aux plates-formes matérielles embarquées disponibles dédiées à l'IA. Il s'agit dans ce volet d'évaluer différentes solutions matérielles qui permettent l'implémentation d'algorithmes d'intelligence artificielle pour répondre à des usages domestiques (reconnaissance d'activités, maintenance prédictive ...) et en prenant en compte les coûts des solutions.

Consortium : IMT Atlantique, DeltaDore

5.3.14 Mementop (ANR Plan France Relance, 2022-2023)

Le projet Mementop a pour ambition de repérer les signes précoces des affections neurodégénératives, et d’accompagner les personnes porteuses de ces troubles ainsi que leur entourage. Ce projet est conduit en collaboration avec Smart Macadam, start’up nantaise focalisée sur la conception et le développement de solutions innovantes pour les personnes en perte d’autonomie. Smart Macadam a ainsi développé un dispositif médical certifié autour d’une Gazette personnalisée et d’une application pour smartphone. Ce dispositif permet aux usagers de se repérer dans l’espace et dans le temps, de stimuler leur mémoire et de préserver leurs fonctions exécutives. Le dispositif s’adresse également aux aidants auxquels il offre un canal unifié de communication avec leur aidé, ainsi qu’un moyen structurant pour contribuer à la préservation de l’autonomie à domicile de celui-ci.

Notre projet Mementop vise à augmenter les capacités de ce dispositif en reconnaissant les sons marqueurs de l’activité humaine au quotidien au sein du domicile et en identifiant des situations anormales. L’interprétation sémantique des sons signifiants bénéficiera au suivi de l’évolution de l’état de santé de l’aidé et complétera le modèle d’analyse empirique déjà mis en œuvre à partir des autres données collectées par le dispositif.

Consortium : IMT Atlantique, Smart Macadam

Chapitre 6

Encadrement de thèses

Mon activité de recherche inclut la formation de jeunes chercheurs à la science, et donc l'encadrement de thèse, des thèses soutenues, des thèses en cours, des thèses prévues.

6.1 Thèse de Ali Sajjad Mushtaq

— Titre de la thèse :

A Framework Implementing Multi-Criteria Least Cost Routing for IP Multimedia Services

Un cadre de mise en œuvre du routage multicritère de services IP multimédia

— Doctorant : Ali Sajjad MUSHTAQ

— Dates : mai 2006 - janvier 2012

— Équipe d'accueil : Télécom Bretagne, Département Informatique, BREST

— Projet : IDEAL

— Directeur de thèse : Antoine BEUGNARD

— Encadrant : Christophe LOHR, Annie GRAVEY

— Résumé : Ce mémoire de thèse présente des travaux relatifs à la prise de décision dynamique multicritères pour du routage de bordure de services multimédia dans un environnement de convergence des technologies d'accès. Ces travaux incluent le modèle d'information, le recours aux ontologies pour appréhender la sémantique, le partage d'informations, des mécanismes de diffusion, et des méthodologies de spécifications de règles et politiques de choix. Le contrôle et la gestion de l'infrastructure ont été réalisés grâce à des extensions apportées à des protocoles de signalisation traditionnels (SIP, Diameter et SNMP). De même, un sous-ensemble de DEN-ng a été étendu pour adresser les exigences de la problématique. Aussi un langage dédié spécifiquement à la plate-forme a été proposé permettant d'éviter les conflits et les chevauchements de spécification. Un moteur de décision dynamique a été développé pour le routage des requêtes de sessions multimédia à la frontière du réseau public-privé lorsque celui-ci bénéficie de plusieurs liens d'accès. La théorie de la décision multicritères (MCDM) a été utilisée pour le calcul des décisions, et les modes de décision sous-jacents ont été adaptés aux différents scénarios d'utilisation correspondant aux différents modes de mise en application des décisions prises. Un banc de mesures a été réalisé pour valider ces propositions. Le système proposé offre une meilleure occupation des liens et une plus faible probabilité de rejet des requêtes, tout en rajoutant un surcoût négligeable sur le délai d'établissement des sessions.

— Mots-clés : Routage au moindre coût, Protocole de signalisation, Méthode de décision multicritères, Langage de spécification de politiques

— Soutenance : 16 janvier 2012

- Jury :
 - Tijani CHAHED - Professeur - Télécom SudParis - Rapporteur
 - Jean-Louis ROUGIER - Maître de conférences HDR - Télécom ParisTech - Rapporteur
 - André-Luc BEYLOT - Professeur - IRIT/ENSEEIH Toulouse - Président du jury
 - Christophe LOHR - Maître de conférences - Télécom Bretagne
 - Annie GRAVEY - Directeur d'études - Télécom Bretagne
 - Antoine BEUGNARD - Professeur - Télécom Bretagne

6.2 Thèse de Molham Darwish

- Titre de la thèse :
 - Architecture and deployment of services of assistance to the person*
 - Architecture et déploiement de services d'aide à la personne
- Doctorant : Molhan DARWISH
- Dates : novembre 2012 - septembre 2016
- Équipe d'accueil : Télécom Bretagne BREST, Université de Bretagne Sud LORIENT
- Projet : ISHEV-HAAL
- Directeur de thèse : Yvon KERMARREC, Éric SENN
- Encadrant : Christophe LOHR, Florent DE LAMOTTE
- Résumé :

Le vieillissement de la population européenne a encouragé la communauté à favoriser la recherche de solutions pour soutenir cette évolution. Dans ce contexte, plusieurs questions (liées aux services de soins de santé et aux établissements de santé, coûteux, et à capacités limitées) doivent être abordées.

Ainsi, plusieurs projets de recherche et des solutions industrielles ont été proposés pour remédier à ces problèmes. La plupart de ces solutions sont basées sur l'utilisation des derniers développements techniques en matière de TIC permettant ainsi de fournir des solutions qui améliorent le bien-être des personnes âgées et de garantir leur indépendance dans leurs propres espaces de vie. Les solutions technologiques fournies doivent être garanties contre les défauts potentiels des équipements qui peuvent conduire à l'échec des systèmes et avoir un impact sur les besoins et l'indépendance des utilisateurs.

Dans ce travail, nous proposons une représentation du système d'automatisation de la maison, sur la base des besoins, qui consiste à fournir des solutions continues et viables et répondant aux attentes des utilisateurs (tout en assurant la disponibilité des services des systèmes).

Dans cet objectif, nous proposons de développer un cadre de modélisation représentant le système reconfigurable domotique et permettant l'examen de l'approche de la tolérance de panne, sur la base de la définition de scénarios alternatifs (assurant la délivrance continue des services). Dans ce workflow, nous décrivons les éléments structurels du système (décrits comme des services et composants) en vue de la modélisation conceptuelle. Des règles de transformation de modèle permettent de générer un modèle d'analyse et un modèle de comportement. Le modèle d'analyse permet de prendre une décision à propos de la sélection des éléments alternatifs pour remplacer les éléments défectueux.

Ce modèle d'analyse est défini sur la base de la notion d'approche d'arbre de défaillances, qui adopte la probabilité d'échec des composantes pour évaluer l'état global du système considéré. Le modèle de comportement est responsable de la simulation de l'exécution des services du système pour assurer que les scénarios conduisent à la délivrance du système.

Par ailleurs, nous proposons de définir une caractéristique permettant d'évaluer l'importance empirique (vue par le concepteur) des composantes d'un système dans le cadre d'un service donné. Ensuite, nous proposons une nouvelle approche, fondée sur l'intégration du facteur de l'importance dans l'approche d'arbre de défaillances pour étudier la criticité du composant, en cas d'échec, ainsi que la continuité de service. Un cadre de validation expérimental, basé sur plusieurs objectifs de validation est finalement proposé pour conclure ce travail de recherche.

- Mots-clés : systèmes distribués, architectures logicielles, environnement d'exécution, hétérogénéité, déploiement.
- Soutenance : 12 septembre 2016
- Jury :
 - Jean-Paul HATON - Professeur - Université Henri Poincaré, Nancy 1 - Rapporteur
 - Éric ZAMAI - Maître de Conférences HDR - Institut National Polytechnique de Grenoble - Rapporteur
 - Alexandre ABELLARD - Maître de Conférences - Université de Toulon - Examineur
 - Guy GOGNIAT - Professeur - Université de Bretagne Sud - Président du jury
 - Alain HILLION - Professeur - Télécom Bretagne - Examineur
 - Éric SENN - Maître de Conférences, Habilité à Diriger des Recherches - Université de Bretagne Sud
 - Christophe LOHR - Maître de Conférences - Télécom Bretagne
 - Florent DE LAMOTTE - Maître de Conférences - Université de Bretagne Sud

6.3 Thèse de Pratibha Mitharwal

- Titre de la thèse :
 - A study of IP network mobility in a multihomed context*
 - Une étude de la mobilité du réseau IP dans un contexte multirésident
- Doctorant : Pratibha MITHARWAL
- Dates : février 2013 - septembre 2016
- Équipe d'accueil : Télécom Bretagne, Département Informatique, BREST
- Projet : REOP
- Directeur de thèse : Annie GRAVEY
- Encadrant : Christophe LOHR
- Résumé : Cette thèse présente une solution pour améliorer la mobilité des réseaux, dans le cadre de communications véhiculaires ainsi que pour la distribution de contenu. Les solutions actuelles pour les communications véhiculaires (c'est-à-dire lorsqu'un réseau est mobile) reposent sur la mise en place de tunnels, permettant également d'utiliser simultanément les différentes interfaces disponibles sur le véhicule (multi-homing). Même avec des tunnels, ces solutions ne sont pas en mesure d'équilibrer le trafic sur les interfaces réseau disponibles, elles ne parviennent pas à tirer parti du multi-homing. De plus, certaines des solutions existantes pour la mobilité de réseau cachent la mobilité aux hôtes connectés au routeur mobile. De fait, cela empêche les hôtes de participer aux décisions relatives au multi-homing, telles que le choix de l'interface réseau à utiliser, ce qui est pourtant utile pour réaliser du routage à moindre coût. Dans cette thèse, nous proposons de combiner un protocole de mobilité réseau (tel que NEMO) avec le protocole de TCP-multivoies (MPTCP), ce qui permet aux nœuds hôtes de participer à la mobilité et au multi-homing. Cette nouvelle combinaison améliore significativement le routage et l'encapsulation de paquets causée par les tunnels. En outre, cela augmente le débit, la tolérance de panne, le temps d'aller-retour et réduit le délai de transmission.

La deuxième contribution de ce travail propose une solution de continuité de session pour la distribution de contenu dans les réseaux 5G. Dans le réseau 5G, les équipements d'accès IP seront au plus proche des nœuds terminaux afin d'améliorer l'expérience utilisateur et de réduire la charge de trafic dans le réseau central. Le fait est qu'à un instant donné un terminal ne peut être raccordé qu'à une seule passerelle (SGW/PGW) à la fois. Et comme la passerelle change lors de la mobilité, les sessions en cours seront rompues, impactant les applications temps-réel, le streaming vidéo, les jeux, etc. Pour cela, la thèse présente une solution de continuité de session avec l'aide de TCP-multivoie en bénéficiant du fait que les serveurs de contenu sont stationnaires.

- Mots-clés : Mobilité réseau, Multihoming, LTE, 5G, SIPTO, Réseaux véhiculaires, Continuité de session, Trafic Offload
- Soutenance : 19 septembre 2016
- Jury :
 - Yacine GHAMRI-DOUDANE - Professeur - Université de la Rochelle - Rapporteur
 - Stefano SECCI - Maître de conférences HDR - Université Pierre et Marie Curie - Rapporteur
 - Véronique VEQUE - Professeure - Université Paris-Sud 11 - Présidente du jury
 - Tijani CHAHED - Professeur - Télécom SudParis - Examineur
 - Jean-Louis ROUGIER - Professeur - Télécom ParisTech - Examineur
 - Christophe LOHR - Maître de conférences - Télécom Bretagne
 - Annie GRAVEY - Directeur d'études - Télécom Bretagne

6.4 Thèse de Samia Benferhat

- Titre de la thèse :
 - Ingénierie de services domotiques pour l'intégration de cobots dans un environnement d'assistance à la personne
- Dates : octobre 2018 - octobre 2023
- Équipe d'accueil : Université de Bretagne Sud ENSIBS LORIENT
- Projet : Chaire M@D
- Directeur de thèse : Jean-Luc PHILIPPE
- Encadrants : Christophe LOHR, Florent DE LAMOTTE
- Résumé :

L'intégration dans la société des personnes en situation de handicap est un enjeu sociétal. Les personnes en situation de handicap physique conservent leurs facultés intellectuelles et peuvent être autonomes dans leur vie quotidienne, du moment qu'elles disposent de moyens techniques compensant leur handicap. Afin de pallier la perte ou le manque d'autonomie, ces dernières années de nombreux travaux de recherche ont étudié l'apport des dispositifs d'assistance pour, par exemple, l'aide au déplacement, à la communication, au contrôle environnemental (que ce soit par la domotique, le développement d'interface homme-machine, la robotique, etc.)

La problématique principale de cette thèse est la gestion de l'interaction entre l'humain et le cobot à domicile dans une cuisine. Le but est d'apporter une aide lors de la préparation en autonomie d'un repas. La définition du modèle d'interaction amène à définir l'architecture matérielle et logicielle. Le système se compose d'un niveau de commande doté d'une intelligence pour contrôler les cobots et les autres équipements, tels que les capteurs et actionneurs présents dans la cuisine domotisée.

Concernant la planification des tâches et la modélisation de l'interaction, l'objectif est de définir des modalités d'interaction où l'utilisateur participe et peut intervenir dans le déroulement de la recette. La recette est une tâche complexe et composée typiquement

de plusieurs gestes. Le modèle théorique du cobot dans ce cas est vu comme un ensemble de machines à états qui interagissent avec un niveau décisionnel et d'orchestration. Pour cela, le choix s'est porté sur les systèmes multiagents (SMA) pour leurs capacités d'interaction et de communication. Lors de la modélisation de l'interaction, nous avons identifié les besoins de l'utilisateur. Les transitions d'états possibles sont décrites explicitement. Plusieurs cas d'interactions ont été testés.

