



HAL
open science

Conception d'environnement instrumenté pour la veille à la personne

Aurélien Massein

► **To cite this version:**

Aurélien Massein. Conception d'environnement instrumenté pour la veille à la personne. Vision par ordinateur et reconnaissance de formes [cs.CV]. COMUE Université Côte d'Azur (2015 - 2019), 2018. Français. NNT : 2018AZUR4096 . tel-02102799

HAL Id: tel-02102799

<https://theses.hal.science/tel-02102799>

Submitted on 17 Apr 2019

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.

THÈSE DE DOCTORAT

Conception d'environnement instrumenté pour la veille à la personne

Présentée et soutenue par

Aurélien Massein

Dirigée par Yves PAPEGAY

Co-encadrée par David DANÉY

Préparée au laboratoire Inria Bordeaux - Sud-Ouest

Présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en Informatique
d'Université Côte d'Azur

Soutenue le 22 novembre 2018, devant le jury composé de :

<i>Président :</i>	Ye-Qiong SONG	Professeur des Universités	Université de Lorraine
<i>Rapporteurs :</i>	Norbert NOURY	Professeur des Universités	Université Lyon 1
	François CHARPILLET	Directeur de Recherches	Inria Nancy
<i>Examineurs :</i>	David DANÉY	Chargé de Recherches (HDR)	Inria Bordeaux
	Yves PAPEGAY	Chargé de Recherches (HDR)	Inria Sophia Antipolis

Titre : Conception d'environnement instrumenté pour la veille à la personne

L'instrumentation permet à notre environnement, maison ou bâtiment, de devenir intelligent en s'adaptant à nos modes de vie et en nous assistant au quotidien. Un environnement intelligent est sensible et réactif à nos activités, afin d'améliorer notre qualité de vie. La fiabilité d'identification des activités est ainsi essentielle pour cette intelligence ambiante : elle est directement dépendante du positionnement des capteurs au sein de l'environnement. Cette question essentielle du placement des capteurs est très peu considérée par les systèmes ambiants commercialisés ou même dans la littérature. Pourtant, elle est la source principale de leurs dysfonctionnements où une mauvaise reconnaissance des activités entraîne une mauvaise assistance fournie. Le placement de capteurs consiste à choisir et à positionner des capteurs pertinents pour une identification fiable des activités. Dans cette thèse, nous développons et détaillons une méthodologie de placement de capteurs axée sur l'identifiabilité des activités d'intérêt. Nous la qualifions en nous intéressant à deux évaluations différentes : la couverture des intérêts et l'incertitude de mesures.

Dans un premier temps, nous proposons un modèle de l'activité où nous la décomposons en actions caractérisées afin d'être indépendant de toute technologie ambiante (axée connaissances ou données). Nous représentons actions et capteurs par un modèle ensembliste unifiant, permettant de fusionner des informations homogènes de capteurs hétérogènes. Nous en évaluons l'identifiabilité des actions d'intérêt au regard des capteurs placés, par des notions de précision (performance d'identification) et de sensibilité (couverture des actions). Notre algorithme de placement des capteurs utilise la Pareto-optimalité pour proposer une large palette de placements-solutions pertinents et variés, pour ces multiples identifiabilités à maximiser. Nous illustrons notre méthodologie et notre évaluation en utilisant des capteurs de présence, et en choisissant optimalement la caractéristique à couvrir pour chaque action.

Dans un deuxième temps, nous nous intéressons à la planification optimale des expériences où l'analyse de la matrice d'information permet de quantifier l'influence des sources d'incertitudes sur l'identification d'une caractéristique d'action. Nous représentons les capteurs continus et l'action caractérisée par un modèle analytique, et montrons que certaines incertitudes doivent être prises en compte et intégrées dans une nouvelle matrice d'information. Nous y appliquons directement les indices d'observabilité pour évaluer l'identifiabilité d'une action caractérisée (incertitude d'identification). Nous illustrons cette évaluation alternative en utilisant des capteurs d'angle, et nous la comparons à la matrice d'information classique. Nous discutons des deux évaluations abordées et de leur complémentarité pour la conception d'environnement instrumenté pour la veille à la personne.

Mots clés : placement de capteurs, modèle des activités, modèle des capteurs, identifiabilité, fiabilité, Pareto-optimalité, analyse de l'incertitude, planification optimale des expériences, système d'assistance à l'autonomie à domicile

Title : Design of instrumented environment for human monitoring

Instrumentation enables our environment, house or building, to get smart through self-adjustment to our lifestyles and through assistance of our daily-life. A smart environment is sensitive and responsive to our activities, in order to improve our quality of life. Reliability of activities' identification is absolutely necessary to such ambient intelligence : it depends directly on sensors' positioning within the environment. This fundamental issue of sensor placement is hardly considered by marketed ambient systems or even into the literature. Yet, it is the main source of ambient systems' malfunctions and failures, because a bad activity recognition leads to a bad delivered assistance. Sensor placement is about choosing and positioning relevant sensors for a reliable identification of activities. In this thesis, we develop and detail a sensor placement methodology driven by identifiability of activities of interest. We quantify it by looking at two different evaluations: coverage of interests and uncertainty of measures.

First, we present an activity model that decomposes each activity into characterised actions to be technology-free (either knowledge or data driven one). We depict actions and sensors by a set theoretic model, enabling to fuse homogeneous informations of heterogeneous sensors. We then evaluate each action of interest's identifiability regarding placed sensors, through notions of precision (identification's performance) and sensitivity (action's coverage). Our sensor placement algorithm use Pareto-optimality to offer a wide range of relevant solution-placements, for these multiple identifiabilities to maximise. We showcase our methodology and our evaluation through solving a problem featuring motion and binary sensors, by optimally choosing for each action the characteristic to cover.

Finally, we look into optimal design of experiments by analysing the information matrix to quantify how sources of uncertainties influence the identification of an action's characteristic. We depict continuous sensors and the characterised action by an analytical model, and we show that some uncertainties should be considered and included in a new information matrix. We then apply directly observability indexes to evaluate identifiability of a characterised action (uncertainty of identification), and compare our new information matrix to the classical one. We showcase our alternate evaluation through solving a sensor placement problem featuring angular sensors. We discuss both covered evaluations and their complementarity towards the design of instrumented environment for human monitoring.

Keywords: sensor placement, activity model, sensor model, identifiability, reliability, Pareto-optimality, uncertainty analysis, optimal design of experiments, ambient assisted living system

Remerciements

Ce manuscrit est le résultat d'un travail personnel accompli grâce aux soutiens, corrections et apports des nombreuses personnes côtoyées durant ces quatre années. Une thèse ne pourrait être menée seule, et, bien que je ne pense pas, à ce jour, avoir le recul nécessaire sur les contributions de chacun, je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes m'ayant tant apporté afin que je puisse mener cette thèse à son terme.

Je tiens à remercier mes directeurs de thèse, David Daney et Yves Papegay, pour leur présence et leur rigueur scientifique ainsi que leur soutien et leurs conseils durant ma thèse. Je suis ravi d'avoir travaillé en leur compagnie car ils m'ont beaucoup appris. Je souhaite remercier les rapporteurs Norbert Noury et François Charpillet pour leur temps accordé à la rédaction d'un rapport détaillé et pertinent sur mon travail. Je remercie également Ye-Qiong Song d'avoir accepté de faire parti de mon jury afin d'examiner mes travaux.

Je me dois de remercier grandement l'école doctorale STIC de Nice de m'avoir permis de réaliser une thèse et d'avoir pu effectuer mes recherches sur le sujet depuis le laboratoire d'Inria Bordeaux. Je remercie plus généralement les membres de ce laboratoire avec lesquels j'ai vécu pendant trois ans, et plus particulièrement Maïlys et Charles pour leur collaboration précieuse m'ayant permis de faire avancer ma réflexion. Je remercie également les doctorants de l'ENSC de Bordeaux qui m'ont accueilli chaleureusement pour la fin de ma thèse. Je souhaite finalement remercier le laboratoire iCeIRA de Taipei et le professeur Ren C. Luo, pour l'expérience enrichissante tant scientifique et personnelle que j'ai vécue durant ces 3 mois de stage à Taïwan.

La dernière partie de mes remerciements s'adresse à mes proches, qui m'ont permis d'oublier mon sujet de thèse et mes soucis de laboratoire, en m'offrant un regard extérieur. Je pense d'abord à ma mère qui m'a soutenu et aidé depuis toujours, et plus généralement à ma famille, Fabienne, Jean, Jeanine et Jeanne. Je remercie chaleureusement mes amis bordelais, principalement Ibtissem et David, pour leur soutien et présence au quotidien avec qui j'ai partagé mes moments de doute et qui ont été d'une grande aide pour traverser ces périodes difficiles. À Leila, à Léo.

Table des matières

Remerciements	iii
Table des matières	v
Notations	xiii
1 Introduction	1
1.1 L’habitat intelligent	2
1.1.1 Assistance à l’autonomie à domicile	2
1.1.2 Acceptation des technologies d’assistance	3
1.1.3 Préalable des technologies d’assistance	4
1.2 État de l’art	4
1.2.1 Activités du quotidien	5
1.2.2 Reconnaissance d’activités	6
1.2.2.1 Différentes approches	6
1.2.2.2 Des réseaux de capteurs déjà installés	6
1.2.3 Réseau de capteurs	7
1.2.3.1 Divers réseaux de capteurs	7
1.2.3.2 Différentes évaluations des réseaux de capteurs	8
1.2.3.3 Problème de la galerie d’art	9
1.2.3.4 Placement de capteurs en intérieur pour l’assistance à domicile	9
1.3 Problématique	10
1.3.1 Placement de capteurs : au cœur de la veille automatisée	11
1.3.2 Information de position : une mauvaise information sensorielle essentielle	11
1.3.2.1 Présence : une localisation imprécise	11
1.3.2.2 Position : un indicateur peu précis mais très sensible	12
1.4 Conception d’environnement instrumenté pour la veille à la personne	12
1.4.1 Motivations et objectifs	12

1.4.2	Hypothèses	13
1.4.3	Contributions	13
1.4.4	Organisation	14
2	Modèle des activités pour une veille automatisée	17
2.1	L'activité	18
2.1.1	L'Ergothérapie : l'étude des activités pour le bien des personnes	18
2.1.2	Définition de l'activité	19
2.1.2.1	Activité et occupation : une confusion de sens	19
2.1.2.2	Décomposition de l'activité en actions	20
2.1.2.3	Pertinence vis-à-vis de l'activité de l'action	20
2.2	L'action	21
2.2.1	Outils d'Ergothérapie: l'évaluation valide et robuste des actions pour des informations fiables	21
2.2.1.1	Cadre conceptuel de pratique en Ergothérapie : l'OTPF	21
2.2.1.2	Évaluation des habilités motrices et opératoires : l'AMPS	22
2.2.1.3	Des actions jusqu'alors mesurées par l'humain	23
2.2.2	Caractéristiques des actions	24
2.2.2.1	Interaction	25
2.2.2.2	Lieu	25
2.2.2.3	Temporalité	26
2.3	Application du modèle d'activité aux systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile	27
2.3.1	Processus de veille	29
2.3.1.1	Des simplifications à chaque étape : une frontière entre la réalité comportementale et sensorielle	29
2.3.1.2	Discussion	30
2.3.2	Adaptation du modèle à la conception : caractéristiques écartées	30
2.3.2.1	Variabilité inter-individuelle	31
2.3.2.2	Temporalité : inutile pour un réseau statique	31
2.3.3	Conception de l'instrumentation : exemple et discussion	31
2.3.3.1	Le réseau de capteur : l'instrument pour mesurer l'action	34
2.3.3.2	Une instrumentation ardue voire impossible	35
2.3.3.3	Fiabilité de l'instrumentation : Précision et Sensibilité des mesures	36
2.3.3.4	Conception de l'instrumentation : choix des informations et placement des capteurs	36

3	Modèle des régions pour une représentation générique	39
3.1	La région : modélisation des actions et des capteurs	40
3.1.1	Définition de la région	41
3.1.1.1	Adaptation de la région aux caractéristiques des actions	41
3.1.1.2	Représentation, mesure des régions et dimension de travail	41
3.1.2	Régions d'intérêt et de couverture : des régions incluses dans la région de travail	42
3.1.2.1	Région d'intérêt	42
3.1.2.2	Région de couverture	42
3.1.2.3	Région de travail	43
3.1.3	Combinaison des régions : fusion d'informations pour améliorer la couverture des intérêts	43
3.1.3.1	Principe du partitionnement	43
3.1.3.2	Région générale et sous-région de couverture : des régions pour partitionner et sélectionner	44
3.1.3.3	Expression logique associée aux régions de couverture et d'intérêt	45
3.2	Représentation des capteurs discrétisés	46
3.2.1	Régions de mesure : des régions incluses dans la région de couverture	46
3.2.1.1	Modèle unique des capteurs binaires et discrétisés	46
3.2.1.2	Région de mesure	47
3.2.1.3	Des régions (non-)disjointes incluses dans la région de couverture	48
3.2.2	Exemple de représentations	48
3.2.2.1	Capteur d'angle ou de distance	48
3.2.2.2	Capteur angle et distance	48
3.2.2.3	Capteur caméra	48
3.2.3	Combinaison de capteurs hétérogènes	50
3.2.3.1	Partitionnement des régions de mesure	50
3.2.3.2	Expression logique associée aux régions de mesure et d'intérêt	51
3.3	Représentation des intérêts prioritaires et des capteurs incertains	52
3.3.1	Généralisation des régions et partitionnement selon les actions	52
3.3.1.1	Généralisation de la région aux éléments multiples	52
3.3.1.2	Région d'action : la région de travail partitionnée selon les actions	53
3.3.2	Occurrence et Détectabilité des régions	54
3.3.2.1	Occurrence des régions de travail et d'intérêt	54
3.3.2.2	Détectabilité des régions de couverture	56
3.3.2.3	Combinaison des Détectabilités	57