Afin de mettre en œuvre les modèles d'interactions, une architecture du système général a été mise en place. Différents niveaux ont été identifiés :

- Niveau décisionnel. Il constitue le système multiagent et se compose de deux niveaux d'agents : (i) agents haut niveau, pour la prise de décision et l'orchestration des tâches, (ii) agents bas niveau, pour le transfert de données entre sous-systèmes.
- Niveau de communication. Ce niveau gère le flux d'informations et fait le transfert de données entre le niveau décisionnel et le niveau exécutif.
- Niveau exécutif. Il s'agit du niveau d'exécution du geste par le cobot. Ce niveau gère également la mise en sécurité du système vis-à-vis de l'utilisateur.

Ces travaux s'accompagnent d'un prototypage et d'expérimentations dans le living'lab de l'ENSIBS. Ce prototypage utilise une cuisine équipée de capteurs domotiques, d'un bras robotique UR3. La partie logicielle inclue ROS/Smach pour le niveau exécutif des cobots, et le middleware JADE pour le niveau décisionnel SMA. Des scénarios ont été mis en place pour valider l'approche.

- Mots-clés : cobotique, interaction humain-robot, systèmes multiagents, handicap, autonomie

6.5 Thèse de Linda Vallée

- Titre de la thèse :

Amélioration des interactions sociales avec les personnes autistes par l'usage des Technologies de l'Information et de la Communication

- Doctorant : Linda Nanan VALLÉE

- Dates : novembre 2019 - Stoppée en juin 2021

- Équipe d'accueil : IMT Atlantique Département Informatique BREST, Institut National Polytechnique Félix HOUPHOUËT-BOIGNY ESATIC ABIDJAN

- Directeurs de thèse : Ioannis KANELLOS, Olivier ASSEU (EDP-INPHB)

- Encadrant : Christophe LOHR, Sao Mai NGUYEN

- Résumé :

Ce travail de thèse s'intéresse à l'utilisation de la robotique sociale dans la prise en charge des personnes autistes. Pilier de l'apprentissage et de la communication non verbale, le processus complexe de l'imitation peut être utilisé en vue d'améliorer les interactions sociales des sujets atteints de ces troubles.

Il s'agit de concevoir un système informatique et robotique capable d'implémenter un jeu d'imitation gestuelle permettant d'améliorer les interactions sociales avec des (pré-)adolescents atteints de troubles du spectre autistique (TSA).

Des échanges avec des professionnels de l'autisme en France et en Côte d'Ivoire ont permis de déterminer les critères d'inclusion et caractéristiques précises des participants à cibler (âge physique, âge neurodéveloppemental, degré du trouble via le score CARS). De même a été définie la structure du jeu sérieux : phases d'accueil, de pairing, d'imitation (induite, spontanée, reconnaissance d'être imité) et de clôture). Il a également été précisé les caractéristiques de l'environnement et du protocole cible : nombre de sujets, fréquence et durée des sessions, configuration tripartite sujet-accompagnant-robot. De plus, il a été défini des indicateurs de succès (réponses adéquates aux salutations et

invitations à interagir, tentatives d’imitation). Une première session expérimentale s’est tenue, avec des accompagnants humains et sans robot. Le prototype s’appuie sur les solutions robotiques de l’état de l’art pour développer des capacités de reconnaissance automatique de poses et de gestes, intégrés à la base robotique QTrobot.

- Mots-clés : Interaction humain-robot, robotique sociale, reconnaissance de gestes, troubles du spectre autistique

6.6 Thèse de Damien Bouchabou

- Titre de la thèse :

Human Activity Recognition in Smart Homes : tackling data variability using context-dependent deep learning, transfer learning and data synthesis

Reconnaissance de l’activité humaine dans les maisons intelligentes : traitement de la variabilité des données grâce à l’apprentissage contextuel, au transfert de connaissance et synthèse de données

- Doctorant : Damien BOUCHABOU
- Dates : février 2019 - mai 2022
- Équipe d’accueil : IMT Atlantique, Département Informatique, BREST
- Projet : CIFRE Delta Dore
- Directeur de Thèse : Ioannis KANELLOS
- Encadrants : Christophe LOHR, Sao Mai NGUYEN
- Résumé :

Cette thèse se place dans un contexte de reconnaissance des activités de la vie quotidienne (AVQ) au sein d’un habitat intelligent, doté de capteurs, d’actionneurs et d’intelligence artificielle. L’idée est de pouvoir suivre de manière personnalisée la vie des habitants afin de leur proposer des services innovants dans la maison. Par exemple, la société Delta Dore, qui soutient ces travaux, a pour objectif, grâce à cette brique technologique, de proposer des services en termes de sécurité, d’économie d’énergie, d’amélioration du confort, et de bien-être et de suivi santé.

Ces dernières années ont vu émerger une multitude de techniques et d’approches au travers de l’intelligence artificielle pour doter les maisons de la pierre angulaire à tous ces services : la capacité à comprendre le mode de vie et les activités de ses résidents au travers des capteurs domotiques.

Malgré les avancées grâce au deep learning et l’augmentation de la quantité de données, ces méthodes ne permettent pas de généraliser et traiter totalement la complexité et la variabilité de l’activité humaine. De plus, l’utilisation et l’application de ces approches dans un contexte réel industriel et commercial reste un défi majeur dû au manque de données labellisées en provenance de l’environnement de destination.

Cette thèse propose de tenter d’améliorer ces méthodes et leurs portabilités au travers, de la compréhension du contexte d’activation des capteurs domotique et du transfert de connaissance en s’inspirant de techniques du traitement du langage naturel, ainsi que de la synthèse de données via le concept du jumeau numérique.

La contribution porte donc sur la reconnaissance d’AVQ via des techniques de Deep Learning, notamment sur les approches à réseaux de neurones de type CNN (Convolutional Neural Network), FCN (Fully Convolutional Network), RNN (Recurrent Neural Network), LSTM (Long Short Term Memory), Auto-Encodeur. De plus, des techniques ont été empruntées au domaine du NLP (Natural Language Processing), en considérant que le problème est assimilable à du traitement de séquences. Ainsi, a été implémenté et testé différentes structures de réseau de neurones. Cela a permis de dresser des comparaisons entre les différentes stratégies proposées dans la littérature, et de constater de

certaines limitations pour des applications multi-résidents et de reconnaissance en temps réel. Il a également été observé qu’une couche appelée Embedding issue du domaine du NLP améliore sensiblement les performances de classification. Enfin nous proposons une méthode pour appliquer des modèles de reconnaissance d’activité dans des maisons réelles, en utilisant des données synthétiques provenant de leurs jumelles numérique. Conjointement à ces travaux, avons réalisé une campagne d’acquisition de données dans l’appartement connecté du laboratoire.

- Mots-clés : Human Activity Recognition, Smart Homes, Context-Dependent Deep Learning, Transfer Learning, Data Synthesis, Digital Twin
- Soutenance : 30 mai 2022
- Jury :
 - Amel BOUZEGHOUB - Professeure - IMT Management Sudparis - Rapporteuse
 - Francois PORTET - Professeur - Laboratoire d’informatique de Grenoble - Rapporteur
 - Stephane PLOIX - Professeur - INP Grenoble - Président du jury
 - Monique THONNAT - Directrice de recherches - INRIA Sophia Antipolis - Examinatrice
 - Ioannis KANELLOS - Professeur - IMT Atlantique
 - Christophe LOHR - Maître de conférences - IMT Atlantique
 - Sao Mai NGUYEN - Maîtresse de conférence - IMT Atlantique
 - Benoit LEDUC - Ingénieur Recherche - Delta Dore

6.7 Thèse de Cédric Le Bono

- Titre de la thèse :
 - Assistance Proactive aux AVQ par interaction Robotique Contextuelle
- Doctorant : Cédric LE BONO
- Dates : octobre 2020 - septembre 2023 - non soutenue
- Équipe d’accueil : IMT Atlantique, Département Informatique, BREST
- Projet : Chaire M@D
- Directeur de Thèse : Cédric BUCHE
- Encadrants : Christophe LOHR, Panagiotis PAPADAKIS
- Résumé :

Le renforcement de l’autonomie de personnes fragiles qui souffrent de déficiences motrices passe notamment par le développement des services d’assistance personnalisés au sein du domicile. L’isolement physique qui se caractérise par la difficulté de la personne à évoluer au sein de son environnement et à manipuler les objets reste un défi complexe et coûteux à aborder. En particulier, l’adaptation du domicile à l’usager ne peut satisfaire que temporellement ses besoins, alors que la gestion de la multitude d’objets associés aux activités de la vie quotidienne (AVQ) reste à la charge de la personne.

Cette thèse a pour objectif le développement de nouvelles solutions pour l’amélioration de l’autonomie des personnes dépendantes, au travers du paradigme de la robotique d’accompagnement. L’objectif scientifique consiste à faire progresser l’autonomie de décision et de perception des robots afin d’assister de manière proactive l’usager pour la réalisation des AVQs au sein de son domicile. En synergie avec autres services d’assistance offerts au sein d’une maison intelligente, les robots manipulateurs deviennent acteurs avec l’objectif de gérer les objets associés aux AVQs afin de renforcer l’autonomie physique de l’usager.

La contribution scientifique de la thèse se poursuit par l’entraînement des modèles discriminatifs sur des données provenant de capteurs de vision 3D embarqués, la planification discrète de mouvement et de tâches. L’étude porte s’intéresse plus spécifiquement

au problème du *Few-Shot Object Recognition*, c'est-à-dire la capacité à reconnaître un objet alors que le système ne dispose que de très peu de données d'apprentissage.

- Mots-clés : robotique d'assistance, vision par ordinateur, few-shot object recognition

6.8 Thèse de Florian Szczepaniak

- Titre de la thèse :

Fusion de données multimodales pour le suivi des activités de l'utilisateur dans son environnement et ses interactions avec un système de dialogue

- Dates : octobre 2021 - abandon en septembre 2023
- Équipe d'accueil : Télécom Sud Paris
- Projet : e-VITA
- Directeur de Thèse : Jérôme BOUDY
- Encadrants : Christophe LOHR, Gerard CHOLLET, Dijana PETROVSKA
- Résumé :

Ce travail de thèse s'intéresse aux systèmes d'accompagnement virtuel aux personnes âgées pour le maintien d'un vieillissement actif et sain : cognition, activité physique, mobilité, humeur, l'interaction sociale, les loisirs et la spiritualité. Il s'agit d'offrir aux utilisateurs des recommandations personnalisées basées sur l'analyse de données et l'informatique socio-émotionnelle pour se prendre en charge, mieux gérer sa propre santé, ses activités quotidiennes, son bien-être.

Le coach virtuel détecte et prévient les risques potentiels dans l'environnement de vie quotidien de l'utilisateur en collectant des données de sources externes et de capteurs non intrusifs. Il apporte son soutien par des interactions naturelles avec des hologrammes 3D, des objets émotionnels ou des technologies robotiques en utilisant la technologie du dialogue multimodal, des représentations graphiques de connaissances avancées, et la fusion de données.

Le travail de thèse porte sur la fusion de données hétérogènes environnementales et comportementales en vue d'identifier des situations et des états émotionnels et des intentions de l'utilisateur face au coach vocal, son état de bien-être, ou au contraire une situation de détresse potentielle ou réelle. Différents signaux ou données de capteurs seront exploités afin d'identifier les profils actimétriques et physiologiques de l'utilisateur. Il s'agit également de combiner différentes modalités de perception ou d'entrée telles que la voix, le visage, y compris l'humeur et les gestes. Le but de cette fusion multimodale est de produire les informations nécessaires sur les capacités de l'utilisateur, son état mental et sa disponibilité dans l'objectif de permettre au sous-système de dialogue d'améliorer sa compréhension des demandes utilisateur.

- Mots-clés : fusion de données, systèmes ambiants, coach virtuel, vieillissement actif et autonome

6.9 Thèse de Nacer Djerada

- Titre de la thèse :

Aide au déplacement pour les personnes malvoyantes basée vision par ordinateur

- Dates : octobre 2022 - 2025
- Équipe d'accueil : IMT Atlantique, Département Informatique, BREST
- Projet : HIT
- Encadrants : Christophe LOHR, Panagiotis PAPADAKIS
- Résumé :

L'objectif de cette thèse, portée par le projet HIT 5.3.10, est de développer une solution technique pour aider les personnes malvoyantes à se déplacer. Deux aspects sont explorés : d'une part, les problèmes de vision par ordinateur et, d'autre part, les problèmes de coopération ouverte entre systèmes ambiants et robotiques.

La première partie de l'étude traite du problème d'*image captioning*. Cette discipline de vision par ordinateur vise à construire automatiquement une description textuelle à partir d'une image. Il comprend divers paradigmes d'IA tels que la segmentation d'images et la reconnaissance de formes. Le sujet est également adossé à des problématiques de machine learning embarqué, fonctionnant sur du matériel contraint. L'ambition est que, grâce au système développé, un utilisateur malvoyant visitant un lieu d'intérêt puisse obtenir une description de la scène qui l'entoure, avec un niveau de précision et un point d'intérêt choisis.

Une analyse des besoins vient préciser le périmètre de l'étude : en intérieur, en extérieur, le type de points d'intérêt à expliciter (type d'obstacles, terrain, signalisation et directions, etc.), les modes d'interaction à prévoir (ex. vocalisation, niveau de parole et vocabulaire selon le domaine d'utilisation, etc.), le type d'équipement à envisager (p.ex. équipement porté par l'utilisateur ou un robot compagnon). L'objectif est donc de contribuer à ces problématiques d'IA, et de porter une attention particulière aux cas d'usage ciblés. L'ambition globale est de fournir une aide technique favorisant l'autonomie des personnes ayant une déficience visuelle partielle ou totale. Aussi, des temps d'échanges avec les représentants des utilisateurs le long du projet permettent d'enrichir la phase de définition des besoins, mais aussi les tests de validation fonctionnelle et d'acceptabilité.

La deuxième partie de l'étude porte sur le partage de connaissances dans le cadre du machine learning, en l'occurrence la description d'une scène, entre un système de vision embarqué et un bâtiment connecté. Pour accélérer et rationaliser le service fourni, le système de vision peut obtenir des équipements ambiants (par exemple une base de données sur le réseau local du lieu visité) des descriptions du lieu déjà développées dans le passé par les systèmes des utilisateurs précédents, et y contribuer à leur tour. Par collaboration ouverte, nous entendons ici que ces différents équipements appartiennent à des systèmes disjoints, sans connaissance mutuelle préalable, et sans présupposés sur le niveau de fiabilité des informations déposées. Il s'agit d'une part de proposer des mécanismes de versionnage des informations fournies par chacun d'eux et, d'autre part, d'adapter les algorithmes de sous-titrage des images pour tenir compte des informations incertaines à confirmer.

- Mots-clés : Technologies d'assistance, déficience visuelle, vision par ordinateur, image captioning, systèmes ambiants

Chapitre 7

Publications

7.1 Aides à la conception de systèmes embarqués temps-réels

- [1] Jean-Pierre COURTIAT, Celso SANTOS, Christophe LOHR et Benaceur OUTTAJ. « Expérience with RT-LOTOS, a temporal extension of the LOTOS formal description technique ». In : *Computer Communications* 23.12 (juill. 2000), p. 1104-1123. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01674645>.
- [2] Ludovic APVRILLE, Pierre DE SAQUI-SANNES, Christophe LOHR, Patrick SÉNAC et Jean-Pierre COURTIAT. « A new UML profile for real-time system formal design and validation ». In : *4th International Conference on the Unified Modeling Language (UML'2001)*. Unknown, Unknown Region, 2001. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01674643>.
- [3] Pierre DE SAQUI-SANNES, Ludovic APVRILLE, Christophe LOHR et Jean-Pierre COURTIAT. « UML et RT-LOTOS. Vers une intégration informel/formel au service de la validation de systèmes temps réel ». In : *Colloque Francophone sur la Modélisation des Systèmes Réactifs (MSR'2001)*. Unknown, Unknown Region, 2001, p. 513-528. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01674644>.
- [4] Paulo Nazareno Maia SAMPAIO, Christophe LOHR et Jean-Pierre COURTIAT. « An integrated environment for the presentation of consistent SMIL 2.0 documents ». In : *ACM Symposium on Document Engineering (DocEng'01)*. Unknown, Unknown Region, 2001, p. 115-124. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01674651>.
- [5] Ludovic APVRILLE, Pierre DE SAQUI-SANNES, Patrick SÉNAC et Christophe LOHR. « Reconfiguration dynamique de protocoles embarqués à bord de satellites ». In : *9ème Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles (CFIP'2002)*. Unknown, Unknown Region, 2002, p. 441-454. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01674639>.
- [6] Pierre DE SAQUI-SANNES, Ludovic APVRILLE, Christophe LOHR, Patrick SÉNAC et Jean-Pierre COURTIAT. « UML and RT-LOTOS. An integration for real-time system validation ». In : *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)* 36.7 (nov. 2002), p. 1029-1042. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01674642>.
- [7] Christophe LOHR. « Contribution to the design of real-time systems based on the RT-Lotos formal description technique ». Rapporteurs : Richard Castanet Elie Najm Examineurs : Michel Diaz Hubert Garavel Patrick Sallé François Vernadat. Theses. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, déc. 2002. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00005228>.

- [8] Christophe LOHR et Jean-Pierre COURTIAT. « De la spécification à l'ordonnancement de systèmes contraints par le temps ». In : *9ème Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles (CFIP'2002)*. Unknown, Unknown Region, 2002, p. 209-222. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01674641>.
- [9] Christophe LOHR et Jean-Pierre COURTIAT. « From the specification to the scheduling of time-dependent systems ». In : *7th International Symposium on Formal Techniques in Real-Time and Fault-Tolerant Systems (FTRTFT'2002)*. Unknown, Unknown Region, 2002. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01674640>.
- [10] Christophe LOHR, Ludovic APVRILLE, Pierre DE SAQUI-SANNES et Jean-Pierre COURTIAT. « New operators for the TURTLE real-time UML profile ». In : *6th IFIP WG 6.1 International Conference on Formal Methods for Open Object-Based Distributed Systems (FMOODS'2003)*. Unknown, Unknown Region, 2003. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01674638>.
- [11] Ludovic APVRILLE, Jean-Pierre COURTIAT, Christophe LOHR et Pierre DE SAQUI-SANNES. « TURTLE : a real-time UML profile supported by a formal validation toolkit ». In : *IEEE Transactions on Software Engineering* 30.7 (juill. 2004), p. 473-487. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01674634>.
- [12] Ludovic APVRILLE, Pierre DE SAQUI-SANNES, Patrick SÉNAC et Christophe LOHR. « Verifying service continuity in a satellite reconfiguration procedure ». In : *Automated Software Engineering* 11 (avr. 2004), p. 167-192. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01674637>.
- [13] Pierre DE SAQUI-SANNES, Ludovic APVRILLE, Christophe LOHR et Jean-Pierre COURTIAT. « Derniers développements autour du profil UML temps réel TURTLE ». In : *Journées "Formalisation des Activités Concurrentes" (FAC'2004)*. Unknown, Unknown Region, 2004. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01674635>.
- [14] Pierre DE SAQUI-SANNES, Ludovic APVRILLE, Christophe LOHR et Jean-Pierre COURTIAT. « TURTLE : un pont entre UML et RT-LOTOS ». In : *Conference AFADL'2004. Approches Formelles dans l'Assistance au Développement de Logiciels*. Unknown, Unknown Region, 2004. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01674636>.
- [15] Ferhat KHENDEK, Christophe LOHR, Li Xin WANG, Xiao Jun ZHANG et Tong ZHENG. « Early Validation of Deployment and Scheduling Constraints for MSC Specifications ». In : *System Analysis and Modeling : 4th International SDL and MSC Workshop, SAM 2004, Ottawa, Canada, June 1-4, 2004, Revised Selected Papers*. Sous la dir. d'Alan W. AMYOT Danieland Williams. Springer Berlin Heidelberg, 2005, p. 106-121. DOI : 10.1007/978-3-540-31810-1_8. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01674633>.
- [16] Christophe LOHR. *Contribution à la conception de systèmes temps-réel : utilisation de la technique de description formelle RT-Lotos*. Éditions universitaires européennes, 2010, p. 204. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01759103>.

7.2 Services relationnels et télé connectée

- [17] André THÉPAUT, Jérôme KERDREUX, Yvon KERMARREC, Christophe LOHR et Philippe NORMAND. « Évolution d'une application orientée services vers les Services Web ». In : *Génie logiciel* 76 (mars 2006), p. 35-41. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01759101>.

- [18] Sylvie PRONOST, Jérôme KERDREUX, Christophe LOHR, Maria Teresa SEGARRA et André THÉPAUT. « M@LIS : un cahier de vie pour les enfants souffrant d'infirmité motrice cérébrale ». In : *ASSISTH'2007 : 1ère Conférence Internationale sur l'accessibilité et les systèmes de suppléance aux personnes en situation de handicap, 19-21 Novembre, Toulouse, France*. Toulouse, France, déc. 2007, p. . URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01765358>.
- [19] André THÉPAUT, Maria Teresa SEGARRA, Christophe LOHR et Pierre-Marie CHAPON. « Adaptation and customization of services for the elderly ». In : *7th world conference ISG10 : International Society for Gerontechnology*. Vancouver, Canada, mai 2010, p. . URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01759102>.
- [20] André THÉPAUT, Jérôme KERDREUX, Christophe LOHR, Maria Teresa SEGARRA, Guillaume YCLON, Jean-Jacques HENNIN et Tahar BOUSSAHA. « Customized broadband services for the elderly ». In : *La Revue Française de Gériatrie et de Gérontologie* 38.4 (avr. 2013), p. 267-272. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00860502>.
- [21] André THÉPAUT, Maria Teresa SEGARRA et Christophe LOHR. « The software option ». In : *International Innovation* 157 (oct. 2014). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01175473>.

7.3 Communication et distribution de contenu

- [22] Sajjad Ali MUSHTAQ, Osman SALEM, Christophe LOHR et Annie GRAVEY. « Distributed call admission control in SIP based multimedia communication ». In : *NEM Summit 2008 : international congress on Networked Electronic Media, october 13-15, Saint Malo, France*. Saint-Malo, France, oct. 2008. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01809673>.
- [23] Sajjad Ali MUSHTAQ, Osman SALEM, Christophe LOHR et Annie GRAVEY. « Policy-based QoS management for multimedia communication ». In : *14th Eunice Open European Summer School, september 8-10 , Brest, France*. Brest, France, sept. 2008. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01699774>.
- [24] Sajjad Ali MUSHTAQ, Christophe LOHR et Annie GRAVEY. « An integration of semantics in multi criteria decision making for converged multimedia network management ». In : *IEEE GLOBECOM 2011 : Enabling Green Wireless Multimedia Communications*. Houston, Texas, United States, déc. 2011, p. 712-717. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00725498>.
- [25] Sajjad Ali MUSHTAQ, Christophe LOHR et Annie GRAVEY. « Decision Engine for SIP Based Dynamic Call Routing ». In : *5th Autonomous Infrastructure, Management and Security (AIMS)*. Sous la dir. d'Isabelle CHRISMENT, Alva COUCH, Rémi BADONNEL et Martin WALDBURGER. T. LNCS-6734. Managing the Dynamics of Networks and Services. Part 3 : Policy Management. Nancy, France : Springer, juin 2011, p. 86-99. DOI : 10.1007/978-3-642-21484-4_12. URL : <https://hal.inria.fr/hal-01585858>.
- [26] Sajjad Ali MUSHTAQ, Christophe LOHR et Annie GRAVEY. « Dynamic decision engine for data connections routing ». In : *INTERNET 2011 : Third International Conference on Evolving Internet*. Luxembourg, Luxembourg, juin 2011, p. . URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01759105>.

- [27] Sajjad Ali MUSHTAQ, Christophe LOHR et Annie GRAVEY. « Dynamic decision engine for unified communication ». In : *14th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. Miami Beach, Fl, United States : ACM (Association for Computing Machinery), oct. 2011, p. 31-40. DOI : 10.1145/2069117.2069125. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01759106>.
- [28] Sajjad Ali MUSHTAQ, Christophe LOHR et Annie GRAVEY. « MCDM method and semantics integration for unified communication management and control ». In : *FIT 2011 : Frontiers of Information Technology*. Islamabad, Pakistan, déc. 2011, p. 263-269. DOI : 10.1109/FIT.2011.56. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00670377>.
- [29] Sajjad Ali MUSHTAQ, Christophe LOHR et Annie GRAVEY. « Network management and control framework for hybrid converged environment ». In : *Cyber Journals : Multidisciplinary Journals in Science and Technology* (août 2011), p. 45-55. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00704161>.
- [30] Sajjad Ali MUSHTAQ, Christophe LOHR et Annie GRAVEY. « A Framework for Unified Traffic Dynamic Routing at Private-Public Network Border ». In : *ICC 2012 : 3rd IEEE International Workshop on SmArt COmmunications in NEtwork Technologies*. Ottawa, Canada, juin 2012. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01165704>.
- [31] Pratibha MITHARWAL, Christophe LOHR et Annie GRAVEY. « Survey on Network Interface Selection in Multihomed Mobile Networks ». In : *EUNICE 2014 : 20th Eunice Open European Summer School and Conference - EUNICE/IFIP EG 6.2, 6.6*. T. 8846 - LNCS (Lecture Notes in Computer Science). Rennes, France : Springer, sept. 2014, p. 134-146. DOI : 10.1007/978-3-319-13488-8_13. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01167136>.
- [32] Souheir EIDO, Pratibha MITHARWAL, Annie GRAVEY et Christophe LOHR. « MPTCP Solution for Seamless Local SIPTO Mobility ». In : *HPSR 2015 : 16th International Conference on High Performance Switching and Routing*. Budapest, Hungary, juill. 2015, p. 1-6. DOI : 10.1109/HPSR.2015.7483099. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01337291>.
- [33] Pratibha MITHARWAL, Christophe LOHR et Annie GRAVEY. « Boosting NEMO with Multi-Path TCP ». In : *NoF 2015 : 6th International Conference On Network of the Future*. Montreal, Canada : IEEE, sept. 2015, p. 1-7. DOI : 10.1109/NOF.2015.7333299. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01247509>.
- [34] Pratibha MITHARWAL, Christophe LOHR et Annie GRAVEY. « Performance Analysis of NEMO augmented with MPTCP ». In : *NTMS 2016 : International Conference on New Technologies, Mobility and Security*. Larnaca, Cyprus, nov. 2016, p. 1-5. DOI : 10.1109/NTMS.2016.7792468. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01510740>.

7.4 Systèmes ambiants et habitat intelligent

- [35] Molham DARWISH, Eric SENN, Christophe LOHR et Yvon KERMARREC. « A comparison between Ambient Assisted Living Systems ». In : *ICOST 2014 : 12th International Conference on Smart Homes and Health Telematics*. T. 8456 - LNCS (Lecture Notes in Computer Science). Denver, United States : Springer, juin 2014, p. 231-237. DOI : 10.1007/978-3-319-14424-5_26. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01186325>.