3.4 Aspects techniques du modèle	57
3.4.1 Dimension de travail	58
3.4.2 Caractéristiques de l'action	58
3.4.3 Volumétrie de la personne	58
3.4.3.1 Somme de Minkowski	59
3.4.3.2 Application à la conception	59
4 Évaluation de la fiabilité du réseau de capteurs	61
4.1 La matrice de confusion pour l'évaluation de la fiabilité	61
4.1.1 Définition de la matrice de confusion	62
4.1.1.1 Informations de confusion : les erreurs et succès de la couverture	63
4.1.1.2 Régions d'information de confusion	63
4.1.2 Définition d'un placement de qualité	64
4.1.2.1 Indices de qualité	64
4.1.2.2 Fiabilité du placement de capteurs : la F-mesure	65
4.1.3 Combinaison des régions de couvertures : fusion d'informations pour une meilleure fiabilité	66
4.1.3.1 Définition augmentée des régions d'information de confusion . .	67
4.1.3.2 Amélioration de la fiabilité : choix des sous-régions pertinentes .	67
4.2 Évaluation des intérêts prioritaires et des capteurs incertains vis-à-vis de l'action	69
4.2.1 Efficacité des régions de couverture	69
4.2.2 Redéfinition des informations de confusion	71
Préambule	71
4.2.2.1 Région vrai positive	72
4.2.2.2 Région faux positive	72
4.2.2.3 Région faux négative	73
4.2.2.4 Région vrai négative	74
4.2.2.5 Formulation générale	74
4.3 Aspects techniques de l'évaluation	76
4.3.1 Incertitudes de placements et d'estimations	76
4.3.1.1 Disposition incertaine du mobilier	76
4.3.1.2 Installation imparfaite des capteurs	76
4.3.1.3 Incertitudes d'estimation	76
4.3.2 Intégration des incertitudes avec l'analyse par intervalles	77
5 Placement de capteurs	79

5.1	Algorithme de conception	79
5.1.1	Optimisation multi-objectifs par Pareto	80
5.1.1.1	Définition : Pareto-dominance et Pareto-optimalité	80
5.1.1.2	Problème d'optimisation général	81
5.1.1.3	Algorithme d'optimisation retenu : NSGA-II	81
5.1.2	Exemple simple au séjour	81
5.1.2.1	Définition du problème	81
5.1.2.2	Optimisation	82
5.2	Implémentation du modèle des régions	83
5.2.1	Géométrie Algorithmique	84
5.2.2	Traitement d'Images	84
5.3	Étude de cas en cuisine	85
5.3.1	Description du problème	85
5.3.1.1	Actions d'intérêt	85
5.3.1.2	Caractéristiques techniques	86
5.3.1.3	Problème d'optimisation	88
5.3.2	Implémentation	89
5.3.2.1	Discrétisation	89
5.3.2.2	Capteurs	90
5.3.2.3	Algorithme	90
5.3.3	Résultats et analyse	90
5.3.3.1	Choix d'un placement de capteurs approprié	90
5.3.3.2	Analyse	91
5.4	Aspects techniques du placement	92
5.4.1	Problème du placement de capteurs	93
5.4.1.1	Caractéristiques de l'action	93
5.4.1.2	Algorithme de conception	93
5.4.1.3	Objectifs d'évaluation supplémentaires	94
5.4.1.4	Coût d'achat, d'installation, de fonctionnement, voire de maintenance	95
5.4.2	Occlusions des régions de couverture	95
5.4.2.1	Occlusion des éléments immobiles	95
5.4.2.2	Occlusion des éléments amovibles	96
5.4.3	Incertitudes du mobilier amovible	98
5.4.3.1	Quadrillage ou repositionnement des capteurs	98
5.4.3.2	Actualisation humaine ou automatique	98

6	Modèle analytique pour une planification optimale	101
6.1	Planification optimale des expériences : brève introduction en contexte	102
6.1.1	Modèle analytique	102
6.1.2	Planification des observations	103
6.1.3	Matrice d'information	104
6.1.4	Indices d'Observabilité : des critères d'Optimalité du réseau de capteurs .	105
6.2	Analyse de l'incertitude	106
6.2.1	Dynamique de l'incertitude	106
6.2.2	Matrice d'incertitude	107
6.2.3	Application à des capteurs usuels	108
6.2.3.1	Capteur d'angle	108
6.2.3.2	Capteur de distance	111
6.3	Études de cas au salon	113
6.3.1	Énoncé des problèmes	113
6.3.1.1	Cas simple : estimation d'une unique position	113
6.3.1.2	Cas réel : estimation d'un ensemble de positions	115
6.3.1.3	Optimisation multi-objectifs	115
6.3.1.4	Aspects techniques et illustratifs	115
6.3.2	Cas simple	116
6.3.2.1	Pour $K = 2$ capteurs	116
6.3.2.2	Pour $K = 2$ capteurs au placement incertain	117
	Discussion pour $K = 2$ capteurs	119
6.3.2.3	Pour $K = 3$ capteurs	121
6.3.2.4	Pour $K = 3$ capteurs au placement incertain	124
6.3.2.5	Discussion pour $K = 3$ capteurs	128
6.3.3	Cas réel	129
6.4	Application à la conception d'environnement instrumenté	133
6.4.1	Capteurs binaires	133
6.4.2	Optimisation multi-objectifs	134
6.4.3	Analyse par intervalles	135
	Conclusion	137
	Concevoir un environnement instrumenté humain	138
	Une modélisation poussée	138
	Une conception indépendante	139
	Une capitalisation des installations	139

Annexe	141
A Cadre conceptuel de pratique en Ergothérapie OTPF	143
A.1 Occupations de l'OTPF	143
A.2 Exigences des activités	147
A.3 Habilité de réalisation	148
B Planification optimale des expériences pour l'identification des paramètres	151
B.1 Identification de Paramètres	151
B.1.1 Modèle analytique pour l'identification des paramètres	151
B.1.2 Régression des moindres carrés	152
B.2 Planification optimale d'expériences	152
B.2.1 Choix optimal des commandes pour une collecte de mesures riche en informations	153
B.2.2 Matrice d'information et matrice de dispersion	153
B.3 Critères d'Optimalité et Indices d'Observabilité	154
C Matrice d'incertitude	157
C.1 Capteur d'angle	157
C.1.1 Incertitude des commandes négligeables	157
C.1.2 Modèle parfait	158
C.2 Capteur de distance	160
C.2.1 Incertitude des commandes négligeables	160
C.2.2 Modèle parfait	161
Bibliographie	163
Acronymes français	175
Acronymes anglais	177
Liste des termes anglais	179
Glossaire des régions	181

Notations

Ensemble

\cup	union
\sqcup	union disjointe
\cap	intersection
\subset	inclusion
$\{ \}$	ensemble d'éléments
$\text{Card}()$	nombre d'éléments d'un ensemble
$\text{Dim}()$	dimension d'un ensemble

Région

\mathcal{T}	région de travail
\mathcal{I}	région d'intérêt
\mathcal{C}	région de couverture
c	sous-région de couverture
\mathcal{M}	région de mesure
m	sous-région de mesure
\mathcal{IC}	région d'information de confusion
\mathcal{U}	région de conception, <i>i.e.</i> ensemble des configurations capteurs autorisées

Logique booléenne

\mathcal{C}	variable booléenne associée à la région de couverture \mathcal{C} du capteur, vraie si le capteur acquiert une mesure
c	expression logique de capteurs associée à la sous-région de couverture c
\mathcal{I}	expression logique de capteurs couvrant la région d'intérêt \mathcal{I}
\mathbf{a}	expression logique de capteurs exprimant la vraisemblable réalisation de l'action a
\cong	opérateur de définition
$+$	opérateur logique OU
\cdot	opérateur logique ET
$-$	opérateur logique NON

Régression

u	commandes éventuellement à mesurer, <i>i.e.</i> les configurations des capteurs
x	paramètres à estimer, <i>i.e.</i> la caractéristique d'action
y	sorties à mesurer, <i>i.e.</i> les mesures des capteurs
$f(u, x, y)$	modèle analytique représentant le phénomène physique
$g(u, x)$	modèle analytique où y est décorrélé des autres variables u et x
δx	incertitude des paramètres
L	nombre de paramètres
K	nombre de commandes, <i>i.e.</i> de capteurs
N	nombre d'observations
ξ_N	conception d'expérience
ζ_K	conception d'expérience simple, sans réplication des mesures
r_k	nombre de reproduction des mesures
σ_{x_l}	variance associé au paramètre x_l
ϵ	erreur d'observation
\mathbf{M}	matrice d'information de Fisher
\mathbf{D}	matrice de dispersion
\mathbf{U}	matrice d'incertitude calculée à gauche
\mathbf{U}^-	matrice d'incertitude calculée à droite
\mathbf{A}	matrice de régression
\mathbf{J}_x	matrice Jacobienne des paramètres calculée pour $f(u, x, y) = 0$
\mathbf{G}_x	matrice Jacobienne des paramètres calculée pour $g(u, x) = y$
Σ	matrice de variance de l'erreur d'observation ϵ

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1 L’habitat intelligent	1
1.1.1 Assistance à l’autonomie à domicile	2
1.1.2 Acceptation des technologies d’assistance	3
1.1.3 Préalable des technologies d’assistance	3
1.2 État de l’art	4
1.2.1 Activités du quotidien	4
1.2.2 Reconnaissance d’activités	5
1.2.3 Réseau de capteurs	6
1.3 Problématique	10
1.3.1 Placement de capteurs : au cœur de la veille automatisée	10
1.3.2 Information de position : une mauvaise information sensorielle essentielle	11
1.4 Conception d’environnement instrumenté pour la veille à la personne	12
1.4.1 Motivations et objectifs	12
1.4.2 Hypothèses	12
1.4.3 Contributions	13
1.4.4 Organisation	13

En 2080, selon les projections d’Eurostat [Eur15], un quart de la population européenne serait âgée de 65 ans ou plus : il y aurait ainsi plus d’une personne âgée de +65 ans pour deux personnes actives de 20-64 ans. La population européenne augmenterait en âge avancé et subirait une diminution similaire de sa population active : +55,2 millions¹ de +65 ans, pour -41,5 millions¹ de 20-64 ans.

D’ici vingt ans (2040) en France, selon les projections de l’Insee [Bla⁺16], le quart de la population française serait âgée de 65 ans ou plus. Dans un demi-siècle (2070), la population des personnes âgées de +75 ans doublerait, et celle des personnes très-âgées de +85 ans quadruplerait. Or la population française à cet horizon 2070 serait légèrement plus élevée que l’actuelle, subissant une augmentation quasi-similaire de sa population âgée et souffrant d’une population active stagnante : +10,7 millions² de personnes, pour +10,4 millions² de +65 ans et -138 mille² de 20-64 ans. À ce terme, la population active constituerait la moitié de la population française pour le tiers de personnes âgées de +75 ans.

Afin de permettre d’accompagner au mieux l’avancée en âge de la population, le Parlement français a promulgué le 28 décembre 2015, la Loi n°2015-1776 relative à l’adaptation de la société

¹ par rapport à 2014, scénario central (Eurostat) [Eur15] ² par rapport à 2013, scénario central (Insee) [Bla⁺16]

au vieillissement [Min], entrée en vigueur au 1er janvier 2016. Cette loi acte la volonté sociétale d’anticiper, de prévenir, de repérer, de solutionner et d’accompagner la perte d’autonomie des personnes en leur permettant d’être actrice de leur parcours et de disposer d’une réponse adaptée à la richesse et la pluralité de leur parcours de vie [Min16]. Elle repose sur trois piliers essentiels : 1) Anticipation de la perte d’autonomie ; 2) Adaptation de la société ; 3) Accompagnement des personnes en perte d’autonomie.

Aujourd’hui, le domicile est perçu comme un atout majeur dans la prévention et l’accompagnement de la perte d’autonomie devant être modernisé afin de s’adapter aux enjeux du vieillissement.

1.1 L’habitat intelligent

L’essor technologique et le bouleversement de nos modes de vie ont conduit à l’émergence du concept d’**habitat intelligent**³. Ces habitats sont conçus technologiquement de telle sorte à s’adapter et à accompagner nos modes de vie [Sad11][Jeu12]. Ils sont équipés de capteurs, de moniteurs biomédicaux voire d’actionneurs [Cha⁺09]. Intégrés à l’habitat, ces dispositifs électroniques constituent un réseau relié à un système centralisé de collecte et de traitement des données [Cha⁺09]. Ils permettent de mesurer, d’analyser, voire d’agir sur l’environnement pour le bien de l’occupant [Din⁺11]. L’habitat devient ainsi un environnement instrumenté où des technologies d’assistance sont déployées. Il s’agit d’envisager un environnement discret, interconnecté, adaptable, dynamique, intégré et intelligent [Sad11] afin de fournir une assistance sans limiter ni perturber les activités quotidiennes de l’occupant [Cha⁺08]. Ce récent paradigme est intitulé *intelligence ambiante*⁴.

Diverses technologies d’assistance fondées sur ce concept existent afin de fournir des services proactifs visant à améliorer l’expérience de l’occupant [Din⁺11]. La plupart des technologies d’assistance ont trait à la domotique afin de rendre l’habitat confortable, communicant, évolutif, autonome, sûr et économe [Jeu12]. Pour la santé, les technologies d’assistance permettent de soutenir l’autonomie des personnes et sont utilisées afin de prévenir, de soigner, d’améliorer le bien-être et l’état de santé des personnes âgées [Ras⁺13]. Ces technologies sont appelées systèmes d’assistance à l’autonomie à domicile⁵ (SAAD).

1.1.1 Assistance à l’autonomie à domicile

Dans le cadre de la santé, l’intérêt d’un environnement instrumenté est sa capacité à veiller aux activités quotidiennes de la personne et à sa sécurité [Din⁺11]. En étant capable d’identifier des activités essentielles à la personne, ces environnements permettent d’extraire des motifs reflétant son état de santé physique et cognitif, afin de reconnaître quand son comportement s’écarte de normes individualisées voire un comportement atypique indiquant des problèmes ou nécessitant une intervention [Sku⁺09]. L’intérêt de ces environnements est double [Gen09] :

1. Soutenir les personnes fragiles dans leur vie quotidienne (à domicile) ;
2. Réduire les efforts sur les familles ou le personnel soignant.

L’environnement instrumenté se révèle être un moyen prometteur et rentable pour améliorer les soins à domicile des personnes âgées et handicapées de manière non-intrusive, permettant une plus grande indépendance, maintenant en bonne santé et prévenant l’isolement social [Cha⁺09].

3 *angl.* smart home 4 *angl.* ambient intelligence 5 *angl.* ambient assisted living system (AALS)

Dans la littérature, des études se sont penchées sur les divers environnements instrumentés opérationnels et les technologies de capteurs utilisées pour la santé [Cha⁺08][Cha⁺09][Din⁺11][Gok⁺13]. De nos jours, les avancées en technologie d’acquisition (capteurs) et en puissance de calcul (processeurs) permettent l’instrumentation d’environnements par des capteurs à taille réduite, à moindre coût et à faible consommation énergétique [De⁺12]. Les capteurs fréquemment utilisés dans les environnements instrumentés pour la veille à la personne sont notamment des : capteurs binaires (contacteurs, capteurs de mouvement...), caméras, puces RFID⁶, microphones, capteurs de température, capteurs d’humidité, capteurs de luminosité, capteurs de pression [Din⁺11]. Cependant, certains capteurs se révèlent très intrusifs à cause de la richesse des informations pouvant être observées ; *i.e.* une caméra [Cai⁺05][Dem⁺06]. Ces dispositifs se doivent d’être discrets et acceptés par la personne [Cha⁺09].

L’intégration avec succès des technologies d’acquisition –*i.e.* des capteurs– au quotidien, dépend grandement de l’**acceptation** par la personne de la technologie et de la façon dont elle affecte sa vie quotidienne [Din⁺11].

1.1.2 Acceptation des technologies d’assistance

L’**acceptation**⁷ désigne l’action d’accepter la technologie dans son environnement de vie au quotidien. Elle est un compromis réalisé par la personne entre les bénéfices (*e.g.* autonomie, indépendance) et barrières (*e.g.* confidentialité, sûreté) perçues [Hee⁺17]. Cette notion est liée à de nombreuses mesures de qualité, pouvant être regroupées en deux catégories principales : l’**Acceptabilité**⁸ (utilisabilité, abordabilité) et la **Confiance**⁹ (sûreté, sécurité, fiabilité, confidentialité, intimité) [Por⁺13].

Actuellement, il n’existe pas de définition standardisée sur l’*acceptabilité* des personnes dans le domaine de l’assistance à l’autonomie à domicile [Aug09]. Les personnes peuvent rejeter une nouvelle technologie car elle est trop complexe, trop intrusive, pas naturelle, ne correspondant pas à leur éducation ou à leur religion, ou ne répondant pas à leurs besoins [Por⁺13]. En réalité, l’acceptabilité est un facteur clé afin d’intégrer de nouvelles technologies au domicile, notamment pour les personnes âgées et les personnes mal sensibilisées aux technologies de l’information et de la communication (TIC) [Por⁺13]. Au cours d’une étude sur l’acceptation des systèmes d’assistance à l’autonomie à domicile, les personnes participantes manifestèrent une volonté forte de participer au développement et au processus d’évaluation ainsi qu’un désir d’être consultées et impliquées plus régulièrement [Hee⁺17]. Par ailleurs, l’intimité et la confidentialité (liées à la *confiance*) des personnes est la principale critique à l’égard de ces systèmes [Cai⁺05][Cha⁺09][Dem09][Din⁺11]. Les professionnels s’accordent sur le fait qu’il est nécessaire de les respecter [Cha⁺09], bien qu’une définition concrète de l’intimité reste un défi [Dem09].

Il est important de s’assurer que la conception et l’installation des capteurs dans les environnements ne soient pas déterminées simplement par l’essor technologique mais par les besoins réels des intéressés incluant les utilisateurs finaux, les soignants et les cliniciens [Din⁺11]. Sans une estimation appropriée des besoins des personnes, de leurs peurs et attentes, le développement des technologies d’assistance serait vain [Por⁺13]. De plus, de nombreux problèmes techniques persistent : *e.g.* l’analyse des données en temps réel, la génération d’un résumé détaillé à partir d’une grande quantité de données capteurs, la gestion de l’incertitude des capteurs et de leur fiabilité à long terme, les problèmes de robustesse et de maintenance [Din⁺11]. Ces problèmes techniques doivent être résolus au préalable afin de déployer avec succès les systèmes d’assistance à l’autonomie dans des environnements domiciliaires réels [Sta⁺05].

⁶ *fr.* identification par radiofréquence ⁷ *angl.* acceptance ⁸ *angl.* acceptability ⁹ *angl.* trustworthiness

1.1.3 Préalable des technologies d'assistance

Afin de fournir une intelligence ambiante, les technologies d'assistance nécessitent une reconnaissance des activités de la personne au sein de l'environnement. Cette reconnaissance est réalisée à partir des données captées à disposition (*i.e.* capteurs installés) mais surtout pour les activités d'intérêt définies et modélisées.

L'intelligence ambiante (domotique ou assistance à l'autonomie) exige l'instrumentation de l'environnement afin de répondre aux besoins d'acquisition voire d'actuation des technologies d'assistance. La conception d'un environnement instrumenté nécessite de sélectionner les capteurs et leur configuration afin de pouvoir identifier au mieux les activités de la personne. Seules les activités d'intérêts pour l'assistance doivent nécessairement être identifiées et identifiables, ainsi l'instrumentation est optimisée de sorte à maximiser leur identifiabilité : la fiabilité d'identification de l'activité. L'identification de l'activité est inhérente au réseau de capteurs : une activité est identifiable s'il est possible de la déterminer et de la différencier à partir du réseau de capteurs installé. Par conséquent, l'identification des activités doit être fiable afin d'améliorer leur reconnaissance ; où la reconnaissance est une identification en situation réelle. Le système traitant les données captées se charge de reconnaître les activités à partir de données réelles, il est appelé *module de reconnaissance d'activité*. À partir de la reconnaissance d'activité, le système d'assistance peut fournir des services proactifs à l'occupant.

Ainsi, la reconnaissance d'activité est au cœur de l'intelligence ambiante tant elle est primordiale pour les technologies d'assistance. Or, elle ne saurait se soustraire des données recueillies sur l'environnement par les capteurs. Le réseau de capteurs et sa conception sont un préalable aux technologies d'assistance tant ils influent sur la qualité du service proposé aux personnes. La **conception d'environnement instrumenté** nécessite ainsi de disposer d'un réseau de capteurs (une fois installé) permettant l'identification des activités d'intérêts et maximisant leur identifiabilité **pour la veille à la personne**. Dans notre thèse, nous considérons que la conception doit être effectuée et optimisée au préalable d'une installation de capteurs. Il nous est nécessaire de définir formellement les activités afin d'évaluer leur fiabilité d'identification –*i.e.* leur identifiabilité– hors données réelles, et de déterminer les informations capteurs pertinentes.

1.2 État de l'art

Dans la littérature, la plupart des travaux s'intéressent aux habitats intelligents pour la santé et l'assistance à l'autonomie à domicile. Bien que notre travail s'appuie fortement sur le domaine de la santé pour la veille à la personne, la conception d'environnement instrumenté est applicable à d'autres domaines (*e.g.* domotique) et environnements (*e.g.* bâtiment, commerces). De plus, bien que nous évoquons la reconnaissance d'activité, ce présent travail s'intéresse seulement aux outils utilisés pour exploiter le réseau de capteurs à dessein d'intelligence ambiante, ainsi qu'aux travaux effectués pour automatiser la mesure des activités.

De nombreuses questions apparaissent concernant la conception d'environnement instrumenté pour la veille à la personne :

- Qu'est-ce qu'une activité humaine du quotidien ?
- Comment sont reconnues automatiquement les activités ?
- Comment concevoir un réseau de capteurs intérieur pour la veille automatisée ?

1.2.1 Activités du quotidien

Tous les jours, chaque personne réalise de multiples activités : la vie quotidienne est en réalité « un mélange d'habitudes, de routines et d'imprévus » [Pra⁺06]. Les activités sont complexes et très différentes selon les individus, variant selon les âges ; certaines n'étant pas quotidiennes pour tous [Pra⁺06].

Dans la littérature en santé, chercheurs et cliniciens préfèrent se concentrer sur les activités effectuées usuellement au quotidien tant il est ardu de développer un modèle générique permettant de représenter toutes les activités. Ces activités du quotidien sont décrites par le corps médical étant les choses que nous effectuons habituellement dans notre vie quotidienne, incluant toute activité liée à la santé personnelle, au travail, au ménage et aux loisirs [Fle⁺10]. Les activités du quotidien sont reconnues stables dans le temps et l'espace pour une grande majorité de la population [Pra⁺06][Fie⁺11]. Elles sont ainsi largement étudiées pour les systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile [Gok⁺13].

L'ensemble de ces activités du quotidien est réparti en deux catégories :

1. **Activité de vie quotidienne**¹⁰ regroupant les activités relatives à la santé personnelle, telles que : l'hygiène corporelle, l'habillage, la toilette, la locomotion, la continence, la prise de repas... [Fit⁺93][Fri13]
2. **Activité instrumentale de vie quotidienne**¹¹ regroupant les activités domestiques et communautaires, telles que : les courses, la cuisine, le ménage, la lessive, l'utilisation des transports ou du téléphone, la gestion de l'argent ou des médicaments... [Fri13][Kat⁺63][Pes⁺06]

Même si les activités du quotidien sont bien documentées, il n'existe aucun modèle communément établi dans la littérature. Cependant, il existe différents indicateurs utiles permettant de définir les activités : les comportements périodiques [De⁺14], la mobilité [Sca⁺06], voire la position et le mouvement [Vla⁺15]. De plus, les activités d'intérêt se révèlent très hétérogènes dans la littérature. Dans leur revue, Gokalp et Clarke [Gok⁺13] rapportent les différentes *activités et caractéristiques* mesurées dans l'ensemble des études considérées ; s'intéressant notamment au sommeil de la personne, à la préparation de repas, aux chutes, à la continence.

Rares sont les études adressant cette hétérogénéité lors de la modélisation des activités. Celles qui s'y intéressent proposent une description approfondie des activités à travers la notion d'*action* [Kim⁺11]. Une activité humaine complexe peut être décrite étant une séquence d'actions simples [Che⁺12] ; *e.g.* une durée courte, une interaction avec un objet. Ainsi, l'activité humaine peut être considérée comme un ensemble de caractéristiques rassemblées dans un composant élémentaire : l'action. Dans leur revue, Teixeira et al. [Tei⁺10] proposent une taxonomie¹² sensorielle humaine complète distinguant des caractéristiques comportementales spatio-temporelles et physiologiques.

Cette modélisation des activités permet ainsi d'identifier les indicateurs pertinents afin de déterminer les informations capteurs d'intérêt : ces informations sont essentielles pour le module de reconnaissance d'activité. Selon la méthode de conception du module, les informations capteurs sont, soit apprises automatiquement à partir d'expériences, soit construites manuellement à partir de connaissances d'experts (ci-dite modélisation).

¹⁰ *angl.* activity of daily living (ADL) ¹¹ *angl.* instrumental activity of daily living (IADL)

¹² un système de classification

1.2.2 Reconnaissance d'activités

La reconnaissance d'activité¹³ s'attaque au problème d'interpréter les données réelles nombreuses et variées issues des capteurs afin de déterminer quelles activités sont réalisées. Dans la littérature, nous distinguons deux catégories pour reconnaître les activités : l'approche axée données et l'approche axée connaissances.

1.2.2.1 Différentes approches

Approche axée données¹⁴ ambitionne d'apprendre à partir d'ensembles de données d'entraînement les caractéristiques des activités. La qualité et la quantité des données d'entraînement impactent grandement la performance de l'algorithme d'apprentissage et par conséquent la classification quelle que soit la technique employée ; *e.g.* une machine à vecteurs de support¹⁵ [Fle⁺10][Kad⁺10], un modèle de markov caché¹⁶ [Via⁺16]. De plus, les données réelles brutes issues des capteurs doivent être filtrées ou pré-traitées afin de sélectionner celles pertinentes ; *e.g.* par une analyse en composantes principales¹⁷ [Fle⁺10], un algorithme de sélection des caractéristiques par machine à vecteurs de support¹⁸ [Kad⁺10], ou des règles d'association éditées par un expert [Via⁺16].