- [36] Christophe LOHR, Philippe TANGUY et Jérôme KERDREUX. « xAAL : A Distributed Infrastructure for Heterogeneous Ambient Devices ». In : *Journal of intelligent systems* 24.3 (mars 2015), p. 321-331. DOI : 10.1515/jisys-2014-0144. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01187869>.
- [37] Christophe LOHR, Philippe TANGUY et Jérôme KERDREUX. « Choosing security elements for the xAAL home automation system ». In : *ATC 2016 : 13th IEEE International Conference on Advanced and Trusted Computing*. Toulouse, France : IEEE, juill. 2016, p. 534-541. DOI : 10.1109/UIC-ATC-ScalCom-CBDCOM-IoP-SmartWorld.2016.104. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01354837>.
- [38] Philippe TANGUY, Christophe LOHR et Jérôme KERDREUX. « A Transparent home Sensors/Actuators layer for Health & Well-being services ». In : *IoTCare 2016 : EAI (European Alliance for Innovation) International Conference on IoT and Big Data Technologies for HealthCare*. T. 181 - LNICST (Lecture Notes of the Institute for CST). Budapest, Hungary : Springer, juin 2016, p. 29-35. DOI : 10.1007/978-3-319-49655-9_5. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01354817>.
- [39] Sao Mai NGUYEN, Christophe LOHR, Philippe TANGUY et Yiqiao CHEN. « Plug and play your robot into your smart home : Illustration of a new framework ». In : *Künstliche Intelligenz* 31.3 (août 2017), p. 283-289. DOI : 10.1007/s13218-017-0494-8. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01584437>.
- [40] Philippe TANGUY, Mathieu SIMONNET, Christophe LOHR et Jérôme KERDREUX. « A Transparent home Sensors/Actuators layer for Health & Well-being services ». In : *EAI endorsed transactions on pervasive health and technology* 3.11 (2017), p. 1-7. DOI : 10.4108/eai.18-7-2017.152900. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01598666>.
- [41] Christophe LOHR et Jérôme KERDREUX. « Improvements of the xAAL Home Automation System ». In : *Future internet* 12.6 (juin 2020), p. 104. DOI : 10.3390/fi12060104. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02884559>.
- [42] Damien BOUCHABOU, Sao Mai NGUYEN, Christophe LOHR, Ioannis KANELLOS et Benoit LEDUC. « Fully Convolutional Network Bootstrapped by Word Encoding and Embedding for Activity Recognition in Smart Homes ». In : *DL-HAR 2021 : 2nd International Workshop on Deep Learning for Human Activity Recognition*. T. 1370. Yokohama, Japan, jan. 2021, p. 111-125. DOI : 10.1007/978-981-16-0575-8_9. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03032449>.
- [43] Damien BOUCHABOU, Sao Mai NGUYEN, Christophe LOHR, Benoit LEDUC et Ioannis KANELLOS. « Using Language Model to Bootstrap Human Activity Recognition Ambient Sensors Based in Smart Homes ». In : *Electronics* 10.20 (2021). ISSN : 2079-9292. URL : <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/20/2498>.
- [44] Damien BOUCHABOU, Sao Mai NGUYEN, Christophe LOHR, Benoit LEDUC et Ioannis KANELLOS. « A Survey of Human Activity Recognition in Smart Homes Based on IoT Sensors Algorithms : Taxonomies, Challenges, and Opportunities with Deep Learning ». In : *Sensors* 21 (sept. 2021). DOI : 10.3390/s21186037. URL : <https://hal.inria.fr/hal-03343114>.
- [45] Damien BOUCHABOU, Sao Mai NGUYEN, Christophe LOHR, Benoit LEDUC et Ioannis KANELLOS. « What if time, or past context, improved human activity recognition in smart homes? ». In : *IEEE ICCE 2022 - 9th International Conference on Communications and Electronics*. T. Ambient Intelligence, Machine Learning and Applications. 2022.

- [46] Michael McTEAR, Kristiina JOKINEN, Mohnish DUBEY, Gérard CHOLLET, Jérôme BOUDY, Christophe LOHR, Sonja Dana ROELEN, Wanja MÖSSING et Rainer WIECHING. « Empowering Well-Being Through Conversational Coaching for Active and Healthy Ageing ». In : *ICOST 2022 : 19th International Conference on Smart Homes and Health Telematics*. Sous la dir. d'Hamdi ALOULOU, Bessam ABDULRAZAK, Antoine de MARASSÉ-ENOUF et Mounir MOKHTARI. Lecture Notes in Computer Science - Participative Urban Health and Healthy Aging in the Age of AI. Paris, France : Springer International Publishing, 2022, p. 257-265. ISBN : 978-3-031-09593-1.
- [47] Houda NAJEH, Christophe LOHR et Benoit LEDUC. « Dynamic Segmentation of Sensor Events for Real-Time Human Activity Recognition in a Smart Home Context ». In : *Sensors* 22.14 (2022). ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s22145458. URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/14/5458>.
- [48] Houda NAJEH, Christophe LOHR et Benoit LEDUC. « Real-Time Human Activity Recognition in Smart Home on Embedded Equipment : New Challenges ». In : *ICOST 2022 : 19th International Conference on Smart Homes and Health Telematics*. Sous la dir. d'Hamdi ALOULOU, Bessam ABDULRAZAK, Antoine de MARASSÉ-ENOUF et Mounir MOKHTARI. T. 13287. Lecture Notes in Computer Science - Participative Urban Health and Healthy Aging in the Age of AI. Paris, France : Springer International Publishing, juin 2022, p. 125-138. DOI : 10.1007/978-3-031-09593-1_10. URL : <https://hal.science/hal-03782651>.
- [49] Houda NAJEH, Christophe LOHR et Benoit LEDUC. « Towards supervised real-time human activity recognition on embedded equipment ». In : *MetroLivEn 2022 : IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment*. Cosenza, Italy : IEEE, mai 2022, p. 54-59. DOI : 10.1109/MetroLivEnv54405.2022.9826937. URL : <https://hal.science/hal-03783217>.
- [50] Damien BOUCHABOU, Juliette GROSSET, Sao Mai NGUYEN, Christophe LOHR et Xavier PUIG. « A Smart Home Digital Twin to Support the Recognition of Activities of Daily Living ». In : *Sensors* 23.17 (2023). ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s23177586. URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/17/7586>.
- [51] Damien BOUCHABOU, Sao Mai NGUYEN, Christophe LOHR, Benoit LEDUC et Ioannis KANELLOS. « Reconnaissance d'activités de la vie quotidienne au moyen de capteurs domotiques : lorsque syntaxe, sémantique et contexte se rencontrent ». In : *Revue Ouverte d'Intelligence Artificielle* 4.1 (2023), p. 129-156. DOI : 10.5802/roia.53. URL : <https://roia.centre-mersenne.org/articles/10.5802/roia.53/>.
- [52] Damien BOUCHABOU, Sao Mai NGUYEN, Christophe LOHR, Benoit LEDUC et Ioannis KANELLOS. « Representation of Irregularly Sampled Time Series with Generative Language Models for Classification and Transfer Learning ». In : *Machine Learning for Irregular Time Series Workshop in ECML PKDD*. Turin (IT), Italy : LNCS, sept. 2023. URL : <https://hal.science/hal-04437409>.
- [53] Michael McTEAR, Kristiina JOKINEN, Mirza Mohtashim ALAM, Qasid SALEEM, Giulio NAPOLITANO, Florian SZCZEPANIAK, Mossaab HARIZ, Gérard CHOLLET, Christophe LOHR, Jérôme BOUDY, Zohre AZIMI, Sonja Dana ROELEN et Rainer WIECHING. « Interaction with a Virtual Coach for Active and Healthy Ageing ». In : *Sensors* 23.5 (2023). ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s23052748. URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/5/2748>.
- [54] Houda NAJEH, Christophe LOHR et Benoit LEDUC. « Considering the mutual information criterion for sensor configuration selection in human activity recognition in smart homes ». In : *Building Simulation 2023*. Shanghai, China, sept. 2023.

- [55] Houda NAJEH, Christophe LOHR et Benoit LEDUC. « Convolutional Neural Network Bootstrapped by Dynamic Segmentation and Stigmergy-Based Encoding for Real-Time Human Activity Recognition in Smart Homes ». In : *Sensors* 23.4 (fév. 2023), p. 1969. DOI : 10.3390/s23041969. URL : <https://hal.science/hal-03984715>.
- [56] Florian SZCZEPANIAK, Jérôme BOUDY, Gérard CHOLLET, Mossaab HARIZ et Christophe LOHR. « A Virtual Assistant Dedicated to the Accompaniment of the Person Informed of His Life Context Thanks to the Smartphone ». In : *Proceedings of the 16th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*. PETRA '23. Corfu, Greece : Association for Computing Machinery, 2023, p. 662-666. ISBN : 9798400700699. DOI : 10.1145/3594806.3596594. URL : <https://doi.org/10.1145/3594806.3596594>.
- [57] Florian SZCZEPANIAK, Jérôme BOUDY, Gérard CHOLLET, Mossaab HARIZ et Christophe LOHR. « Un assistant virtuel dédiée à l'accompagnement de la personne, averti de son contexte de vie, grâce au smartphone ». In : *JETSAN 2023 : Dispositifs biomédicaux et technologies numériques en santé ; des besoins aux usages*. Paris, France, juin 2023. URL : <https://jetsan2023.sciencesconf.org/468689>.
- [58] Gérard CHOLLET, Hugues SANSEN, Yannis TEVISSSEN, Jérôme BOUDY, Mossaab HARIZ, Christophe LOHR et Fathy YASSA. « Privacy Preserving Personal Assistant with On-Device Diarization and Spoken Dialogue System for Home and Beyond ». In : *IHIET 2024*. Lausanne, Switzerland, avr. 2024. DOI : 10.54941/ahfeXXXX. URL : <https://hal.science/hal-04378982>.
- [59] Jasmin LEHMANN, Lorenz GRANRATH, Ryan BROWNE, Toshimi OGAWA, Keisuke KOKUBUN, Yasuyuki TAKI, Kristiina JOKINEN, Sarah JANBOECKE, Christophe LOHR, Rainer WIECHING, Roberta BEVILACQUA, Sara CASACCIA et Gian Marco REVEL. « Digital Twins for Supporting Ageing Well : Approaches in Current Research and Innovation in Europe and Japan ». In : *Sustainability* 16.7 (2024). ISSN : 2071-1050. DOI : 10.3390/su16073064. URL : <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/7/3064>.
- [60] Riccardo NACCARELLI, Francesca D'AGRESTI, Sonja Dana ROELEN, Kristiina JOKINEN, Sara CASACCIA, Gian Marco REVEL, Martino MAGGIO, Zohre AZIMI, Mirza Mohtashim ALAM, Qasid SALEEM, Abrar Hyder MOHAMMED, Giulio NAPOLITANO, Florian SZCZEPANIAK, Mossaab HARIZ, Gérard CHOLLET, Christophe LOHR, Jérôme BOUDY, Rainer WIECHING et Toshimi OGAWA. « Empowering Smart Aging : Insights into the Technical Architecture of the e-VITA Virtual Coaching System for Older Adults ». In : *Sensors* 24.2 (2024). ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s24020638. URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/2/638>.
- [61] Houda NAJEH, Christophe LOHR et Benoit LEDUC. « Real-Time Human Activity Recognition on Embedded Equipment : A Comparative Study ». In : *Applied Sciences* 14.6 (2024). ISSN : 2076-3417. DOI : 10.3390/app14062377. URL : <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/6/2377>.

7.5 Robotique d'assistance

- [62] André THÉPAUT, Sao Mai NGUYEN et Christophe LOHR. « Télé-rééducation fonctionnelle dans le cadre du projet VITAAL ». In : *Actualités en médecine physique et de réadaptation* 1 (mars 2017), p. 18-19. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01514898>.

- [63] Panagiotis PAPADAKIS, Christophe LOHR, Marin LUJAK, Abir B KARAMI, Ioannis KANELLOS, Guillaume LOZENGUEZ et Anthony FLEURY. « System Design for Coordinated Multi-Robot Assistance Deployment in Smart Spaces ». In : *IEEE International Conference on Robotic Computing*. Los Angeles, United States, jan. 2018. URL : <https://hal.inria.fr/hal-01699838>.
- [64] Samia BENFERHAT, Florent FRIZON DE LAMOTTE, Christophe LOHR et Jean-Luc PHILIPPE. « Modélisation d'interactions avec un Cobot dans un contexte d'assistance à la personne ». In : *Handicap 2020 - Technologies pour l'autonomie et l'inclusion*. Nov. 2020, p. 206-211.
- [65] Linda Nanan VALLÉE, Christophe LOHR, Sao Mai NGUYEN, Ioannis KANELLOS et O. ASSEU. « Building An Automated Gesture Imitation Game For Teenagers with ASD ». In : *Far East Journal of Electronics and Communications* 23.1 (jan. 2020), p. 1-10. DOI : 10.17654/EC023010001. URL : <https://hal-imt-atlantique.archives-ouvertes.fr/hal-02894314>.
- [66] Linda Nanan VALLÉE, Sao Mai NGUYEN, Christophe LOHR, Ioannis KANELLOS et Olivier ASSEU. « How An Automated Gesture Imitation Game Can Improve Social Interactions With Teenagers With ASD ». In : *IEEE ICRA Workshop on Social Robotics for Neurodevelopmental Disorders*. Paris, France, juin 2020. URL : <https://hal-imt-atlantique.archives-ouvertes.fr/hal-02894330>.
- [67] Linda Nanan VALLÉE, Sao Mai NGUYEN, Christophe LOHR, Ioannis KANELLOS et Olivier ASSEU. « Human Skeleton Detection, Modeling and Gesture Imitation Learning for a Social Purpose ». In : *Engineering* 12.02 (2020), p. 90-98. DOI : 10.4236/eng.2020.122009. URL : <https://hal-imt-atlantique.archives-ouvertes.fr/hal-02894323>.
- [68] Samia BENFERHAT, Florent FRIZON DE LAMOTTE, Christophe LOHR et Jean-Luc PHILIPPE. « Gestion d'interaction Humain-Cobot pour l'exécution de tâches en cuisine ». In : *JETSAN 2021 - Solutions numériques pour l'autonomie des personnes*. Mai 2021.
- [69] Alireza ASVADI, Andrei MITRIAKOV, Christophe LOHR et Panagiotis PAPADAKIS. « Digital Twin Driven Smart Home : A Feasibility Study ». In : *ICOST 2022 : 19th International Conference on Smart Homes and Health Telematics*. Sous la dir. d'Hamdi ALOULOU, Bessam ABDULRAZAK, Antoine de MARASSÉ-ENOUF et Mounir MOKHTARI. T. 13287. Lecture Notes in Computer Science - Participative Urban Health and Healthy Aging in the Age of AI. Paris, France : Springer International Publishing, 2022. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03691144>.

7.6 Thèses co-encadrées

- [70] Sajjad Ali MUSHTAQ. « A Framework Implementing Multi-Criteria Least Cost Routing for IP Multimedia Services ». Theses. Télécom Bretagne, Université de Rennes 1, jan. 2012. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00719597>.
- [71] Molham DARWISH. « Architecture and deployment of services of assistance to the person ». Theses. Université de Bretagne Sud, sept. 2016. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01429092>.
- [72] Pratibha MITHARWAL. « A study of IP network mobility in a multihomed context ». Theses. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne - ENSTB, sept. 2016. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01714954>.