Approche axée connaissances¹⁹ vise à exploiter la connaissance d'experts du domaine afin de modéliser les activités. Les activités peuvent être modélisées par une séquence d'états de capteurs, et comparée –par une fonction de concordance²⁰– à des motifs sélectionnés par une approche d'extraction de motifs²¹ fréquents [Chi⁺11]. Elles peuvent être décrites par un réseau de Petri temporel²² pour la détection, reliées à un ensemble de capteurs adéquats [Fan⁺14]. Des motifs élémentaires capteurs peuvent être modélisés par un automate fini étendu²³ afin qu'un expert puisse analyser les habitudes fondamentales de la personne pour les regrouper en activités [Sai⁺15]. Les activités peuvent être décrites par des propositions en logique temporelle²⁴ afin d'être vérifiées formellement à chaque évènement [Mag⁺13].

Selon la méthode utilisée, les performances de la reconnaissance d'activité sont évaluées soit en la comparant avec la vérité terrain d'un expert (au moyen d'une matrice de confusion [Fle⁺10] ou d'une table de reconnaissance [Chi⁺11]), soit en vérifiant les propriétés du modèle (réseau de Petri vivant, borné et réversible) [Fan⁺14], ou simplement *reste en dehors du champ* de l'étude [Sai⁺15]. Dans la littérature, les performances de ces modules sont extrêmement variables lors de leur évaluation : elles dépendent du réseau de capteurs installé.

1.2.2.2 Des réseaux de capteurs déjà installés

Chaque étude abordée dans cette sous-section 1.2.2 considère un réseau de capteurs déjà installé, ayant, soit un accès direct à un appartement instrumenté [Fle⁺10][Kad⁺10][Chi⁺11], soit un accès à une base de données capteurs [Via⁺16][Sai⁺15].

Par ailleurs, aucune de ces études n'adresse ou ne décrit la logique derrière la conception du réseau de capteurs : le choix et la configuration des capteurs appelé **placement de capteurs**²⁵. De plus, lorsque des capteurs pertinents doivent être installés, leur placement est considéré

13 *angl.* activity recognition (AR) 14 *angl.* data-driven approach (DDA) 15 *angl.* support vector machine (SVM)

16 *angl.* hidden markov model (HMM) 17 *angl.* principal component analysis

18 *angl.* support vector machine (SVM) 19 *angl.* knowledge-driven approach (KDA)

20 *angl.* mapping function. 21 *angl.* pattern mining approach (PMA) 22 *angl.* time petri net (TPN)

23 *angl.* extended finite automaton (EFA) 24 *angl.* temporal logic (TL) 25 *angl.* sensor placement

futile et simple : Fleury et al. [Fle⁺10] « ont installé, dans un appartement réel et utilisable, des capteurs qui étaient utiles pour leur application ». Finalement, l'ensemble approprié de capteurs (l'ensemble optimal de capteurs et son coût associé) est usuellement déterminé lors de l'expérimentation au lieu de l'être au préalable. Par conséquence, certains capteurs installés ne sont pas réellement utilisés, voire sont désinstallés [Kad⁺10].

Ainsi, le placement de capteurs influence les performances du module de reconnaissance d'activité à déployer. Le réseau de capteurs doit être conçu soigneusement.

1.2.3 Réseau de capteurs

Un réseau de capteurs²⁶ est un ensemble de capteurs installés dans l'environnement afin d'en acquérir des informations spécifiques, dépendantes de la nature des capteurs. L'intérêt est d'utiliser ces capteurs de concert, de combiner leur informations afin de permettre aux technologies d'assistance de remplir leurs objectifs de services ; *e.g.* assistance à l'autonomie à domicile, domotique de confort ou d'économie.

1.2.3.1 Divers réseaux de capteurs

Dans la littérature, les recherches concernant les réseaux de capteurs foisonnent, adressant principalement : les réseaux sans-fil voire mobiles.

Réseau de capteurs sans-fil²⁷ est un réseau de capteurs autonomes répartis dans l'environnement afin d'acquérir et de transférer des informations environnementales à travers un réseau sans-fil vers un système centralisé de traitement [Zhu⁺12]. Chaque capteurs est un nœud du réseau, recevant et convoyant des données. De par sa nature, le réseau est limité en portée, en débit voire en énergie. Leur utilisation requiert de s'assurer de la connectivité et la durée de vie du réseau, en optimisant la transmission des données et au préalable le placement initial des capteurs.

Réseau de capteurs sans-fil mobiles²⁸ est un réseau de capteurs sans-fil où les capteurs sont mobiles. Cette mobilité des capteurs complexifie les objectifs de connectivité et durée de vie du réseau : les capteurs peuvent disperser la consommation énergétique des capteurs pour fournir des données [Eki⁺06]. Leur utilisation requiert aussi de gérer le dynamisme de la topologie du réseau, la non-fiabilité des maillons de communications, les besoins énergétiques élevés et la nécessité d'une connaissance précise des positions de chaque nœud [Zhu⁺14].

Ainsi, des objectifs principaux de l'application peuvent s'ajouter d'autres objectifs critiques, ayant trait au bon fonctionnement de l'ensemble du réseau notamment la connectivité, la durée de vie ou le dynamisme du réseau. Ces derniers objectifs restent en dehors du champ de notre étude : nous nous concentrons sur des réseau de capteurs simples, statiques et sans problème de connectivité ou d'alimentation. Il est nécessaire d'évaluer le réseau de capteurs au regard d'objectifs afin de juger sa qualité à les remplir.

²⁶ *angl.* sensor network (SN) ²⁷ *angl.* wireless sensor network (WSN)

²⁸ *angl.* mobile wireless sensor network (MWSN)

1.2.3.2 Différentes évaluations des réseaux de capteurs

Dans la littérature, l'évaluation des réseaux de capteurs simples est fondée principalement sur la *Couverture* ou sur l'*Observabilité*.

Couverture²⁹ vise à qualifier la densité de couverture d'une région de l'espace identifiée à des fins spécifiques, appelée *région d'intérêt*³⁰. En général, un réseau de capteurs axé sur la couverture essaie, soit de couvrir entièrement la région d'intérêt [Dav⁺07][Gon⁺09][Kou⁺10][Akb⁺13], soit d'assurer la *k*-couverture de la région d'intérêt en ayant au minimum *k* capteurs couvrant chaque position [Kou⁺12][Li⁺14]. Les métriques qualifiant la couverture consistent simplement à calculer pour chaque position de la région d'intérêt le nombre de capteurs la couvrant (*k*-couverture), au pire, vérifier si la position est couverte (1-couverture).

Concernant les capteurs binaires, Emmons et Kamangar [Emm⁺13] ont proposé une métrique afin de qualifier l'utilité générale comprenant : la couverture effective, la précision et le nombre de capteurs. Cette métrique est définie étant la somme pondérée de ces trois objectifs. Cependant, la performance d'objectifs pondérés est grandement sensible à la normalisation des objectifs et aux valeurs relatives des poids.

Les capteurs binaires et continus sont éligibles à la Couverture étant donné qu'il suffit de déterminer la *région de couverture* de chaque capteur : sa région d'acquisition effective dans l'environnement.

Observabilité³¹ vise à qualifier une estimation de paramètres vis-à-vis de la quantité et de la qualité des données expérimentales utilisées. En général, l'observabilité d'un réseau de capteurs quantifie l'incertitude de l'estimation de paramètres relativement à la disposition des capteurs vis-à-vis de l'intérêt. Elle est utilisée lors de la conception afin de déterminer des dispositions minimisant les futures incertitudes d'estimation. L'observabilité s'intéresse à qualifier l'*identifiabilité* du réseau de capteurs au regard des paramètres d'intérêt, autrement nommée *optimalité*³² en planification optimale des expériences³³.

Bishop et al. [Bis⁺10] fournissent des métriques afin de déterminer le placement optimal de capteurs à dessein de localisation³⁴ pour des capteurs de distance, d'angle et de temps d'arrivée. Ils montrent que le positionnement optimal des capteurs vis-à-vis de l'objet d'intérêt n'est pas unique pour un nombre arbitraire de capteurs. Par ailleurs, leurs métriques reposent sur les techniques de planification optimale des expériences basée modèle³⁵, et plus précisément sur la D-optimalité³⁶ [Fed⁺13]. Ces techniques se basent sur un modèle analytique décrivant les relations entre des paramètres (à estimer), des états (à choisir) et des mesures (à observer) ; *e.g.* position de la personne, configuration des capteurs et leurs mesures réelles.

Dans le cadre d'une triangulation³⁷, Kelly [Kel03] définit le critère d'affaiblissement géométrique de la précision³⁸ (GDOP) étant le rapport entre l'incertitude des états et des mesures ; pour deux capteurs de distance ou d'angle. Ce critère est une D-optimalité, étant le déterminant de la Jacobienne inverse du modèle. Contrairement à Bishop et al., les perturbations ou erreurs considérées par Kelly ne sont pas normalement distribuées : sa méthodologie est valide quelle que soit la nature de perturbations centrées, qu'elles soient systématiques ou aléatoires.

²⁹ *angl.* coverage ³⁰ *angl.* region of interest (RoI), ou interest region (IR) ³¹ *angl.* observability

³² *angl.* optimality ³³ *angl.* optimal design of experiments (ODOE)

³⁴ étant l'action de situer dans un lieu défini, de déterminer la position précise

³⁵ *angl.* model-based optimal design of experiments ³⁶ *angl.* D-optimality ³⁷ étant une technique de localisation utilisant des angles mesurés en des positions références ³⁸ *angl.* geometrical dilution of precision (GDOP)

Cependant ses résultats analytiques sont exprimés uniquement pour un système simplement déterminé ; non sur-déterminé.

Seuls les capteurs continus sont éligibles à l'observabilité étant donné qu'un modèle analytique est nécessaire pour la planification optimale des expériences.

1.2.3.3 Problème de la galerie d'art

En réalité, la couverture de l'entière des régions d'intérêt est un problème commun de visibilité en Géométrie Algorithmique³⁹ intitulé *problème de la galerie d'art*⁴⁰. Il s'agit de déterminer un nombre minimal de gardes et leur position statique au sein d'un environnement polygonal afin de couvrir l'ensemble des positions de la région d'intérêt, étant la galerie d'art et représentée par un polygone [Urr00]. La topologie de l'environnement ainsi que les régions d'acquisition des capteurs influent sur les éléments visibles par le réseau de capteurs ; les capteurs sont rarement omnidirectionnels, nécessitant de déterminer aussi l'orientation optimale de chaque garde.

Similairement, l'observabilité est confrontée au problème de visibilité. La région de couverture des capteurs ainsi que les obstacles présents dans l'environnement intérieur sont généralement négligés [Mar⁺06][Doğ⁺08][Bis⁺10]. Lors de l'évaluation de l'observabilité d'une estimation –*i.e.* une valeur des paramètres– d'intérêt, il est nécessaire de déterminer si cette estimation est couverte par le réseau de capteurs et par quels capteurs elle est visible afin de s'assurer de son existence. Par conséquent, la détermination de la visibilité pour chaque élément d'intérêt⁴¹ ou estimation d'intérêt est un préalable à toute évaluation, qu'il s'agisse de la couverture ou de l'observabilité.

Ainsi, en environnement intérieur, nous ne pouvons pas négliger la visibilité des éléments tant elle est essentielle afin de recueillir des informations sur l'environnement et ses occupants. Similairement au problème de la galerie d'art, les conceptions de réseaux de capteurs en environnement intérieur se focalisent sur l'amélioration de la localisation des personnes en évaluant précisément la visibilité de chaque élément, ainsi qu'en couvrant au maximum les régions d'intérêt voire en priorisant certains éléments d'intérêt.

1.2.3.4 Placement de capteurs en intérieur pour l'assistance à domicile

Dans la littérature, les recherches concernant la conception d'environnement instrumenté pour la veille à la personne sont récentes. Leur préoccupation principale est de concevoir un réseau de capteurs non-porté, non-intrusif et à bas coût. À notre connaissance, [Vla⁺15] et [Fan⁺16][Fan⁺17] sont les recherches les plus pertinentes dans ce domaine restreint.

Vlasenko et al. [Vla⁺15] proposent de générer des chemins de mobilité anticipés à l'intérieur du domicile, en identifiant les plus courts chemins entre chaque paire d'objets d'intérêt. À partir de ces chemins, ils calculent une carte de densité représentant le nombre de visite de chaque position afin de maximiser la couverture de chaque position ayant autant de capteurs la couvrant que sa valeur associée ; forçant la réjection des régions attractives (*i.e.* à forte densité) suffisamment couvertes pour répartir les capteurs dans l'environnement. Pour ce faire, ils ont développé un algorithme glouton de conception, optimisant itérativement la position d'un nouveau capteur de mouvement infrarouge passif selon un ensemble de capteurs placés (un par un) précédemment.

39 *angl.* computational geometry 40 *angl.* art gallery problem 41 élément de la région d'intérêt

Pour développer leur algorithme de conception, ils se sont fondés sur [Bis⁺10] afin d'émettre l'hypothèse que : la géométrie du placement de capteurs peut être optimisée par rapport aux mesures prises, améliorant ainsi la localisation des occupants sans modifier l'algorithme de localisation existant. Cependant, une telle hypothèse est uniquement valide pour des expériences –fournissant des données capteurs réelles– étant donné que les techniques de planification optimale des expériences sont développées pour choisir (*e.g.*) la prochaine position du capteur. En réalité, les positions des capteurs doivent toutes être optimisées simultanément. De plus, en couvrant les chemins au lieu des objets ou des régions d'intérêt, les points de croisement sont favorisés en dépit de la pertinence réelle de ces points. Cette méthode ne garantit pas directement l'identification fiable des interactions de la personne avec les objets d'intérêt.