- [73] Damien BOUCHABOU. « Human activity recognition in smart homes : tackling data variability using context-dependent deep learning, transfer learning and data synthesis ». Theses. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique, mai 2022. URL : <https://theses.hal.science/tel-03728064>.

Chapitre 8

Bibliographie

- [74] Percy Williams BRIDGMAN. *Dimensional analysis*. Yale University Press, 1922.
- [75] Peter C. FISHBURN. « Additive Utilities with Incomplete Product Sets : Application to Priorities and Assignments ». In : *Operations Research Society of America (ORSA)* 15 (1967), p. 537-542.
- [76] David W. MILLER et Kenneth Starr MARTIN. *Executive Decisions and Operations Research*. Prentice-Hall, 1969.
- [77] Richard C. BISHOP et Thomas A. HEBERLEIN. « Measuring Values of Extramarket Goods : Are Indirect Measures Biased? ». In : *American Journal of Agricultural Economics* 61 (1979), p. 926-930. DOI : [10.22004/ag.econ.277818](https://doi.org/10.22004/ag.econ.277818).
- [78] Michel de CERTEAU, Luce. GIARD et Pierre MAYOL. *L'invention du quotidien, Tome 1 : Arts de faire*. Paris, France : Union générale d'éditions, 1980.
- [79] Thomas L. SAATY. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill International, 1980, p. 287.
- [80] C.L. HWANG et K. YOON. *Multiple Attribute Decision Making : Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer Berlin Heidelberg, 1981. ISBN : 9783540105589.
- [81] Julong L. DENG. « Introduction to Grey system theory ». In : *Journal of Grey System* 1 (1989), p. 1-24.
- [82] Michael HANEMANN, John LOOMIS et Barbara KANNINEN. « Statistical Efficiency of Double-Bounded Dichotomous Choice Contingent Valuation ». In : *American Journal of Agricultural Economics* 73 (nov. 1991). DOI : [10.2307/1242453](https://doi.org/10.2307/1242453).
- [83] Jakob NIELSEN. *Usability Engineering*. Sous la dir. de Morgan KAUFMANN. Interactive Technologies. Elsevier Science, 1994, p. 362. ISBN : 978-0-12-518406-9.
- [84] Sepp HOCHREITER et Jürgen SCHMIDHUBER. « Long Short-Term Memory ». In : *Neural Computation* 9.8 (nov. 1997), p. 1735-1780. ISSN : 0899-7667. DOI : [10.1162/neco.1997.9.8.1735](https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735). eprint : <https://direct.mit.edu/neco/article-pdf/9/8/1735/813796/neco.1997.9.8.1735.pdf>. URL : <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
- [85] Hasan PIRKUL et Vaidyanathan JAYARAMAN. « A multi-commodity, multi-plant, capacitated facility location problem : formulation and efficient heuristic solution ». In : *Computers and Operations Research* 25.10 (1998), p. 869-878. ISSN : 0305-0548. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(97\)00096-8](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(97)00096-8).
- [86] Cmak CI et Haakon BRYHNI. « Multicast-Unicast Reflector ». In : (avr. 1999). URL : https://www.researchgate.net/publication/2855653_Multicast-Unicast_Reflector.

- [87] Szabolcs BOROS. « Policy-Based Network Management with SNMP ». In : *CTIT technical reports series* (2000), p. 165-172.
- [88] John Z. WANG et Almon TANG. *Universal Mobile IP (UMIP) Intelligent Routing*. Draft. Fremont, CA, USA : RFC Editor, juill. 2000. URL : <https://www.ietf.org/archive/id/draft-wang-manet-umip-routing-00.txt>.
- [89] Joy KURI et Sneha Kumar KASERA. « Reliable Multicast in Multi-Access Wireless LANs ». In : *Wireless Networks 7.4* (juill. 2001), p. 359-369. ISSN : 1572-8196. URL : <https://doi.org/10.1023/A:1016631911947>.
- [90] Françoise LE BORGNE-UGUEN et Simone PENNEC. « L'adaptation de l'habitat chez des personnes de plus de 60 ans souffrant de maladies et/ou de handicaps et vivant à domicile ». In : *Les techniques de la vie quotidienne, Ages et usages*. Sous la dir. d'Alain Rozenkier FRANÇOISE BOUCHAYER Catherine Gorgeon. Paris, France : DREES, 2002, p. 133-142. ISBN : 2-11-092381-4.
- [91] Samir A. Elsagheer MOHAMED et Gerardo RUBINO. « A study of real-time packet video quality using random neural networks ». In : *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* 12 (2002), p. 1071-1083.
- [92] Wei XING, Holger KARL, Adam WOLISZ et Harald MÜLLER. « M-SCTP : Design and Prototypical Implementation of an SCTP-Based, End-to-End Mobility Concept for IP Networks ». In : *The Internet Challenge : Technology and Applications*. Sous la dir. de Günter HOMMEL et Sheng HUANYE. Dordrecht : Springer Netherlands, 2002, p. 139-147. ISBN : 978-94-010-0494-7. DOI : 10.1007/978-94-010-0494-7_16.
- [93] Laura FAULKNER. « Beyond the five-user assumption : Benefits of increased sample sizes in usability testing ». In : *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 35.3 (août 2003), p. 379-383. ISSN : 1532-5970. URL : <https://doi.org/10.3758/BF03195514>.
- [94] Patrice FLICHY. *L'innovation technique. Récents développements en sciences sociales. Vers une nouvelle théorie de l'innovation*. Sous la dir. de LA DÉCOUVERTE. Fév. 2003, p. 256. ISBN : 978-2-7071-4000-5.
- [95] Martin HEUSSE, Franck ROUSSEAU, Gilles BERGER-SABBATEL et Andrzej DUDA. « Performance Anomaly of 802.11b ». In : *In IEEE INFOCOM*. 2003. URL : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.380.8999>.
- [96] Jung-Min PARK, Min-Jung JIN et Kijoon CHAE. « Secure Firewall Traversal in Mobile IP Network ». In : *Computational Science — ICCS 2003*. Sous la dir. de Peter M. A. SLOOT, David ABRAMSON, Alexander V. BOGDANOV, Yuriy E. GORBACHEV, Jack J. DONGARRA et Albert Y. ZOMAYA. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2003, p. 535-544. ISBN : 978-3-540-44864-8.
- [97] Novella BARTOLINI, Emiliano CASALICCHIO et Salvatore TUCCI. « A Walk through Content Delivery Networks ». In : *Performance Tools and Applications to Networked Systems*. Sous la dir. de Maria Carla CALZAROSSA et Erol GELENBE. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2004, p. 1-25. ISBN : 978-3-540-24663-3.
- [98] André THÉPAUT, Maria-Teresa SEGARRA, Jérôme KERDREUX et Philippe NORMAND. « De la Télé-assistance pour personnes âgées à la Télé-relation : évolution du projet T@PA ». In : *Les Nouvelles technologies dans la cité, Rennes le 9 Décembre 2004*. Rennes, France, déc. 2004, p. . URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02173441>.
- [99] 3GPP. *TS 29.207 Policy control over Go interface*. 2005. URL : <https://itectec.com/archive/3gpp-specification-ts-29-207/>.

- [100] 3GPP. *TS 29.209 Policy control over Gq interface*. 2005. URL : <https://itectec.com/archive/3gpp-specification-ts-29-209/>.
- [101] Dominique CARDON. « Innovation par l'usage ». In : *Enjeux de mots : regards multiculturels sur les sociétés de l'information*. Sous la dir. de Daniel Pimienta ALAIN AMBROSI Valérie Peugeot. Caen, France : C&F Éditions, 2005. ISBN : 978-2-37662-009-9.
- [102] Isabelle MALLON. *Vivre en maison de retraite. Le dernier chez-soi*. Sous la dir. de Presses Universitaires de RENNES. Rennes, 2005, p. 288. ISBN : 978-2-8684-7859-7.
- [103] A. MOUDEN, Jérôme KERDREUX, Yvon KERMARREC, Philippe NORMAND, Maria-Teresa SEGARRA et André THÉPAUT. « Evolution d'une plate-forme logicielle vers les Web services : méthodologie et expérimentation ». In : *ICSSEA '2005, 18èmes Journées Internationales*. Paris, France, nov. 2005. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02137795>.
- [104] Philippe NORMAND, Jérôme KERDREUX, Maria-Teresa SEGARRA et André THÉPAUT. « Le projet T@PA : retour d'expérimentations d'une application orientée Web ». In : *ICSSEA '2005, 18èmes Journées Internationales*. Paris, France, nov. 2005. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02169775>.
- [105] Simone PENNEC et Trelu HÉLÈNE. « De la téléassistance à la télécommunication à domicile pour les personnes à mobilité réduite ». In : *Technologies urbaines, vieillissements et handicaps*. Sous la dir. de Simone Pennec et FRANÇOISE LE BORGNE-UGUEN. Rennes, France : Éditions de l'École Nationale de Santé Publique, 2005. Chap. 8, p. 131-150. ISBN : 978-2-85952-913-0.
- [106] Diego DUJOVNE et Thierry TURLETTI. *Multicast in 802.11 WLANs : An Experimental Study*. Research Report RR-5947. Rocquencourt, France : INRIA, 2006, p. 23. URL : <https://hal.inria.fr/inria-00084130>.
- [107] Simone PENNEC et Sylvie PRONOST. *Évaluation d'une plate-forme de télé-relation à l'usage d'enfants souffrant d'infirmité motrice cérébrale*. Rapp. tech. Brest, France : ARS-UBO, 2006, p. 41. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-00672857>.
- [108] Simone PENNEC et Sylvie PRONOST. *Télé-assistance et Télé-relation à l'usage des enfants souffrant d'infirmité motrice cérébrale*. Rapp. tech. Contrat de recherche LADAPT, Fond de soutien citoyen SFR. Brest, France : ARS-UBO, 2006, p. 35. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-00672856>.
- [109] Simone PENNEC et Sylvie PRONOST. *Télé-assistance et Télé-relation à l'usage des personnes à mobilité réduite*. Rapp. tech. Contrat de recherche AFM SFR. Brest, France : ARS-UBO, 2006, p. 65. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-00672848>.
- [110] Simone PENNEC et Sylvie PRONOST. *Télé-assistance et Télé-relation à l'usage des personnes âgées*. Rapp. tech. Contrat de recherche Fondation Louis Le Prince Ringuet. Brest, France : ARS-UBO, 2006, p. 55. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-00672851>.
- [111] Elena KORNYSHOVA et Camille SALINESI. « MCDM Techniques Selection Approaches : State of the Art ». In : *2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-Criteria Decision-Making (2007)*, p. 22-29.
- [112] Simone PENNEC. « Liens sociaux et médiations techniques ». In : *Co-conception et logiques d'usage en E-santé : entre sciences sociales et sciences de l'ingénieur*. Brest, France, juin 2007. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-00670896>.
- [113] Martine SEGALLEN et Claudine ATTIAS-DONFUT. *Grands-parents. La famille à travers les générations*. Sous la dir. d'Odile JACOB. 2007, p. 360. ISBN : 978-2-7381-1979-7.

- [114] Simone PENNEC et Hélène TRELLU. *Enquête auprès d'un établissement pour personnes âgées en vue de l'expérimentation d'une plateforme technologique. Constitution du réseau des partenaires*. Rapp. tech. Projet Companymages-AIPA. Brest, France : ARS-UBO, jan. 2008, p. 45. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-00672832>.
- [115] Simone PENNEC et Hélène TRELLU. *Enquête auprès des résident.e.s et des personnels. Dispositif technologique et réseaux relationnels mobilisés*. Rapp. tech. Projet Companymages-AIPA. Brest, France : ARS-UBO, sept. 2008, p. 56. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-00672835>.
- [116] Sébastien BARRÉ, Amine DHRAIEF, Nicolas MONTAVONT et Olivier BONAVENTURE. « MipShim6 : une approche combinée pour la mobilité et la multi-domiciliation ». In : *Actes du 14ème Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles (CFIP 09)*, Strasbourg. Oct. 2009, p. 113-124.
- [117] Fabrice BONNAUD, Maria-Teresa SEGARRA, Corinne LE MOAN, Jérôme KERDREUX et André THÉPAUT. « Companymages/ AIPA : offering communication and comfort services to the aged in institution ». In : *Aged Cared Informatics Symposium*. Canberra, Australia, août 2009. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00446145>.
- [118] Ranveer CHANDRA, Sandeep KARANTH, Thomas MOSCIBRODA, Vishnu NAVDA, Jitendra PADHYE, Ramachandran RAMJEE et Lenin RAVINDRANATH. « DirCast : A Practical and Efficient Wi-Fi Multicast System ». In : *17th IEEE International Conference on Network Protocols*. 2009, p. 161-170. DOI : 10.1109/ICNP.2009.5339686.
- [119] Simone PENNEC, Hélène TRELLU et Nicole HERRY. *Analyse de la mise en place d'une plate-forme de communication dans une résidence de personnes âgées*. Rapp. tech. Projet Companymages-AIPA. Brest, France : ARS-UBO, sept. 2009, p. 118. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-00672828>.
- [120] Simone PENNEC, Hélène TRELLU et Nicole HERRY. « Les technologies et les différents visages de la vieillesse : des processus de conception innovants face à des représentations plurielles ». In : *7ème séminaire M@rsouin, Session 2 "Les TIC, un outil pour personnes fragilisées ?"* Trégastel, France, mai 2009, p. 1-13. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-00667724>.
- [121] Maria-Teresa SEGARRA et André THÉPAUT. « Miming navigation pages with a personal remote control device for the aged ». In : *AAATE 2009 : association for the advancement of assistive technology in Europe*. Florence, Italy, août 2009. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00446171>.
- [122] André THÉPAUT, Jérôme KERDREUX, Corinne LE MOAN, Maria-Teresa SEGARRA, Hélène TRELLU et Fabrice BONNAUD. « AIPA : aide par l'image aux personnes âgées : un projet soutenu par le pôle "Images et réseaux" ». In : *SFTAG'09 : 1er congrès de la société française des technologies pour l'autonomie et de gérontechnologie*. Troyes, France, nov. 2009. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00442791>.
- [123] Hélène TRELLU et André THÉPAUT. « Société branchée : quelle place pour tous nos aînés ? » In : *Colloque Intertic, Université du Québec*. Montréal, Canada, mai 2009, p. . URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02162146>.
- [124] Arnaud CAMPÉON. « Des vieillesse en solitude : trajectoires et expériences de solitude après la retraite ». Thèse de doct. 2010, p. 541. URL : <http://www.theses.fr/2010LIL30019>.
- [125] Flavio E. GONCALVES. *Building telephony systems with OpenSIPS 1.6 : build scalable and robust telephony systems using SIP*. From technologies to solutions. Birmingham, U.K. : Packt Publishing, 2010, p. 264. ISBN : 978-1-849510-74-5.

- [126] Jean-Baptiste LEZORAY, Maria-Teresa SEGARRA, An PHUNG KHAC, André THÉPAUT, Jean-Marie GILLIOT et Antoine BEUGNARD. « A design process enabling adaptation and customization of services for the elderly ». In : *IWAAL-2010 : International Workshop on Ambient Assisted Living*. Valancia, Spain, sept. 2010. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00565845>.
- [127] Simone PENNEC et Elisabeth NÉDÉLEC. *Étude des usages d'une plateforme de communication par des résidents âgés*. Rapp. tech. Projet Companymages-AIPA, Rapport 4. Brest, France : ARS (Atelier de Recherche Sociologique), oct. 2010, p. 166. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-02172619>.
- [128] Simone PENNEC et Elisabeth NÉDÉLEC. *Étude des usages d'une plateforme de communication par des résidents âgés*. Rapp. tech. Projet Companymages-AIPA. Brest, France : ARS-UBO, juill. 2010, p. 116. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-00672809>.
- [129] Simone PENNEC et Elisabeth NÉDÉLEC. « Parcours d'usages d'un objet technologique expérimenté par des résidents âgés ». In : *8ième séminaire M@rsouin*. Dinan, France, mai 2010. URL : <https://www.marsouin.org/article411.html>.
- [130] Simone PENNEC et Gwendal SIMON. *Analyse des services et des équipements techniques pour un domicile adapté aux personnes âgées*. Rapp. tech. Projet SIGAAL. Brest, France : ARS-UBO, 2010, p. 72. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-00672811>.
- [131] Simone PENNEC et Gwendal SIMON. « Corps, technologies et handicaps dans le logement : comment favoriser la capacité d'action des vieilles personnes ? » In : *8ème séminaire M@rsouin. Session 1 "TIC et personnes âgées"*. Dinan, France, mai 2010, p. 1-2. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-00667742>.
- [132] Carole Anne RIVIÈRE et Amandine BRUGIÈRE. *Bien vieillir grâce au numérique*. Sous la dir. de FYP ÉDITIONS. 2010, p. 160. ISBN : 978-2-916571-43-0.
- [133] Hélène TRELLU. « La conception d'un support numérique par les personnes vieillissantes : approche sociologique des techniques mises en œuvre et implication des futurs usager ». In : *Actes du colloque jeunes chercheurs NEDEP*. 37. Brest, France, 2010. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-02114351>.
- [134] 3GPP. *Local IP Access and Selected IP Traffic Offload (LIPA-SIPTO)*. Technical report, Release 10, TR 23.829. Mars 2011. URL : <http://115.125.87.227/3GPP/Specs/23829-a00.pdf> (visité le 01/07/2022).
- [135] Carole BONNET, Emmanuelle CAMBOIS, Chantal CASES et Joëlle GAYMU. « La dépendance, aujourd'hui l'affaire des femmes, demain davantage celle des hommes ? » In : *Population et Sociétés* 483 (nov. 2011).
- [136] Kirill KOUZOUBOV et Robert SIMAC. *Jsocks – JAVA SOCKS Server*. 2011. URL : <http://jsocks.sourceforge.net/> (visité le 01/07/2022).
- [137] Simone PENNEC et Camilla GUTTIERREZ. *Analyse des services et des équipements techniques pour un domicile adapté aux personnes âgées*. Rapp. tech. Projet SIGAAL, Rapport 1. Brest, France : ARS-UBO, jan. 2011, p. 142. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-02172623>.
- [138] VYNCKE, ÉRIC. *Home Networking (homenet) – IETF Working Group Charter*. Juill. 2011. URL : <https://datatracker.ietf.org/doc/charter-ietf-homenet/> (visité le 01/07/2022).
- [139] Zhongliang YUE. « An extended TOPSIS for determining weights of decision makers with interval numbers ». In : *Knowledge-Based Systems* 24.1 (2011), p. 146-153.

- [140] Li ZHE, Karim Mohamed SBAl, Yassine HADJADJ-AOUL, Annie GRAVEY, Damien ALLIEZ, Jeremie GARNIER, Gerard MADEC, Gwendal SIMON et Kamal Deep SINGH. « Network Friendly Video Distribution ». In : *International Conference on Network of the Future*. Tunis, Tunisia, nov. 2012. URL : <https://hal.inria.fr/hal-00753205>.
- [141] Martin BECKE, Hakim ADHARI, Erwin P. RATHGEB, Fu FA, Xiong YANG et Xing ZHOU. « Comparison of Multipath TCP and CMT-SCTP based on Intercontinental Measurements ». In : *2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)* (2013), p. 1360-1366.
- [142] Diane J. COOK, Aaron S. CRANDALL, Brian L. THOMAS et Narayanan C. KRISHNAN. « CASAS : A Smart Home in a Box ». In : *Computer* 46.7 (2013), p. 62-69. DOI : 10.1109/MC.2012.328.
- [143] Fabrice GUILLEMIN, Thierry HOUDOIN et Stephanie MOTEAU. « Volatility of YouTube content in Orange networks and consequences ». In : *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, ICC 2013, Budapest, Hungary, June 9-13, 2013*. IEEE, 2013, p. 2381-2385. DOI : 10.1109/ICC.2013.6654887. URL : <http://dx.doi.org/10.1109/ICC.2013.6654887>.
- [144] Ridha LOUKIL. *Six industriels français créent Confluens pour standardiser la domotique*. Juin 2013. URL : <https://www.usine-digitale.fr/editorial/six-industriels-francais-creent-confluens-pour-standardiser-la-domotique.N200387> (visité le 01/06/2022).
- [145] Tomas MIKOLOV, Ilya SUTSKEVER, Kai CHEN, Greg S CORRADO et Jeff DEAN. « Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality ». In : *Advances in Neural Information Processing Systems*. Sous la dir. de C.J. BURGESS, L. BOTTOU, M. WELLING, Z. GHAHRAMANI et K.Q. WEINBERGER. T. 26. Curran Associates, Inc., 2013. URL : <https://proceedings.neurips.cc/paper/2013/file/9aa42b31882ec039965f3c4923ce901b-Paper.pdf>.
- [146] Simone PENNEC et Camilla GUTTIERREZ. *Etude des partenariats de projet et des pratiques de deux expérimentateurs dans des logements sociaux équipés de capteurs et d'une plateforme de télécommunication*. Rapp. tech. Projet SIGAAL, Rapport 2. Brest, France : ARS-UBO, 2013, p. 176. URL : <https://hal.univ-brest.fr/hal-02172622>.
- [147] Junyoung CHUNG, Caglar GULCEHRE, KyungHyun CHO et Yoshua BENGIO. « Empirical Evaluation of Gated Recurrent Neural Networks on Sequence Modeling ». In : *NIPS 2014 Workshop on Deep Learning*. Déc. 2014. DOI : 10.48550/ARXIV.1412.3555.
- [148] Richard GAYRAUD, Olivier JACQUES et al. *SIPp – A free Open Source test tool and traffic generator for the SIP protocol*. 2014. URL : <http://sipp.sourceforge.net> (visité le 01/07/2022).
- [149] Mukhtiar MEMON, Stefan Rahr WAGNER, Christian Fischer PEDERSEN, Femina Hassan Aysha BEEVI et Finn Overgaard HANSEN. « Ambient Assisted Living Healthcare Frameworks, Platforms, Standards, and Quality Attributes ». In : *Sensors* 14.3 (2014), p. 4312-4341. ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s140304312. URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/3/4312>.
- [150] Jeffrey PENNINGTON, Richard SOCHER et Christopher MANNING. « GloVe : Global Vectors for Word Representation ». In : *Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*. Doha, Qatar : Association for Computational Linguistics, oct. 2014, p. 1532-1543. DOI : 10.3115/v1/D14-1162. URL : <https://aclanthology.org/D14-1162>.

- [151] P.J PIÑERO, José CORTÉS, Josemaria MALGOSA, Francisco Javier CAÑETE CORRIPIO, Pilar MANZANARES-LOPEZ et Luis DIEZ. « Analysis and improvement of multicast communications in HomePlug AV-based in-home networks ». In : *Computer Networks* 62 (avr. 2014), p. 89-100. DOI : 10.1016/j.comnet.2014.01.003. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128614000218>.
- [152] Pedro José PIÑERO ESCUER. « Analysis and Evaluation of In-home Networks Based on HomePlug-AV PowerLine Communications ». Thèse de doct. Cartagena, Spain : Universidad Politecnica de Cartagena, 2014. URL : <https://repositorio.upct.es/handle/10317/4179>.
- [153] OASIS. *Message Queuing Telemetry Transport*. Déc. 2015. URL : <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/mqtt-v3.1.1.html> (visité le 01/06/2022).
- [154] Gideon LEWIS-KRAUS. *The Great A.I. Awakening*. Déc. 2016. URL : <https://www.nytimes.com/2016/12/14/magazine/the-great-ai-awakening.html> (visité le 01/06/2022).
- [155] Mathieu SIMONNET et Bernard GOURVENNEC. « Heart rate sensors acceptability : data reliability vs. ease of use ». In : *13th Annual International Body Sensor Networks Conference (BSN 2016)*. San Francisco, CA, United States : IEEE, juin 2016, p. 94-98. DOI : 10.1109/BSN.2016.7516239. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01359076>.
- [156] Julie SOULAS. « Activity monitoring through home automation devices ». Theses. Télécom Bretagne ; Université de Bretagne Occidentale, mars 2016. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01356217>.
- [157] Piotr BOJANOWSKI, Edouard GRAVE, Armand JOULIN et Tomas MIKOLOV. « Enriching Word Vectors with Subword Information ». In : *Transactions of the Association for Computational Linguistics* 5 (2017), p. 135-146. DOI : 10.1162/tacl_a_00051. URL : <https://aclanthology.org/Q17-1010>.
- [158] DLNA. *Digital Living Networking Alliance*. 2017. URL : <https://www.dlna.org/> (visité le 01/06/2022).
- [159] Jonathan LAZAR, Jinjuan Heidi FENG et Harry HOCHHEISER. *Research Methods in Human Computer Interaction*. Sous la dir. de Morgan KAUFMANN. Boston : Elsevier Science, 2017, p. 560. ISBN : 978-0-12-805390-4.
- [160] Marisnel Carolina OLIVARES AMARO. « Analyse, modélisation et implémentation de stratégies d'assistance : déploiement d'orthèses cognitives pour les activités instrumentales de la vie quotidienne des traumatisés crâniens ». Theses. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique ; Université de Sherbrooke (Québec, Canada), fév. 2017. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02179629>.
- [161] G PASTERGIU, G FAIRHURST, D ROS, A BRUNSTROM, K GRINNEMO, P HURTIG, N KHADEMI, M TÜXEN, M WELZL, D DAMJANOVIC et S MANGIANTE. « De-Ossifying the Internet Transport Layer : A Survey and Future Perspectives ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 19.1 (2017), p. 619-639. ISSN : 1553-877X. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7738442>.
- [162] Zhiguang WANG, Weizhong YAN et Tim OATES. « Time series classification from scratch with deep neural networks : A strong baseline ». In : *2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. 2017, p. 1578-1585. DOI : 10.1109/IJCNN.2017.7966039.
- [163] Valentin BERTHOU. « De l'intention d'innovation à son institutionnalisation : Le cas des Living Labs en Santé & Autonomie ». These. Université de Technologie de Troyes, nov. 2018. URL : <https://theses.hal.science/tel-03605879>.

- [164] Alexis BRENON, François PORTET et Michel VACHER. « Context Feature Learning through Deep Learning for Adaptive Context-Aware Decision Making in the Home ». In : *The 14th International Conference on Intelligent Environments*. Rome, Italy, juin 2018. DOI : 10.1109/IE.2018.00013. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01802747>.
- [165] Munkhjargal GOCHOO, Tan-Hsu TAN, Shing-Hong LIU, Fu-Rong JEAN, Fady S ALNAJJAR et Shih-Chia HUANG. « Unobtrusive activity recognition of elderly people living alone using anonymous binary sensors and DCNN ». In : *IEEE journal of biomedical and health informatics* 23.2 (2018), p. 693-702.
- [166] Muriel MOISY. « Les Français vivent plus longtemps, mais leur espérance de vie en bonne santé reste stable ». In : (2018). Sous la dir. de DREES. URL : https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/er_1046_-_esperance_de_vie.pdf.
- [167] Matthew E. PETERS, Mark NEUMANN, Mohit IYYER, Matt GARDNER, Christopher CLARK, Kenton LEE et Luke ZETTLEMOYER. « Deep Contextualized Word Representations ». In : *Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics : Human Language Technologies, Volume 1 (Long Papers)*. New Orleans, Louisiana : Association for Computational Linguistics, juin 2018, p. 2227-2237. DOI : 10.18653/v1/N18-1202. URL : <https://aclanthology.org/N18-1202>.
- [168] Alec RADFORD, Karthik NARASIMHAN, Tim SALIMANS et Ilya SUTSKEVER. « Improving language understanding with unsupervised learning ». In : (2018). URL : https://cdn.openai.com/research-covers/language-unsupervised/language_understanding_paper.pdf.
- [169] Eri TAKANO, Yoshio MATSUMOTO, Yutaka NAKAMURA, Hiroshi ISHIGURO et Kazuomi SUGAMOTO. « At the Hospital ». In : *Geminoid Studies : Science and Technologies for Humanlike Teleoperated Androids*. Sous la dir. d'Hiroshi ISHIGURO et Fabio DALLA LIBERA. Singapore : Springer Singapore, 2018, p. 413-422. ISBN : 978-981-10-8702-8. DOI : 10.1007/978-981-10-8702-8_26. URL : https://doi.org/10.1007/978-981-10-8702-8_26.
- [170] Gabriele TROVATO, Cesar LUCHO, Alvaro RAMÓN, Renzo RAMIREZ, Laureano RODRIGUEZ et Francisco CUÉLLAR. « The creation of SanTO : a robot with “divine” features ». In : *2018 15th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*. 2018, p. 437-442. DOI : 10.1109/URAI.2018.8442207.
- [171] BBC NEWS. *Apple 'sorry' that workers listened to Siri voice recordings*. Août 2019. URL : <https://www.bbc.com/news/technology-49502292> (visité le 01/06/2022).
- [172] Google DEVELOPERS. *Matter - Project Connected Home over IP*. Déc. 2019. URL : <https://developers.googleblog.com/2019/12/project-connected-home-over-ip.html> (visité le 01/06/2022).
- [173] Jacob DEVLIN, Ming-Wei CHANG, Kenton LEE et Kristina TOUTANOVA. « BERT : Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding ». In : *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics : Human Language Technologies, Volume 1 (Long and Short Papers)*. Minneapolis, Minnesota : Association for Computational Linguistics, juin 2019, p. 4171-4186. DOI : 10.18653/v1/N19-1423. URL : <https://aclanthology.org/N19-1423>.