Fanti et al. [Fan⁺16] proposent de diviser l'appartement pièce par pièce afin de définir des régions d'intérêt indépendantes, toutes associées à un problème de placement de capteurs. Ils considèrent de minimiser le coût des capteurs et d'assurer la couverture complète de chaque région d'intérêt. Dans leur article suivant [Fan⁺17], ils s'intéressent à maximiser l'enchevêtrement de régions ou de minimiser le coût des capteurs. Pour ce faire, ils ont utilisé un algorithme de programmation linéaire en nombre entiers⁴² pour chaque pièce afin d'optimiser le placement de tous les capteurs et de satisfaire leurs exigences de couverture : au moins un capteur doit couvrir chaque région dépourvue d'obstacles.

Pour développer leur algorithme de conception, visant à améliorer la localisation des occupants, ils se sont fondés sur [Dan⁺13] afin d'émettre l'hypothèse que : une région doit être couverte par au moins un capteur afin de permettre de détecter la présence des occupants. Cependant, en posant que chaque pièce est une région d'intérêt, il est impossible de détecter les interactions de la personne avec les objets d'intérêt, étant donné que plusieurs objets peuvent être présents dans la pièce. De plus, ils ont émis l'hypothèse que seulement la localisation des habitants en 2D est requise pour l'assistance à l'autonomie à domicile. Or, ces systèmes d'assistance utilisent différents types de capteurs qui ne sont pas nécessairement pour la localisation [Ras⁺13][Gok⁺13].

Ainsi, les travaux les plus prometteurs concernant la conception d'environnement instrumenté pour la veille à la personne se focalisent sur le placement de capteurs pour acquérir des informations de positions, et supposent que les activités peuvent être bien déterminées exclusivement par localisation des personnes.

1.3 Problématique

Force est de constater que la veille automatisée à la personne est ardue. Techniquement, il est nécessaire de :

1. Lier par expérience ou par connaissance les activités à des indicateurs utiles observables de manière automatisée, voire directement à des informations capteurs : **Modélisation des Activités**
2. Choisir et configurer les capteurs pour acquérir les informations utiles : **Placement de Capteurs**
3. Traiter les informations captées pour en extraire celles pertinentes afin de reconnaître l'activité ou l'action : **Reconnaissance d'Activité**

⁴² *angl.* integer linear programming (ILP)

1.3.1 Placement de capteurs : au cœur de la veille automatisée

Dans la littérature d'assistance à l'autonomie à domicile, la conception du réseau de capteurs ou placement de capteurs est peu abordée. Cependant, elle est primordiale se situant au cœur du processus de veille automatisée.

En *amont*, la modélisation des activités permet d'identifier les indicateurs utiles à acquérir par le réseau de capteurs. En *aval*, la reconnaissance d'activité exploite les informations observées par le réseau de capteurs installé. Si le placement de capteurs est mal conçu, le module de reconnaissance d'activité ne pourra combler les lacunes informationnelles du réseau. Nous ne pouvons nous satisfaire de devoir constater à posteriori si le réseau de capteurs installé fournit des informations utiles pour le système d'assistance à l'autonomie à domicile [Car⁺16], voire de devoir délaissier certains capteurs installés [Kad⁺10]. Ces deux aspects entraînent l'installation de capteurs très riche en informations (**intrusivité** du réseau), ou l'installation de multiples capteurs (**invasivité** du réseau) pour améliorer les performances de la reconnaissance d'activité.

Or, psychologiquement, l'installation de capteurs pouvant être ressentis intrusifs par la personne constitue un obstacle majeur à l'instrumentation : la personne étant atteinte, perturbée voire épiée dans sa vie intime. Une solution au caractère intrusif de l'instrumentation est d'utiliser des capteurs aux détails moindres. Or, afin de pallier la perte informationnelle, la multiplication des capteurs s'opère, entraînant un sentiment d'invasion. L'acceptabilité des capteurs par la personne est primordiale afin d'offrir un système de veille discret : elle est un mélange complexe inhérent à la personne entre intrusivité et invasivité du réseau de capteurs.

Ainsi, l'instrumentation du domicile doit être l'équilibre entre acceptabilité par la personne et performance de la reconnaissance. Il est nécessaire de proposer une méthodologie et un outil d'aide au placement de capteurs permettant de répondre aux attentes de la personne et aux besoins des soignants.

1.3.2 Information de position : une mauvaise information sensorielle essentielle

Les travaux les plus prometteurs concernant la conception d'environnement instrumenté pour la veille à la personne se focalisent sur le placement de capteurs pour acquérir des informations de position en utilisant des capteurs de présence.

1.3.2.1 Présence : une localisation imprécise

Leur méthodologies supposent que les activités peuvent être déterminées à partir d'une localisation imprécise des personnes : présence dans une pièce [Fan⁺16], région d'intérêt englobée dans une ou un enchevêtrement de régions de couverture [Fan⁺17], voire différentes positions d'intérêt rassemblées en une intersection de régions de couverture [Vla⁺15]. De part leur nature, les capteurs de présence ne permettent pas une localisation précise des personnes mais de situer la présence de la personne dans un lieu défini : un ensemble de positions constituant sa région de couverture. Si la granularité du réseau de capteurs de présence est trop importante (*i.e.* faible densité de capteurs), à chaque région de couverture correspondra une grande incertitude de mesures où la personne est considérée présente alors qu'elle n'est pas dans la région d'intérêt [Fan⁺16][Fan⁺17] voire à la position d'intérêt [Vla⁺15].

Les capteurs de présence permettent de réduire l'intrusivité au prix de l'invasivité du réseau de capteurs lorsqu'ils sont utilisés afin de localiser les personnes. La localisation de personnes à

partir de capteurs de présence est très imprécise, tant elle estime une position de la personne avec une forte incertitude. D'une part, il serait préférable d'utiliser des capteurs différents plus précis pour la localisation ; *e.g.* capteur de distance (trilatération) ou d'angle (triangulation). D'autre part, il serait préférable d'acquérir d'autres indicateurs utiles plus précis pour l'identification ; *e.g.* l'interaction avec les objets.

1.3.2.2 Position : un indicateur peu précis mais très sensible

En général, la position de la personne est généralement une mauvaise mesure indirecte de l'interaction avec un objet pertinent à l'action. La position n'est pas l'unique indicateur utile ni le plus pertinent (pour l'activité) ni le plus précis (pour l'action). Si l'indicateur est peu pertinent, à chaque mesure effective correspondra une grande incertitude d'identification de l'activité : où l'activité est considérée réalisée alors que l'action ne concerne pas l'activité (fausse alarme). Si l'indicateur est peu précis, à chaque mesure effective correspondra une grande incertitude d'identification de l'action : où l'action est considérée réalisée alors qu'elle ne l'est pas (fausse alarme). Cependant, l'information de position est un indicateur très sensible pour un grand nombre d'actions. Si l'indicateur est très sensible, à chaque action réalisée correspondra une mesure effective du réseau de capteurs : où l'action est considérée identifiable bien qu'elle puisse l'être difficilement (mauvaise identifiabilité). La précision et la sensibilité des indicateurs permettent de qualifier la fiabilité de l'identification des actions vis-à-vis des indicateurs retenus et captés : *i.e.* les informations capteurs.

Ainsi, la veille automatisée nécessite un réseau de capteurs hétérogènes pour l'acquisition d'informations hétérogènes afin d'améliorer l'identifiabilité des actions en choisissant les indicateurs les plus adéquats à capter.

1.4 Conception d'environnement instrumenté pour la veille à la personne

1.4.1 Motivations et objectifs

Nous nous intéressons à la conception d'environnements instrumentés permettant une veille abordable, fiable, acceptable et robuste. À partir d'un domicile donné (plan, meubles...) et d'a priori sur les actions et leurs indicateurs utiles, nous développons une méthodologie de placement de capteurs déterminant le type et la configuration des capteurs afin d'optimiser l'identifiabilité des actions en sélectionnant les indicateurs les plus adéquats. Nous devons ainsi pouvoir évaluer l'identifiabilité d'un réseau de capteurs au regard des actions –des activités– d'intérêt. Nous nous intéressons à deux méthodes d'évaluation à dessein : la fiabilité et l'observabilité.

Afin de concevoir un réseau de capteurs systématique non basé sur l'expérience pure d'experts, nous définissons leur logique tacite en modélisant les activités afin d'évaluer précisément le réseau de capteurs. Afin de concevoir un réseau de capteurs écologique, il est nécessaire de considérer un modèle probabiliste de capteurs afin d'éviter une modélisation irréaliste des performances des capteurs, amenant à concevoir un placement sous-optimal [Akb⁺13]. Afin de concevoir un réseau de capteurs personnalisé, nous devons modéliser les régions d'intérêt par différentes densités pour prioriser leur couverture [Chr⁺14].

Afin de concevoir un réseau de capteurs non-intrusif et non-porté, nous devons avoir une méthodologie compatible avec les capteurs binaires. L'avantage de simples capteurs binaires

sont leur faible coût, leur facilité d'installation et leur faible intrusivité [Din⁺11]. Ces capteurs sont largement utilisés dans les systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile : des capteurs principalement binaires (*e.g.* barrière de porte, capteur de mouvement), voire des capteurs continus binarisés par une fonction de seuil (*e.g.* consommation d'électricité, débit d'eau ou capteur de pression) [Dan⁺16][Via⁺16].

1.4.2 Hypothèses

Nous considérons qu'une activité est décomposable en actions pouvant être commune à plusieurs activités. Chaque activité est un ensemble d'actions, devant être réalisées séquentiellement ou parallèlement. Chaque action est caractérisée par des indicateurs mesurables par capteurs. Notamment, nous considérons qu'une action consiste à une interaction de la personne avec des objets spécifiques de l'environnement. Ainsi, un objet est un outil nécessaire à la réalisation de l'action : nous pouvons soit détecter l'interaction d'un objet, soit supposer son utilisation en détectant la personne dans une région d'intérêt de l'environnement propice à l'interaction.

Nous considérons que les spécificités inter-individuelles, *i.e.* les caractéristiques propres à l'individu, sont des paramètres du système fournis en amont : les régions d'intérêt peuvent être ajustées en fonction de la personne. De plus, nous écartons tout aspect temporel et dynamique de notre conception : la temporalité est gérée par le module de reconnaissance d'activité. La reconnaissance d'activité est hors cadre de cette thèse : notre méthodologie est conçue sans à-priori sur la nature du module installé en aval.

Nous considérons un réseau de capteurs simple, statique et sans problème de connectivité ou d'alimentation. Par ailleurs, nous excluons les capteurs portés, nous concentrant uniquement sur les capteurs devant être installés dans l'environnement.

1.4.3 Contributions

Dans cette thèse, nous développons :

- Un modèle d'activité dédié à l'assistance à l'autonomie à domicile fondé sur les travaux en Ergothérapie
- Un modèle ensembliste unifiant de capteurs (du binaire au continu) et d'actions (aux caractéristiques diverses), permettant de fusionner des informations homogènes de capteurs hétérogènes
- Une évaluation de la fiabilité du réseau de capteurs au regard des actions, fondée sur la couverture des intérêts (F-mesure)
- Un algorithme de conception du réseau de capteurs Pareto-optimal, maximisant l'ensemble des fiabilités de chaque action d'intérêt
- Un exemple opérationnel de notre algorithme de conception Pareto multi-objectifs, améliorant les fiabilités du réseau de capteurs
- Un modèle analytique simplifié décrivant l'influence des incertitudes sur les informations captés, fondé sur l'identification de paramètres
- Une évaluation de l'incertitude du réseau de capteurs au regard d'une information, indépendamment de la nature du bruit et sans nombre limite de capteurs (observabilité)
- Un exemple de conception Pareto multi-objectifs, améliorant l'incertitude de paramètres par l'observabilité et la comparant avec l'incertitude évaluée à partir de notre modèle ensembliste

1.4.4 Organisation

Afin de conclure ce chapitre 1 introductif, nous détaillons l'organisation de cette thèse et présentons un bref aperçu des chapitres.

Chapitre 2 Dans ce chapitre, nous présentons un état de l'art sur l'activité, sa définition et son étude en Ergothérapie afin de mesurer les activités humaines. Nous présentons une modélisation des activités en actions à dessein de veille automatisée. Nous illustrons le modèle d'activité et le processus de veille par un exemple où nous décomposons une activité d'intérêt en vue d'une acquisition par des capteurs intégrés à l'environnement.

Chapitre 3 Ce chapitre présente la première contribution de cette thèse : la modélisation des actions et capteurs en une représentation unifiée, unique et flexible. Il introduit les concepts primordiaux du modèle (région) pour définir le problème de placement de capteurs en intérieur. Plusieurs augmentations sont présentées afin de représenter au mieux la réalité de la veille : fusion des informations, hétérogénéité du réseau, importance des actions et performances des capteurs. Ce chapitre est essentiellement théorique et permet de mettre en place un ensemble de notions qui ont des applications directes pour l'évaluation du réseau de capteurs.

Chapitre 4 Ce chapitre présente la deuxième contribution de cette thèse : l'évaluation de la fiabilité d'un réseau de capteurs représenté par notre modélisation en régions. Il introduit la notion de fiabilité (Sensibilité et Précision) et son évaluation (matrice de confusion). Plusieurs complétions sont développées afin d'évaluer au mieux la réalité de la veille : fusion des informations, importance des actions et incertitudes des capteurs. Ce chapitre permet de sélectionner optimalement les informations pertinentes puis d'en déterminer une expression logique pour la réalisation vraisemblable de l'action, ayant des applications directes pour la reconnaissance d'activité.

Chapitre 5 Dans ce chapitre, nous proposons un algorithme de conception du réseau de capteurs Pareto multi-objectifs adapté ainsi qu'une implémentation de notre méthodologie de conception. Nous en présentons un cas applicatif en nous limitant au capteur de présence mais en choisissant optimalement les indicateurs de l'action à couvrir. Ce chapitre permet d'illustrer l'intérêt des notions présentées dans les chapitres précédents pour les problèmes de placement de capteurs en intérieur, ainsi que la force et flexibilité de notre méthodologie de conception.

Chapitre 6 Ce chapitre présente la troisième contribution de cette thèse : le calcul simplifié de l'observabilité d'une information estimée et son application au placement de capteurs préalable. Il introduit les concepts utilisés en planification optimale des expériences et en calibration robotique pour réduire l'incertitude des indicateurs utiles⁴³. Dans ce chapitre, nous illustrons la notion d'observabilité pour des problèmes de placement de capteurs en intérieur. Nous présentons un cas applicatif en nous limitant au capteur d'angle mais en explorant l'incertitude de positionnement des capteurs. Ces travaux ont permis la publication suivante [Mas⁺16], pour la localisation en robotique.

Chronologiquement, nous nous sommes intéressé aux techniques de planification optimale des expériences afin d'évaluer l'identifiabilité en utilisant l'observabilité du réseau de capteurs ;

⁴³ étant estimés à partir des informations captées

i.e. réduction de l'incertitude des informations estimés. Or, ces techniques ne sont pas adaptés aux capteurs binaires, très utilisés pour l'assistance à l'autonomie à domicile. Au cours de cette thèse, nous avons réorienté nos travaux en deuxième année pour développer une modélisation compatible avec toutes natures de capteurs (binaire au continu) –présentée dans les chapitres 3 à 5– fondée sur une autre évaluation de l'identifiabilité : la F-mesure. Nous sommes convaincu que l'**incertitude**⁴⁴ et la **fiabilité** sont des évaluations complémentaires pour la conception mais concernant des objectifs et contraintes différentes.

⁴⁴ où l'observabilité est une "*approximation*" de l'incertitude des indicateurs utiles estimés

Chapitre 2

Modèle des activités pour une veille automatisée

Sommaire

2.1 L'activité	16
2.1.1 L'Ergothérapie : l'étude des activités pour le bien des personnes	16
2.1.2 Définition de l'activité	17
2.2 L'action	19
2.2.1 Outils d'Ergothérapie: l'évaluation valide et robuste des actions pour des informations fiables	19
2.2.2 Caractéristiques des actions	22
2.3 Application du modèle d'activité aux systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile	25
2.3.1 Processus de veille	27
2.3.2 Adaptation du modèle à la conception : caractéristiques écartées	28
2.3.3 Conception de l'instrumentation : exemple et discussion	29

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à définir un *modèle des activités* afin de lier la veille automatisée –*i.e.* identification des actions– et le réseau de capteurs. Ce modèle permet de nous affranchir du problème aval de reconnaissance d'activité pour nous concentrer sur le placement de capteurs, qui sera abordé dans les chapitres suivants. En aval, le système d'assistance à l'autonomie à domicile s'appuie sur des observations du monde réel fournies par le réseau de capteurs et exploitées par le module de reconnaissance d'activité afin de veiller à la personne. En amont, nous avons des activités d'intérêt à identifier et à décrire. Nous modélisons les activités à partir d'observations du monde réel pouvant être acquises par des capteurs. Notre approche –axée sur la connaissance– est particulièrement adaptée pour la veille aux activités de vie quotidienne et activités instrumentales de vie quotidienne : ces activités sont réalisées dans « des circonstances relativement spécifiques à une temporalité, un lieu ou un espace » et/ou impliquant « de multiples interactions avec l'environnement » [Che⁺12]. Dû au contexte de cette thèse, notre travail s'appuie fortement sur les activités de vie quotidienne très étudiées en Ergothérapie. Le modèle gagnerait à être éprouvé et adapté pour des activités réalisées dans d'autres contextes ; *e.g.* clients dans un commerce.

Afin de proposer un modèle simple et générique, nous nous intéressons aux travaux menés en Ergothérapie sur l'activité humaine. Ce domaine étudie l'activité dans sa diversité, dans des contextes et environnements variés. Nous proposons de reprendre leur définition de l'activité afin d'en extraire un modèle compatible avec la veille automatisée. Nous nous fondons sur deux

outils d'Ergothérapie décrivant la performance des activités : le cadre OTPF [Rol⁺08][Rol⁺14] et l'échelle AMPS [Fis⁺13a][Fis⁺13b].

2.1 L'activité

Le premier défi à relever pour le déploiement des systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile est la définition formelle des activités. Il est intéressant de développer un modèle générique mais simple permettant de représenter la majeure partie des activités. Depuis un siècle, l'Ergothérapie étudie l'activité humaine dans sa complexité et sa diversité afin de veiller à la personne dans son environnement quotidien.

2.1.1 L'Ergothérapie : l'étude des activités pour le bien des personnes

La fédération mondiale des ergothérapeutes¹ (WFOT) définit l'Ergothérapie² comme une « profession de santé s'intéressant à soutenir la santé et le bien-être à travers l'occupation » (2012) [oOcc17]. Elle consiste en l'utilisation thérapeutique des activités³ du quotidien avec des personnes ou des groupes afin d'améliorer ou permettre leur participation aux rôles, habitudes et routines réalisées au sein d'une maison, une école, au travail, une communauté et d'autres environnements [Rol⁺14]. Son objectif est ainsi « de maintenir, de restaurer et de permettre les activités humaines de manière sécurisée, autonome et efficace, et ainsi, de prévenir, réduire ou supprimer les situations de handicap pour les personnes, en tenant compte de leurs habitudes de vie et de leur environnement »⁴ [oOcc17].

Cette profession est convaincue de la relation positive entre occupation et santé, et de sa vision de la personne en tant qu'être occupationnel⁵ : elle valorise la nature occupationnelle⁵ des personnes pour une vie saine, productive et satisfaisante [Unr04][Rol⁺14]. Telle qu'énoncée par Hooper et Wood [Hoo⁺14] :

« Une hypothèse philosophique fondamentale de la profession, par conséquent, est que en vertu de nos dons biologiques, les personnes de tous âges et de toutes compétences ont besoin de grandir et de se porter bien ; à la poursuite de l'occupation, l'humain exprime la totalité de son être, une union du corps et de l'esprit. Parce que l'existence humaine ne pourrait pas être autrement, l'humanité est, en substance, occupationnelle par nature. »

Veiller à la personne consiste ainsi à s'intéresser à ses activités, et à évaluer leur réalisation. Depuis sa création en 1917 [Rol⁺14], l'Ergothérapie étudie l'activité humaine dans sa diversité, touchant des contextes⁶ et environnements⁷ variés. Dans sa pratique, l'ergothérapeute collabore directement avec la personne et son entourage (*e.g.* la famille, le personnel soignant) :

- en veillant simultanément à ses fonctions corporelles et structurelles, à ses compétences, à ses rôles, à ses habitudes, à ses routines et au contexte ;
- en considérant la personne étant un être occupationnel ;
- en priorisant la connaissance (due à l'expérience du praticien) des effets bénéfiques sur la santé et la performance des engagements occupationnels.

1 *angl.* world federation of occupational therapists (WFOT) 2 *angl.* occupational therapy 3 *angl.* occupations

4 selon l'association nationale française des ergothérapeutes (ANFE) 5 *angl.* occupational

6 *e.g.* maintenir, restaurer et permettre les activités humaines ; *e.g.* prévenir, réduire ou supprimer les situations de handicap

7 *e.g.* une maison, une école, au travail, une communauté

À travers ces jalons, l'ergothérapeute procède en trois étapes : évaluation, intervention et résultat⁸ ; cf. figure 2.1. Cette première étape fondamentale nous intéresse pour la veille automatisée : l'évaluation consiste à élaborer le profil occupationnel de la personne, et à analyser ses performances occupationnelles.

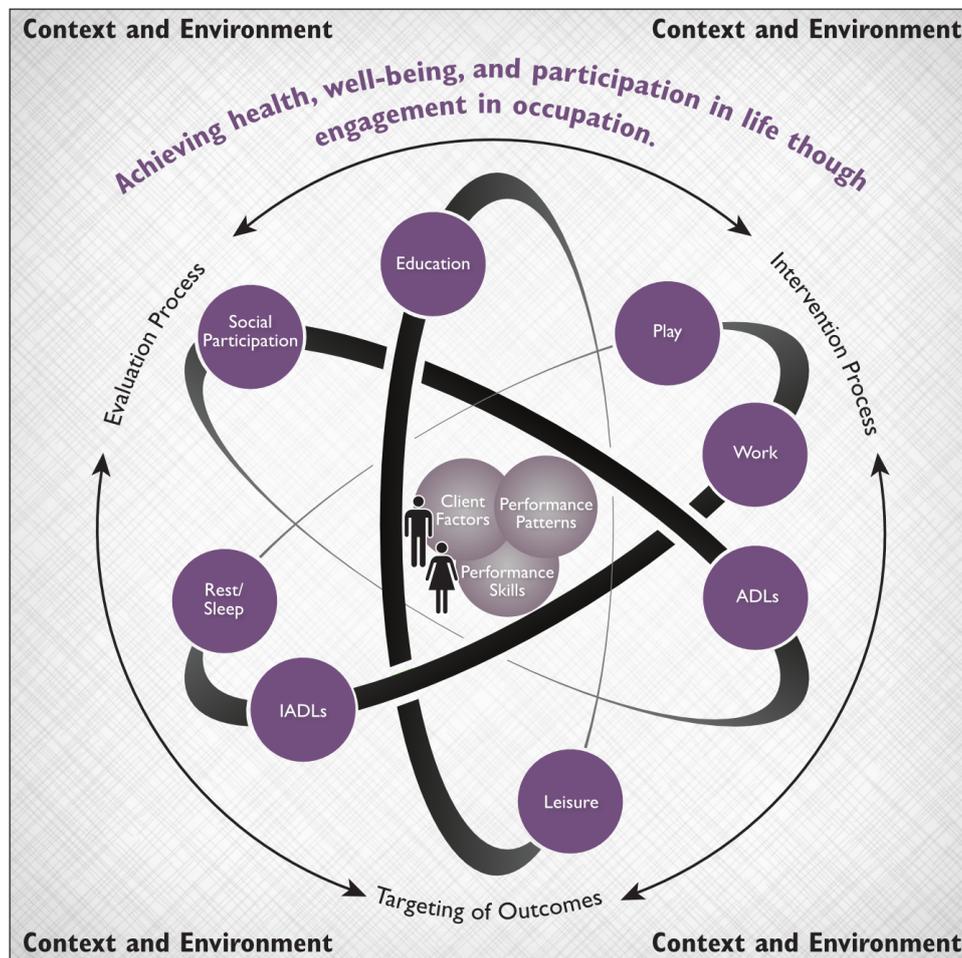


FIGURE 2.1 – Champ d'expertise et processus de l'Ergothérapie [Rol⁺14]

Ces performances occupationnelles sont évaluées par une observation directe de la personne, en situation de réalisation. Au préalable, pour une observation efficace, il est nécessaire d'analyser et de définir la notion d'activité.

2.1.2 Définition de l'activité

2.1.2.1 Activité et occupation : une confusion de sens

La notion d'*occupation*, liée à celle d'*activité*, est complexe et délicate à définir : Roley et al. [Rol⁺14] identifient sept définitions différentes. En Ergothérapie francophone, la notion d'activité réfère au terme anglais *occupation*, introduisant ainsi une confusion de sens car un même terme (activité pour *angl. occupation*, et activité pour *angl. activity*) recouvre deux concepts différents [Van16].

⁸ *angl.* respectively evaluation process, intervention process, targeting of outcomes

Nous dénotons la difficulté lexicale de nommer occupation et activité, et d'en comprendre le sens. Van Bruggen [Van16] propose l'exemple du verbe *Boire* pouvant être une habilité (*e.g.* boire signifiant *avalier du liquide*), une activité (*e.g.* *Boire son café*), une occupation (*e.g.* boire signifiant *être alcoolique*) voire une tâche, une habitude ou une routine. Elle dénote dans sa lecture que « tout dépend du concept qu'il est nécessaire de mobiliser pour saisir ce qui nous intéresse dans *boire* à un moment donné en rapport au contexte » [Van16]. Ainsi, il faut distinguer les concepts liés à la taxonomie de l'occupation/activité –*e.g.* *Regarder la télévision* étant un loisir– des actions qu'ils désignent –*e.g.* *Regarder la télévision* signifiant l'observer–.

Dans les faits, les termes *activités* et *occupations* sont considérés étant interchangeable (pour décrire la participation aux passe-temps quotidiens) voire différents selon les spécialistes [Rol⁺14]. D'après l'association américaine d'Ergothérapie⁹ (AOTA), une définition liante serait : « l'*occupation* dénote les engagements de vie qui sont constitués de multiples *activités* » [Rol⁺14].

Dans cette thèse par **activité**, nous entendons la notion anglaise *activity*.