- [174] Célia GARCIA-MONTERO. *Discret mais géant, le chinois Tuya règne sur 100 millions d'objets connectés*. Juill. 2019. URL : <https://www.journaldunet.com/ebusiness/internet-mobile/1440892-tuya-smart-le-geant-derriere-100-millions-d-objets-connectes/> (visité le 01/06/2022).
- [175] Hassan ISMAIL FAWAZ, Germain FORESTIER, Jonathan WEBER, Lhassane IDOUMGHAR et Pierre-Alain MULLER. « Deep learning for time series classification : a review ». In : *Data Mining and Knowledge Discovery* 33.4 (juill. 2019), p. 917-963.
- [176] ISO CENTRAL SECRETARY. *Dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH)*. en. Standard ISO/IEC 23009-1:2019. Geneva, CH : International Organization for Standardization, 2019, p. 275. URL : <https://www.iso.org/standard/79329.html>.
- [177] Daniele LICIOTTI, Michele BERNARDINI, Luca ROMEO et Emanuele FRONTONI. « A Sequential Deep Learning Application for Recognising Human Activities in Smart Homes ». In : *Neurocomputing* 396 (avr. 2019), p. 501-513. DOI : 10.1016/j.neucom.2018.10.104.
- [178] Jan MAHN et Merlin SCHUMACHER. *Smart-Home-Hack : Tuya veröffentlicht Sicherheits-Update*. Jan. 2019. URL : <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Smart-Home-Hack-Tuya-veroeffentlicht-Sicherheitsupdate-4292028.html> (visité le 01/06/2022).
- [179] Andrijan MÖCKER. *No-Name-Smart-Home Devices : Security flaw allows easy firmware upload*. Jan. 2019. URL : <https://www.heise.de/newsticker/meldung/No-Name-Smart-Home-Security-flaw-allows-easy-firmware-upload-4285085.html> (visité le 01/06/2022).
- [180] Gabriele TROVATO, Tatsuhiro KISHI, Mao KAWAI, Tingting ZHONG, Jia-Yeu LIN, Zixi GU, Chiaki OSHIYAMA et Atsuo TAKANISHI. « The creation of DarumaTO : a social companion robot for Buddhist/Shinto elderlies ». In : *2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* (2019), p. 606-611.
- [181] Solen BERHUET, Lucie BRICE MANSENCAL, Lucie ÉTIENNE, Nelly GUISSÉ et Hoïbian SANDRA. « 10 ans d'observation de l'isolement relationnel : un phénomène en forte progression ». In : *Les solitudes en France* (2020). Sous la dir. de CREDOC, FONDATION DE FRANCE, p. 186. URL : https://www.fondationdefrance.org/sites/default/files/atoms/files/credoc_edition_2020_du_barometre_des_solitudes_vf_004.pdf.
- [182] *Confluens - Smart-home digital network for services*. 2020. URL : <https://redmine.telecom-bretagne.eu/projects/confluens/wiki> (visité le 01/06/2022).
- [183] Amina EL MURABET, Anouar ABTOY, Abdellah TOUHAFI et Abderahim TAHIRI. « Ambient Assisted living system's models and architectures : A survey of the state of the art ». In : *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* 32.1 (2020), p. 1-10. ISSN : 1319-1578. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.04.009>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S131915781730486X>.
- [184] Ari KERÄNEN. *Sensor Measurement Lists (SenML)*. Sous la dir. d'ICANN. IANA Registry. Playa Vista, CA, USA, mars 2020. URL : <https://www.iana.org/assignments/senml/senml.xhtml>.
- [185] Gadelhag MOHMED, Ahmad LOTFI et Amir POURABDOLLAH. « Employing a deep convolutional neural network for human activity recognition based on binary ambient sensor data ». In : *Proceedings of the 13th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*. 2020, p. 1-7.

- [186] Felix SATTLER, Simon WIEDEMANN, Klaus-Robert MÜLLER et Wojciech SAMEK. « Robust and Communication-Efficient Federated Learning From Non-i.i.d. Data ». In : *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* 31.9 (2020), p. 3400-3413. DOI : 10.1109/TNNLS.2019.2944481.
- [187] Shusaku EGAMI, Satoshi NISHIMURA et Ken FUKUDA. « A Framework for Constructing and Augmenting Knowledge Graphs using Virtual Space : Towards Analysis of Daily Activities ». In : *2021 IEEE 33rd International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*. 2021, p. 1226-1230. DOI : 10.1109/ICTAI52525.2021.00194.
- [188] Aiguo WANG, Shenghui ZHAO, Chundi ZHENG, Jing YANG, Guilin CHEN et Chih-Yung CHANG. « Activities of Daily Living Recognition With Binary Environment Sensors Using Deep Learning : A Comparative Study ». In : *IEEE Sensors Journal* 21.4 (2021), p. 5423-5433. DOI : 10.1109/JSEN.2020.3035062.
- [189] Riccardo NACCARELLI, Sara CASACCIA et Gian Marco REVEL. « The Problem of Monitoring Activities of Older People in Multi-Resident Scenarios : An Innovative and Non-Invasive Measurement System Based on Wearables and PIR Sensors ». In : *Sensors* 22.9 (2022). ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s22093472. URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/9/3472>.
- [190] Julio VIZCARRA et Kristiina JOKINEN. « Knowledge-Based Dialogue System for the Ageing Support on Daily Activities ». In : *Human Aspects of IT for the Aged Population. Technology in Everyday Living : 8th International Conference, ITAP 2022, Held as Part of the 24th HCI International Conference, HCII 2022, Virtual Event, June 26 – July 1, 2022, Proceedings, Part II*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2022, p. 122-133. ISBN : 978-3-031-05653-6. DOI : 10.1007/978-3-031-05654-3_8. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-031-05654-3_8.
- [191] Graham WILCOCK et Kristiina JOKINEN. « Conversational AI and Knowledge Graphs for Social Robot Interaction ». In : *Proceedings of the 2022 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*. HRI '22. Sapporo, Hokkaido, Japan : IEEE Press, 2022, p. 1090-1094.
- [192] Gad GAD et Zubair FADLULLAH. « Federated Learning via Augmented Knowledge Distillation for Heterogenous Deep Human Activity Recognition Systems ». In : *Sensors* 23.1 (2023). ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s23010006. URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/1/6>.
- [193] AQUARA. *AIOT Open Cloud Documentation*. URL : <http://docs.opencloud.aqara.com/en/development/cloud-development/> (visité le 01/06/2022).
- [194] The AAL ASSOCIATION. *AAL Programm - Ageing Well in the Digital World*. URL : <https://www.aal-europe.eu/> (visité le 01/07/2022).
- [195] Fabien DUCHÊNE, Sébastien BARRÉ, Christoph PAASCH et Gregory DETAL. *Multipath TCP - Linux Kernel Implementation*. URL : <http://www.multipath-tcp.org/> (visité le 01/07/2022).
- [196] Rasa ENTERPRISE. *RASA - Open source conversational AI*. URL : <https://rasa.com/> (visité le 01/07/2022).
- [197] Don FEDYK et Ronald in't VELT. *Mobile Ad-hoc Networks (manet)*. Charter for Working Group. Fremont, CA, USA : RFC Editor. URL : <https://datatracker.ietf.org/wg/manet/about/>.
- [198] Apache Software FOUNDATION. *Apache Hadoop*. URL : <https://hadoop.apache.org/> (visité le 01/07/2022).

- [199] The FIWARE FOUNDATION. *A curated framework of Open Source Platform components to accelerate the development of Smart Solutions*. URL : <https://www.fiware.org/> (visité le 01/07/2022).
- [200] The Linux FOUNDATION. *Netem - Network Emulation*. URL : <http://www.linuxfoundation.org/collaborate/workgroups/networking/netem> (visité le 01/07/2022).
- [201] The Engineering GROUP. *Digital Enabler - Engineering's Ecosystem Platform*. URL : <https://www.eng.it/en/our-platforms-solutions/digital-enabler> (visité le 01/07/2022).
- [202] Healthcare INFORMATION et Management Systems Society (HIMSS). *Personal Connected Health Alliance (PCHAlliance)*. URL : <https://www.pchalliance.org/> (visité le 01/07/2022).
- [203] *Introduction of Tuya*. URL : <https://docs.tuya.com/en/iot/introduction-of-tuya/introduction-of-tuya> (visité le 01/06/2022).
- [204] Christophe LOHR. *The xAAL Project : Documentation, Specifications and Codes*. URL : <http://recherche.imt-atlantique.fr/xaal/> (visité le 01/07/2022).
- [205] LUMI UNITED TECHNOLOGY COMPANY. *Aquara*. URL : <https://www.aqara.com/en/home.html> (visité le 01/06/2022).
- [206] *MQTT/UDP*. URL : <https://mqtt-udp.readthedocs.io/> (visité le 01/06/2022).
- [207] Ville NUORVALA et Antti J. TUOMINEN. *Mobile IPv6 for Linux*. URL : <https://github.com/direct-code-execution/umip> (visité le 01/07/2022).
- [208] Bram STEENWINCKELA, Mathias DE BROUWERA, Marija STOJCHEVSKAA, Filip DE TURCKA, Sofie VAN HOECKEA et Femke ONGENAE. « TALK : Tracking Activities by Linking Knowledge ». In : *Engineering Applications of Artificial Intelligence* ().
- [209] Traffix SYSTEMS. *OpenBloX Traffix – An Open Source Diameter Stack*. URL : <https://web.archive.org/web/20130511031218/http://www.traffixsystems.com/> (visité le 01/07/2022).
- [210] *The eXtensible Automation Protocol*. URL : <http://www.xapautomation.org/> (visité le 01/06/2022).
- [211] THE OPENHAB FOUNDATION. *The Open Home Automation Bus (OpenHAB)*. URL : <https://www.openhab.org/> (visité le 01/06/2022).
- [212] THE OSGI ALLIANCE. *Open Services Gateway initiative*. URL : <https://www.osgi.org/> (visité le 01/06/2022).
- [213] *The xPL Project*. URL : <http://xplproject.org.uk/> (visité le 01/06/2022).
- [214] *Tuya*. URL : <https://en.tuya.com/> (visité le 01/06/2022).
- [215] *UPnP Device Architecture-Part 1-1 : UPnP Device Architecture Version 1.1, Chapter 2*. Standard. <https://www.iso.org/standard/57494.html>. Geneva, CH : International Organization for Standardization, sept. 2011, p. 101.
- [216] M. LEECH, M. GANIS, Y. LEE, R. KURIS, D. KOBLAS et L. JONES. *SOCKS Protocol Version 5*. RFC 1928 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, mars 1996. DOI : 10.17487/RFC1928. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1928.txt>.

- [217] R. BRADEN (ED.), L. ZHANG, S. BERSON, S. HERZOG et S. JAMIN. *Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1 Functional Specification*. RFC 2205 (Proposed Standard). RFC. Updated by RFCs 2750, 3936, 4495, 5946, 6437, 6780. Fremont, CA, USA : RFC Editor, sept. 1997. DOI : 10.17487/RFC2205. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2205.txt>.
- [218] M. CRAWFORD. *Transmission of IPv6 Packets over Ethernet Networks*. RFC 2464 (Proposed Standard). RFC. Updated by RFCs 6085, 8064. Fremont, CA, USA : RFC Editor, déc. 1998. DOI : 10.17487/RFC2464. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2464.txt>.
- [219] D. DURHAM (ED.), J. BOYLE, R. COHEN, S. HERZOG, R. RAJAN et A. SASTRY. *The COPS (Common Open Policy Service) Protocol*. RFC 2748 (Proposed Standard). RFC. Updated by RFC 4261. Fremont, CA, USA : RFC Editor, jan. 2000. DOI : 10.17487/RFC2748. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2748.txt>.
- [220] S. HERZOG (ED.), J. BOYLE, R. COHEN, D. DURHAM, R. RAJAN et A. SASTRY. *COPS usage for RSVP*. RFC 2749 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, jan. 2000. DOI : 10.17487/RFC2749. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2749.txt>.
- [221] R. YAVATKAR, D. PENDARAKIS et R. GUERIN. *A Framework for Policy-based Admission Control*. RFC 2753 (Informational). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, jan. 2000. DOI : 10.17487/RFC2753. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2753.txt>.
- [222] D. FARINACCI, T. LI, S. HANKS, D. MEYER et P. TRAINA. *Generic Routing Encapsulation (GRE)*. RFC 2784 (Proposed Standard). RFC. Updated by RFC 2890. Fremont, CA, USA : RFC Editor, mars 2000. DOI : 10.17487/RFC2784. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2784.txt>.
- [223] C. RIGNEY, S. WILLENS, A. RUBENS et W. SIMPSON. *Remote Authentication Dial In User Service (RADIUS)*. RFC 2865 (Draft Standard). RFC. Updated by RFCs 2868, 3575, 5080, 6929, 8044. Fremont, CA, USA : RFC Editor, juin 2000. DOI : 10.17487/RFC2865. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2865.txt>.
- [224] B. MOORE, E. ELLESSON, J. STRASSNER et A. WESTERINEN. *Policy Core Information Model – Version 1 Specification*. RFC 3060 (Proposed Standard). RFC. Updated by RFC 3460. Fremont, CA, USA : RFC Editor, fév. 2001. DOI : 10.17487/RFC3060. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3060.txt>.
- [225] A. WESTERINEN, J. SCHNIZLEIN, J. STRASSNER, M. SCHERLING, B. QUINN, S. HERZOG, A. HUYNH, M. CARLSON, J. PERRY et S. WALDBUSSER. *Terminology for Policy-Based Management*. RFC 3198 (Informational). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, nov. 2001. DOI : 10.17487/RFC3198. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3198.txt>.
- [226] B. CARPENTER et S. BRIM. *Middleboxes : Taxonomy and Issues*. RFC 3234 (Informational). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, fév. 2002. DOI : 10.17487/RFC3234. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3234.txt>.
- [227] J. ROSENBERG, H. SCHULZRINNE, G. CAMARILLO, A. JOHNSTON, J. PETERSON, R. SPARKS, M. HANDLEY et E. SCHOOLER. *SIP : Session Initiation Protocol*. RFC 3261 (Proposed Standard). RFC. Updated by RFCs 3265, 3853, 4320, 4916, 5393, 5621, 5626, 5630, 5922, 5954, 6026, 6141, 6665, 6878, 7462, 7463, 8217, 8591, 8760, 8898, 8996. Fremont, CA, USA : RFC Editor, juin 2002. DOI : 10.17487/RFC3261. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3261.txt>.