2.1.2.2 Décomposition de l'activité en actions

Selon l'organisation mondiale de la santé, une *activité* « désigne l'exécution d'une tâche par une personne » (2002) [Cha02], elle est « une suite structurée d'actions ou de tâches qui concourt aux occupations » [Mey13].

Réaliser une activité consiste ainsi à accomplir différentes étapes successivement ou en parallèle, dans des ordres différents voire avec des chronométrages¹⁰ différents [Mag⁺13]. En terme comportemental, ces étapes sont appelées **actions d'activité** [Kim⁺11]. Une action est ainsi le composant élémentaire d'une activité, pouvant être possiblement caractérisée par des contraintes temporelles¹⁰ quantitatives différentes [Mag⁺13]. Nous pouvons définir une *activité* étant un ensemble d'actions [Ber⁺08][Coo⁺15]. Par exemple, l'occupation *Faire sa toilette* est composée des activités *Prendre un bain*, *Se laver les mains*, *Se brosser les cheveux* etc. , elles-mêmes composées respectivement des actions *Ouvrir le robinet* de la baignoire ou du lavabo, *Prendre un peigne* dans la coiffeuse etc. ; cf. tableau A.1 pour une liste catégorisée d'occupations.

2.1.2.3 Pertinence vis-à-vis de l'activité de l'action

L'action permet de décrire de manière simplifiée le phénomène complexe qu'est l'activité, où des actions peuvent-être communes à plusieurs activités. Pour chaque action, nous qualifions leur pertinence vis-à-vis de chaque activité ; étant nulle si l'action n'intervient pas dans la réalisation de l'activité. Nous introduisons ainsi la *Précision des actions* afin de lier les actions aux activités d'intérêt.

Nous définissons la *Précision* de chaque action d'intérêt *a* au regard de l'activité *A* étant la probabilité de réaliser l'activité *A* sous conditions de réalisation de l'action *a*, notée $P(A | a)$; *e.g.* la probabilité de *Préparer un repas chaud* en ouvrant le réfrigérateur. Elle est considérée générale pour l'action, étant constante quelqu'en soit la mesure¹¹ *m* (et sa nature¹²) ; *e.g.* la probabilité de *Préparer un repas chaud* en ouvrant le réfrigérateur est identique quelque soit l'angle d'ouverture de la porte. Considérer que la *Précision* est dépendante de la mesure¹¹ *m* nécessite une étude poussée pour évaluer en chaque mesure¹¹ possible cette *Précision* $P(A | a, m)$; *e.g.* en toutes les positions possibles de visionnage pour l'activité *Regarder la Télévision* et son

⁹ angl. american occupational therapy association (AOTA) ¹⁰ angl. timing

¹¹ un élément donné de la région d'intérêt associée l'action, similaire à l'*Occurrence* en section 3.3.2.1

¹² caractéristique mesurée de l'action, cf. section 2.2.2

action éponyme.

Ainsi, nous pouvons décrire l'activité en la décomposant en actions, pouvant être communes à plusieurs activités. Afin de veiller aux activités, nous devons nous intéresser à l'action et déterminer les indicateurs utiles à mesurer et observables de manière automatisée.

2.2 L'action

Dans la pratique de l'Ergothérapie, il est nécessaire d'évaluer la réalisation de l'activité afin d'intervenir pour le bien de la personne. Cette évaluation est codifiée par de nombreux outils, dont l'OTPF et l'AMPS, pour être valide et robuste, permettant ainsi d'obtenir des informations fiables.

2.2.1 Outils d'Ergothérapie: l'évaluation valide et robuste des actions pour des informations fiables

Nous nous intéressons à deux outils utilisés dans la pratique de l'Ergothérapie : 1) l'OTPF, un cadre conceptuel de pratique en Ergothérapie [Rol⁺08][Rol⁺14] ; 2) l'AMPS, une échelle d'évaluation des habilités motrices et opératoires [Fis⁺13a][Fis⁺13b].

2.2.1.1 Cadre conceptuel de pratique en Ergothérapie : l'OTPF

Dans la littérature d'Ergothérapie, il existe de nombreux cadres conceptuels détaillés décrivant les actions. Le cadre conceptuel de pratique en Ergothérapie¹³ (OTPF) est certainement l'un des plus utilisés [Rol⁺08] : il synthétise les concepts interdépendants qui régissent les pratiques en Ergothérapie.

L'OTPF est un document officiel rédigé par l'association américaine d'Ergothérapie (AOTA), en constante évolution. Il est mis à jour par cycle de 5 ans, en collectant les retours des membres, spécialistes, auteurs, praticiens et autres acteurs en Ergothérapie. Cette révision bi-décennale garantit que l'OTPF est un document au fait des concepts émergents et des avancées en Ergothérapie. L'OTPF est actuellement à sa troisième édition (2014) [Rol⁺14] ; révision de la seconde édition (2008) [Rol⁺08].

Champ d'expertise : aspects nécessaires à l'analyse L'OTPF précise le champ d'expertise de l'Ergothérapie, nommé *domaine*, en décrivant l'ensemble des connaissances et savoir-faire de la profession dans : l'occupation, les caractéristiques individuelles, les habilités de réalisation, les schémas de réalisation, le contexte et l'environnement ; *cf.* tableau 2.2 et figure 2.1 [Rol⁺14].

L'*occupation* réfère aux activités du quotidien dans lesquelles les personnes s'engagent. Les *caractéristiques interindividuelles*¹⁴ réfèrent aux capacités, propriétés ou croyances spécifiques qui résident dans la personne et influencent la réalisation des activités. Les *habilités de réalisation*¹⁵ réfèrent aux actions à but précis notables, qui sont considérées comme un engagement élémentaire ; la plus petite unité d'engagement possible pour l'activité. Les *schémas de réalisation*¹⁶ réfèrent aux rôles, habitudes, routines et rituels effectifs qui peuvent soutenir ou gêner la réalisation de l'activité. L'*environnement* réfère à l'environnement physique et social, tandis que le *contexte*

13 *angl.* occupational therapy practice framework (OTPF) 14 *angl.* client factors 15 *angl.* performance skills
16 *angl.* performance patterns

OCCUPATIONS	CLIENT FACTORS	PERFORMANCE SKILLS	PERFORMANCE PATTERNS	CONTEXTS AND ENVIRONMENTS
Activities of daily living (ADLs)*	Values, beliefs, and spirituality	Motor skills	Habits	Cultural
Instrumental activities of daily living (IADLs)	Body functions	Process skills	Routines	Personal
Rest and sleep	Body structures	Social interaction skills	Rituals	Physical
Education			Roles	Social
Work				Temporal
Play				Virtual
Leisure				
Social participation				

*Also referred to as *basic activities of daily living (BADLs)* or *personal activities of daily living (PADLs)*.

FIGURE 2.2 – Aspects du champ d’expertise de l’Ergothérapie [Rol⁺14]

réfère aux autres éléments moins tangibles influençant la réalisation ; étant culturel, personnel temporel et virtuel.

La compréhension des relations complexes entre ces aspects, ainsi que des exigences de l’activité¹⁷ pour sa réalisation, sont requises afin d’analyser la réalisation de l’activité.

Analyse et évaluation des activités : exigences des activités D’après l’OTPF [Rol⁺14], *analyser l’activité* consiste à déterminer les fonctions corporelles et structurelles, les habilités et motifs requis, ainsi que les exigences génériques que l’activité demande à la personne. Les exigences des activités¹⁷ sont les caractéristiques spécifiques de l’activité qui influencent le type et la quantité des efforts requis pour sa réalisation. Ces exigences « contraignent le comportement de l’individu dans la réalisation de l’activité » [Mey13], elles incluent les points majeurs suivants :

- *les Outils et Ressources nécessaires à la réalisation de l’activité* : Quels objets pertinents sont utilisés dans l’activité ?
- *le Lieu de réalisation de l’activité* : Quels espaces physiques sont sollicités ?
- *le Processus de réalisation* : Comment l’activité est réalisée, comprenant séquence et minutage des étapes ainsi que les procédures et règles nécessaires ?

Une liste exhaustive des exigences est présentée en tableau A.2, avec leur définition et exemples ; nous en avons présenté certains, jugés pertinents pour la veille automatisée.

En connaissant ces préalables à la réalisation d’une activité, il est ainsi possible d’évaluer l’activité de manière fiable et valide. L’évaluation de la réalisation des activités nécessite l’utilisation de méthodes standardisées afin de fournir des données objectives sur les divers aspects *du domaine* ; recommandation de l’association américaine d’Ergothérapie (AOTA) [Rol⁺14]. L’AMPS en est une.

2.2.1.2 Évaluation des habilités motrices et opératoires : l’AMPS

L’évaluation des habilités motrices et opératoires¹⁸ (AMPS) est un outil d’évaluation qualitative et quantitative par observations comportementales directes, largement utilisé en Ergothérapie [Par⁺94].

L’AMPS fut développé afin d’évaluer des personnes en situation d’activités du quotidien : il est un outil standardisé et validé adressant la fiabilité des observations. Par conséquent, il

¹⁷ *angl.* activity demands ¹⁸ *angl.* assessment of motor and process skills (AMPS)

est utilisé afin de mesurer les déviations lors de la réalisation des activités [Par⁺94]. À sa 8ème version, il contient 125 activités du quotidien [Sol17], comprenant des activités de vie quotidienne (AVQ) et des activités instrumentales de vie quotidienne (AIVQ), qui sont autant d'exercices servant de support à l'ergothérapeute pour évaluer la personne. Cette version a été standardisée sur un échantillon international de plus de 196 000 personnes âgées de 2 à 100 ans et plus [Sol17].

Évaluation des activités : liste des éléments à observer Par définition, cette évaluation adresse la qualification précise des performances motrices¹⁹, opératoires²⁰ et adaptatives de la personne. Pour ce faire, l'AMPS propose, pour chaque activité listée, une description de 36 éléments à observer durant sa réalisation [Sol17], divisés seulement en deux catégories étant l'habileté motrice et l'habileté opératoire.

L'aspect *moteur* s'intéresse aux actions réalisées par la personne, afin de se déplacer ou déplacer des objets nécessaires ; l'aspect *opératoire* s'intéresse à l'organisation et au savoir-faire dans la réalisation des actions : leur séquence de réalisation et l'utilisation des objets nécessaires. La qualité de la performance est évaluée en notant l'effort, l'efficacité, la sécurité et l'indépendance démontrés par la personne dans chacune des habiletés opératoires et motrices.

Nous exploitons cette liste exhaustive afin d'identifier les caractéristiques communes des actions : ces caractéristiques constituent le cœur du *modèle des activités* proposé ci-dessous pour la conception du réseau de capteurs.

2.2.1.3 Des actions jusqu'alors mesurées par l'humain

En résumé, l'OTPF est un guide d'Ergothérapie, développant et définissant les divers concepts de la profession, structurant la pratique en trois étapes (*i.e.* Évaluation, Intervention et Résultat) afin d'améliorer santé, bien-être et implication quotidienne de la personne. L'AMPS est une échelle d'évaluation intervenant en fin de la première étape du travail de l'ergothérapeute.

Cependant, ces deux outils d'Ergothérapie préconisent quels éléments clés sont à observer par le thérapeute lors de la réalisation d'une activité ; l'AMPS les quantifiant [Sol17]. Nous remarquons que les habiletés motrices et opératoires sont communes aux deux outils ; *cf.* tableau A.3 en annexe. Cependant pour la veille automatisée, nous souhaitons des caractéristiques aisément **observables par capteurs, simples et objectives** ne nécessitant pas d'interprétations cliniques. Ces caractéristiques sont primordiales et prioritaires pour promouvoir et déployer largement les systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile.

Par exemple, l'habileté motrice *Soulever*²¹ est définie étant le fait de (sou)lever efficacement des objets pertinents *sans aucune manifestation d'effort accru* [Rol⁺14] : l'ergothérapeute interprète soit la dynamique du mouvement de la personne, soit les expressions corporelles (*e.g.* faciales) pour juger de l'intensité de l'effort déployé par la personne. Un autre exemple d'interprétation forte, l'habileté opératoire *Utiliser*²¹ est définie étant le fait d'utiliser un objet et un matériel *comme conçu/prévu et de manière hygiénique* [Rol⁺14] : l'ergothérapeute interprète les interactions avec l'objet pour juger de son utilisation correcte.

Nous remarquons que la plupart des habiletés, quelles qu'elles soient, sont fortement sujettes à l'interprétation de l'ergothérapeute. De fait, toutes ces habiletés et leurs éléments sont subtils à évaluer par l'ergothérapeute et de surcroît complexes par des capteurs. En réalité, les recherches menées en Ergothérapie accordent une importance prépondérante au thérapeute, résultant à déterminer des indicateurs utiles mesurables par l'humain. L'humain est ainsi un instrument

19 *angl.* motor 20 *angl.* process 21 *cf.* tableau A.2 en annexe

de mesures, comparable à un capteur, utilisé pour l'évaluation des activités (*i.e.* les habilités). Par nature, les données mesurées par le capteur humain sont subjectives, tant elles dépendent de l'interprétation et de l'appréciation de l'humain. En conséquence, l'Ergothérapie effectue un travail constant de standardisation au sein de leur communauté « afin de fournir des données objectives » [Rol⁺14] : établir des outils d'évaluation *robustes* à l'humain et *valides* pour chacun afin d'obtenir des informations *fiabes*. Le cadre OTPF et l'échelle AMPS fournissent ainsi des indicateurs les plus objectifs possibles pour l'humain.