- [228] D. WILLIS et B. HOENEISEN. *Session Initiation Protocol (SIP) Extension Header Field for Registering Non-Adjacent Contacts*. RFC 3327 (Proposed Standard). RFC. Updated by RFC 5626. Fremont, CA, USA : RFC Editor, déc. 2002. DOI : 10.17487/RFC3327. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3327.txt>.
- [229] C. PERKINS (ED.) *IP Mobility Support for IPv4*. RFC 3344 (Proposed Standard). RFC. Obsoleted by RFC 5944, updated by RFCs 4636, 4721. Fremont, CA, USA : RFC Editor, août 2002. DOI : 10.17487/RFC3344. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3344.txt>.
- [230] D. HARRINGTON, R. PRESUHN et B. WIJNEN. *An Architecture for Describing Simple Network Management Protocol (SNMP) Management Frameworks*. RFC 3411 (Internet Standard). RFC. Updated by RFCs 5343, 5590. Fremont, CA, USA : RFC Editor, déc. 2002. DOI : 10.17487/RFC3411. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3411.txt>.
- [231] B. MOORE (ED.) *Policy Core Information Model (PCIM) Extensions*. RFC 3460 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, jan. 2003. DOI : 10.17487/RFC3460. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3460.txt>.
- [232] H. SCHULZRINNE, S. CASNER, R. FREDERICK et V. JACOBSON. *RTP : A Transport Protocol for Real-Time Applications*. RFC 3550 (Internet Standard). RFC. Updated by RFCs 5506, 5761, 6051, 6222, 7022, 7160, 7164, 8083, 8108, 8860. Fremont, CA, USA : RFC Editor, juill. 2003. DOI : 10.17487/RFC3550. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3550.txt>.
- [233] P. CALHOUN, J. LOUGHNEY, E. GUTTMAN, G. ZORN et J. ARKKO. *Diameter Base Protocol*. RFC 3588 (Proposed Standard). RFC. Obsoleted by RFC 6733, updated by RFCs 5729, 5719, 6408. Fremont, CA, USA : RFC Editor, sept. 2003. DOI : 10.17487/RFC3588. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3588.txt>.
- [234] D. JOHNSON, C. PERKINS et J. ARKKO. *Mobility Support in IPv6*. RFC 3775 (Proposed Standard). RFC. Obsoleted by RFC 6275. Fremont, CA, USA : RFC Editor, juin 2004. DOI : 10.17487/RFC3775. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3775.txt>.
- [235] V. DEVARAPALLI, R. WAKIKAWA, A. PETRESCU et P. THUBERT. *Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol*. RFC 3963 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, jan. 2005. DOI : 10.17487/RFC3963. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3963.txt>.
- [236] R. HANCOCK, G. KARAGIANNIS, J. LOUGHNEY et S. Van den BOSCH. *Next Steps in Signaling (NSIS) : Framework*. RFC 4080 (Informational). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, juin 2005. DOI : 10.17487/RFC4080. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4080.txt>.
- [237] P. LEACH, M. MEALLING et R. SALZ. *A Universally Unique Identifier (UUID) URN Namespace*. RFC 4122 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, juill. 2005. DOI : 10.17487/RFC4122. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4122.txt>.
- [238] H. SCHULZRINNE et J. POLK. *Communications Resource Priority for the Session Initiation Protocol (SIP)*. RFC 4412 (Proposed Standard). RFC. Updated by RFC 7134. Fremont, CA, USA : RFC Editor, fév. 2006. DOI : 10.17487/RFC4412. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4412.txt>.
- [239] F. LE, S. FACCIN, B. PATIL et H. TSCHOFENIG. *Mobile IPv6 and Firewalls : Problem Statement*. RFC 4487 (Informational). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, mai 2006. DOI : 10.17487/RFC4487. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4487.txt>.

- [240] S. GUNDAVELLI (ED.), K. LEUNG, V. DEVARAPALLI, K. CHOWDHURY et B. PATIL. *Proxy Mobile IPv6*. RFC 5213 (Proposed Standard). RFC. Updated by RFCs 6543, 7864. Fremont, CA, USA : RFC Editor, août 2008. DOI : 10.17487/RFC5213. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5213.txt>.
- [241] M. BRENNER. *Diameter Policy Processing Application*. RFC 5224 (Informational). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, mars 2008. DOI : 10.17487/RFC5224. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5224.txt>.
- [242] H. SOLIMAN, C. CASTELLUCCIA, K. ELMALKI et L. BELLIER. *Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6) Mobility Management*. RFC 5380 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, oct. 2008. DOI : 10.17487/RFC5380. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5380.txt>.
- [243] E. NORDMARK et M. BAGNULO. *Shim6 : Level 3 Multihoming Shim Protocol for IPv6*. RFC 5533 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, juin 2009. DOI : 10.17487/RFC5533. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5533.txt>.
- [244] R. KOODLI (ED.) *Mobile IPv6 Fast Handovers*. RFC 5568 (Proposed Standard). RFC. Updated by RFC 7411. Fremont, CA, USA : RFC Editor, juill. 2009. DOI : 10.17487/RFC5568. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5568.txt>.
- [245] R. WAKIKAWA (ED.), V. DEVARAPALLI, G. TSIRTSIS, T. ERNST et K. NAGAMI. *Multiple Care-of Addresses Registration*. RFC 5648 (Proposed Standard). RFC. Updated by RFC 6089. Fremont, CA, USA : RFC Editor, oct. 2009. DOI : 10.17487/RFC5648. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5648.txt>.
- [246] J. SEEDORF et E. BURGER. *Application-Layer Traffic Optimization (ALTO) Problem Statement*. RFC 5693 (Informational). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, oct. 2009. DOI : 10.17487/RFC5693. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5693.txt>.
- [247] J. HAUTAKORPI (ED.), G. CAMARILLO, R. PENFIELD, A. HAWRYLYSHEN et M. BHATIA. *Requirements from Session Initiation Protocol (SIP) Session Border Control (SBC) Deployments*. RFC 5853 (Informational). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, avr. 2010. DOI : 10.17487/RFC5853. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5853.txt>.
- [248] G. TSIRTSIS, H. SOLIMAN, N. MONTAVONT, G. GIARETTA et K. KULADINITHI. *Flow Bindings in Mobile IPv6 and Network Mobility (NEMO) Basic Support*. RFC 6089 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, jan. 2011. DOI : 10.17487/RFC6089. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6089.txt>.
- [249] RJ ATKINSON et SN BHATTI. *Identifier-Locator Network Protocol (ILNP) Architectural Description*. RFC 6740 (Experimental). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, nov. 2012. DOI : 10.17487/RFC6740. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6740.txt>.
- [250] G. BERTRAND (ED.), E. STEPHAN, T. BURBRIDGE, P. EARDLEY, K. MA et G. WATSON. *Use Cases for Content Delivery Network Interconnection*. RFC 6770 (Informational). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, nov. 2012. DOI : 10.17487/RFC6770. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6770.txt>.
- [251] D. FARINACCI, V. FULLER, D. MEYER et D. LEWIS. *The Locator/ID Separation Protocol (LISP)*. RFC 6830 (Experimental). RFC. Updated by RFC 8113. Fremont, CA, USA : RFC Editor, jan. 2013. DOI : 10.17487/RFC6830. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6830.txt>.

- [252] B. CLAISE (ED.), B. TRAMMELL (ED.) et P. AITKEN. *Specification of the IP Flow Information Export (IPFIX) Protocol for the Exchange of Flow Information*. RFC 7011 (Internet Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, sept. 2013. DOI : 10.17487/RFC7011. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7011.txt>.
- [253] C. BORMANN et P. HOFFMAN. *Concise Binary Object Representation (CBOR)*. RFC 7049 (Proposed Standard). RFC. Obsoleted by RFC 8949. Fremont, CA, USA : RFC Editor, oct. 2013. DOI : 10.17487/RFC7049. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7049.txt>.
- [254] Z. SHELBY, K. HARTKE et C. BORMANN. *The Constrained Application Protocol (CoAP)*. RFC 7252 (Proposed Standard). RFC. Updated by RFCs 7959, 8613, 8974, 9175. Fremont, CA, USA : RFC Editor, juin 2014. DOI : 10.17487/RFC7252. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7252.txt>.
- [255] R. MOSKOWITZ (ED.), T. HEER, P. JOKELA et T. HENDERSON. *Host Identity Protocol Version 2 (HIPv2)*. RFC 7401 (Proposed Standard). RFC. Updated by RFC 8002. Fremont, CA, USA : RFC Editor, avr. 2015. DOI : 10.17487/RFC7401. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7401.txt>.
- [256] Y. NIR et A. LANGLEY. *ChaCha20 and Poly1305 for IETF Protocols*. RFC 7539 (Informational). RFC. Obsoleted by RFC 8439. Fremont, CA, USA : RFC Editor, mai 2015. DOI : 10.17487/RFC7539. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7539.txt>.
- [257] B. TRAMMELL (ED.) et M. KUEHLEWIND (ED.) *Report from the IAB Workshop on Stack Evolution in a Middlebox Internet (SEMI)*. RFC 7663 (Informational). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, oct. 2015. DOI : 10.17487/RFC7663. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7663.txt>.
- [258] M. STENBERG, S. BARTH et P. PFISTER. *Home Networking Control Protocol*. RFC 7788 (Proposed Standard). RFC. Updated by RFC 8375. Fremont, CA, USA : RFC Editor, avr. 2016. DOI : 10.17487/RFC7788. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7788.txt>.
- [259] A. LANGLEY, W. CHANG, N. MAVROGIANNOPOULOS, J. STROMBERGSON et S. JOSEFSSON. *ChaCha20-Poly1305 Cipher Suites for Transport Layer Security (TLS)*. RFC 7905 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, juin 2016. DOI : 10.17487/RFC7905. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7905.txt>.
- [260] M. STIEMERLING, S. KIESEL, M. SCHARF, H. SEIDEL et S. PREVIDI. *Application-Layer Traffic Optimization (ALTO) Deployment Considerations*. RFC 7971 (Informational). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, oct. 2016. DOI : 10.17487/RFC7971. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7971.txt>.
- [261] J. LAGANIER et L. EGGERT. *Host Identity Protocol (HIP) Rendezvous Extension*. RFC 8004 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, oct. 2016. DOI : 10.17487/RFC8004. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8004.txt>.
- [262] J. LAGANIER. *Host Identity Protocol (HIP) Domain Name System (DNS) Extension*. RFC 8005 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, oct. 2016. DOI : 10.17487/RFC8005. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8005.txt>.
- [263] H. BIRKHOLZ, C. VIGANO et C. BORMANN. *Concise Data Definition Language (CDDL) : A Notational Convention to Express Concise Binary Object Representation (CBOR) and JSON Data Structures*. RFC 8610 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, juin 2019. DOI : 10.17487/RFC8610. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8610.txt>.

- [264] A. FORD, C. RAICIU, M. HANDLEY, O. BONAVENTURE et C. PAASCH. *TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses*. RFC 8684 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, mars 2020. DOI : [10.17487/RFC8684](https://doi.org/10.17487/RFC8684). URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8684.txt>.
- [265] A. BEGEN, P. KYZIVAT, C. PERKINS et M. HANDLEY. *SDP : Session Description Protocol*. RFC 8866 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, jan. 2021. DOI : [10.17487/RFC8866](https://doi.org/10.17487/RFC8866). URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8866.txt>.
- [266] J. IYENGAR (ED.) et M. THOMSON (ED.) *QUIC : A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport*. RFC 9000 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, mai 2021. DOI : [10.17487/RFC9000](https://doi.org/10.17487/RFC9000). URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9000.txt>.
- [267] C. PERKINS, M. MCBRIDE, D. STANLEY, W. KUMARI et JC. ZÚÑIGA. *Multicast Considerations over IEEE 802 Wireless Media*. RFC 9119 (Informational). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, oct. 2021. DOI : [10.17487/RFC9119](https://doi.org/10.17487/RFC9119). URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9119.txt>.
- [268] R. STEWART, M. TÜXEN et K. NIELSEN. *Stream Control Transmission Protocol*. RFC 9260 (Proposed Standard). RFC. Fremont, CA, USA : RFC Editor, juin 2022. DOI : [10.17487/RFC9260](https://doi.org/10.17487/RFC9260). URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9260.txt>.