Or, cette exclusivité du « capteur humain » a conduit à déconsidérer des indicateurs pertinents car difficilement mesurables par l'humain. D'une part, nous pouvons envisager, grâce à l'essor en technologie d'acquisition (capteurs) et en puissance de calcul (processeurs) [De⁺12], la recherche et le développement de nouveaux indicateurs plus *objectifs* et plus *fiabes*. D'autre part, nous devons considérer de concevoir une méthodologie de placement de capteurs **flexibles** pouvant s'adapter à de nouveaux indicateurs (par son modèle), anticipant dès à présent les avancées scientifiques en Ergothérapie et l'essor technologique.

Ainsi, il est nécessaire de caractériser l'action de sorte à pouvoir instrumenter la mesure par des capteurs (non-humains). Nous nous concentrons sur des éléments plus génériques, inhérents aux habilités et liés aux exigences d'activité. Nous en extrayons trois caractéristiques majeures décrivant l'activité et constituant des indicateurs utiles pour la mesurer par des capteurs.

2.2.2 Caractéristiques des actions

Ces caractéristiques sont présentes quelle que soit l'action d'activité, étant : l'**interaction**, le **lieu** et la **temporalité**²². Chaque action implique ainsi une interaction de la personne avec son environnement (*e.g.* mobilier, objet) dans un lieu de son environnement avec une temporalité. Par exemple, l'action *S'asseoir à table* pour l'activité *Prendre un repas* implique d'**interagir** avec une assise (*e.g.* une chaise) d'**être situé** à côté de la table **lors des heures** de repas. Autrement, l'action *Regarder la télévision* pour l'activité *Regarder la télévision* implique d'**interagir** avec la télévision (*e.g.* la regarder ou l'entendre) d'**être situé** dans son champ d'émission (*e.g.* le canapé) **lors des heures** de visionnage.

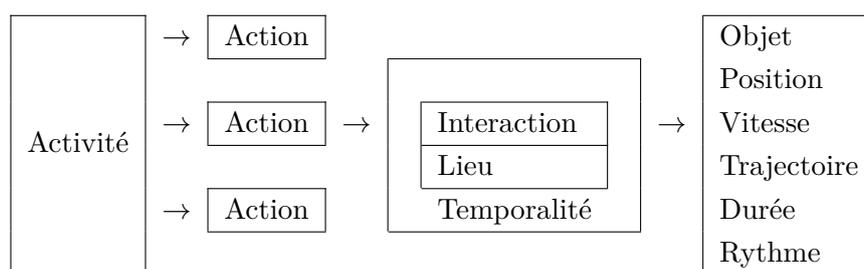


FIGURE 2.3 – Modèle d'activité en actions, décrivant les caractéristiques de l'action et présentant des informations potentielles

Ces caractéristiques permettent aux systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile d'obtenir des informations sensorielles utiles ; *cf.* figure 2.3. Nous les décrivons et les contextualisons dans ce cadre. Elles constituent une contribution forte à la description des actions en vue de l'automatisation de l'observation des actions d'activité (*i.e.* la veille à la personne), où l'identification de l'action est possible par ces caractéristiques évaluées afin de la différencier.

²² *angl. resp.* interaction, location, temporality

2.2.2.1 Interaction

Réaliser une activité implique d'interagir avec des objets ; qu'il s'agisse du mobilier (*e.g.* porte, tiroir, chaise, lit) ou d'objets électriques (*e.g.* télévision, four, luminaire) voire d'autres objets (*e.g.* robinet, crayon, semainier médical).

Dans le cadre des systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile, le mobilier de l'environnement est généralement équipé de capteurs tout-ou-rien [Ras⁺13][Gok⁺13][dMig⁺13] ; *e.g.* sur le tiroir des couverts ou la porte du frigo pour détecter la préparation des repas, sur le placard des vêtements pour détecter l'habillage. Parfois, les dispositifs de l'environnement sont équipés de capteurs de consommation électrique [Gup⁺10] ou hydraulique [Fro⁺09] ; *e.g.* sur l'alimentation particulière²³ ou générale²⁴ pour détecter la préparation des repas (four ou évier), la toilette (sèche-cheveux ou lavabo) voire le visionnage de la télévision.

Bien que la mesure de l'interaction de la personne avec un objet est la manière la plus fiable pour déterminer la réalisation d'une action, en général, les objets ne sont pas directement instrumentés étant entravés par la faisabilité, le coût financier voire la commodité d'utilisation. Par exemple, les aliments (la nourriture) ne sont pas instrumentables contrairement à leur contenant ; instrumenter l'ouverture/fermeture de tous les tiroirs (des commodes) est coûteux, et porter un gant lecteur de puces RFID²⁵ est gênant, voire encombrant.

Ainsi, l'interaction est souvent mesurée indirectement voire déduite : *e.g.* des capteurs de portes pour détecter la préparation des repas (frigo ou tiroir) ou l'habillage (placard ou commode), des capteurs de pression pour détecter le sommeil (lit) ou la prise de repas (chaise). La mesure indirecte n'est pas une information **fiable** concernant la réalisation de l'action et de surcroît de l'activité ; *i.e.* l'ouverture du frigo ou la consommation en eau n'implique pas nécessairement la préparation d'un repas (activité) : l'utilisation du frigo ou du robinet peut servir à se *servir une boisson* (action) et non à la *prise de nourriture* ou respectivement au *rinçage de nourriture* (actions). Ces informations nécessitent d'être associées à d'autres afin d'améliorer la reconnaissance.

2.2.2.2 Lieu

Réaliser une action implique souvent de se situer dans un lieu précis, qu'il s'agisse d'être dans une pièce (*i.e.* toilette, chambre d'habillage), à proximité du mobilier (*e.g.* table, armoire) ou d'objets (*e.g.* four, miroir), voire sur (*e.g.* canapé, chaise) ou dans (*e.g.* lit, douche) le mobilier ou objet.

Dans le cadre des systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile, l'environnement est généralement équipé de capteurs de présence ou de localisation [Ras⁺13][Gok⁺13][dMig⁺13] ; *e.g.* dans les toilettes pour détecter la continence, au dessus de la table pour détecter la prise de repas. Parfois, l'environnement est équipé de microphones [Fle⁺10] ou caméras [Sku⁺09].

Par lieu de réalisation de l'action, nous désignons généralement une région de l'environnement plutôt qu'une position précise ; *e.g.* dans la chambre pour dormir, autour de la table pour manger, sur les toilettes pour faire ses besoins. Chaque lieu (soit une région de l'environnement) est définie selon les paramètres anthropométriques de la personne, si une position permet physiquement la réalisation de l'action ; *e.g.* être à une distance minimale afin de pouvoir ouvrir le frigo, manger à table, ou dormir dans le lit.

Par ailleurs, pour une action similaire, le lieu de réalisation peut varier selon les personnes²⁶,

²³ un wattmètre au niveau de la prise électrique ²⁴ un wattmètre au niveau du compteur électrique [Gup⁺10]
²⁵ les objets étant équipés d'étiquettes RFID [Phi⁺04] ²⁶ inter-personnel

voire varier pour la personne²⁷ ; *e.g.* une personne préférera s'habiller à son chevalet alors qu'une autre s'habillera devant son placard, la personne préférera déjeuner en cuisine et dîner dans le séjour. Ainsi selon l'action, le lieu permet de fournir des informations précises pour déterminer sa réalisation : *e.g.* la position du frigo ou lit est immuable tandis que la position de tables ou chaises est variable.

2.2.2.3 Temporalité

Réaliser une activité implique une temporalité à sa réalisation : une organisation variant au gré des attentes et contraintes des personnes [Kay⁺11]. Toutes les autres caractéristiques de l'action sont englobées dans cette temporalité. L'identification d'action serait difficile en ne considérant uniquement la temporalité, où l'action serait supposée réalisée sans avoir d'informations capteurs résultantes. Une information d'interaction ou de lieu –possiblement adjoint à une temporalité– est nécessaire pour l'identification. Les deux aspects principaux de la temporalité sont : la durée et le rythme.

Durée réfère au temps requis afin de réaliser l'action. Bien que variant selon les personnes, il est possible d'encadrer cette durée par un minimum et maximum : *e.g.*]0 ; 2] min.

Rythme ou la répétition périodique de l'action réfère à la fois au rythme biologique et au rythme social [Vir⁺02] :

1. le *rythme biologique* est physiologique (rythme veille-sommeil, cardiaque, respiratoire) : ces rythmes influent sur la mémoire, l'attention, la capacité voire la concentration agissant par conséquence sur la réalisation de l'action ; *e.g.* la fatigue ralentissant la performance, le sommeil incapacitant la réalisation.
2. le *rythme social* est assujéti aux exigences sociales (travail, éducation, culture) : ces exigences sont des contraintes agissant sur l'initiation de l'action ; *e.g.* heure de réveil, durée des repas.

Ces rythmes sont interdépendants et ne peuvent être ignorés pour la veille quotidienne [Vir⁺02]. Dans la littérature, cette dualité du rythme est étudiée sur une journée, étant qualifiée ainsi de rythme circadien des activités (RCA). Les rythmes sont représentés par un graphique *circadien* figure 2.4, dont l'analyse permet d'estimer l'organisation des activités au cours de la journée [Car⁺14].

De plus, ces rythmes se renforcent avec l'âge, dénotant la nature très routinisée des personnes âgées dans leur quotidien : leur vie quotidienne est organisée autour de routines fixes dans leur environnement, comportement ou relations sociales. De par leur nature, ces rythmes sont largement utilisés pour la veille à la personne [Kay⁺11][Wan⁺12].

Bien que les habilités sont des indicateurs utiles et très précis pour une évaluation valide et robuste de l'activité (par l'humain), il était nécessaire de *modéliser l'activité* et de *caractériser l'action* en contexte, prenant en compte l'état actuel des technologies d'acquisition et informatiques.

²⁷ intra-personnel

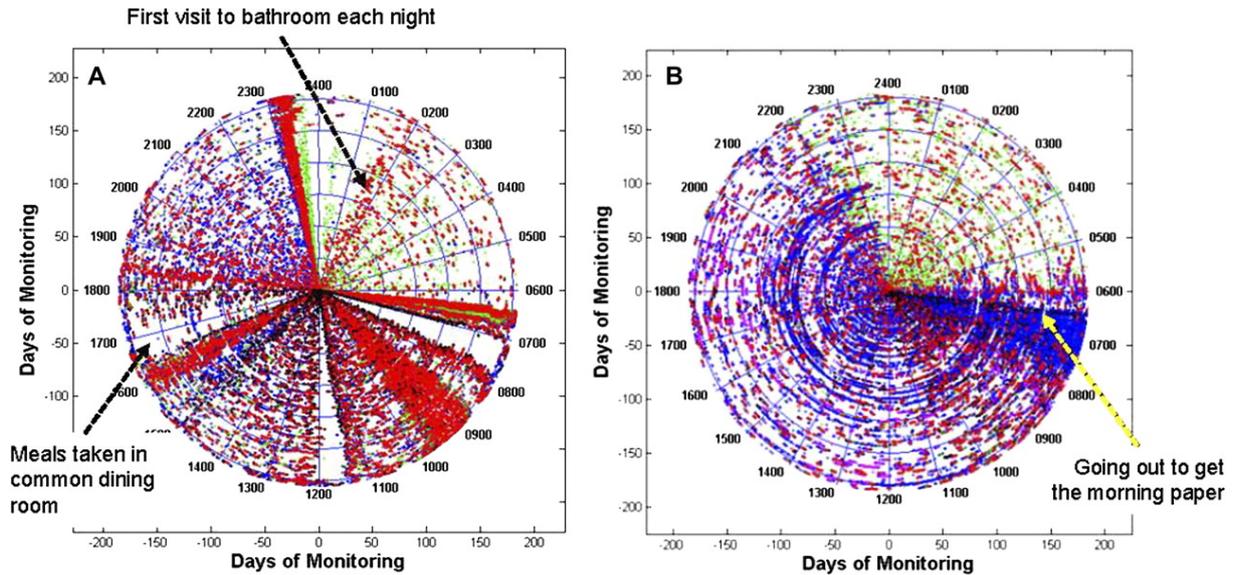


FIGURE 2.4 – Illustration du rythme circadien de deux personnes ; chaque jour d'activité forme un cercle concentrique, chaque couleur représente un capteur différent [Kay⁺11]

2.3 Application du modèle d'activité aux systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile

Nous discutons de l'application du modèle d'activité développé au contexte des systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile et du placement de capteurs. Dans le tableau 2.1, nous décrivons pour l'activité *Préparer un repas chaud* le processus de veille automatisée de manière simplifiée.

Comportement Humain		Indicateurs Utiles				Réseau de Capteurs		Système de Veille	
		Interaction	Lieu	Moment	Durée	Interaction	Lieu	État ou Évènement	Horloge
Préparer un repas chaud	Prendre des ingrédients	Ouvrir/Fermer le Réfrigérateur	Être devant le Réfrigérateur	[12:00 ; 12:30]]0 ; 2] min	Réfrigérateur ouvert/fermé	Présence devant le Réfrigérateur	Réfrigérateur utilisé	Durée ou Moment de l'État ou Évènement
	Prendre des couverts	Ouvrir/Fermer le Placard	Être devant le Placard	[12:00 ; 12:30]	]0 ; 2] min	Placard ouvert/fermé	Présence devant le placard	Placard utilisé
	Découper et Préparer	Utiliser divers ustensiles avec les ingrédients	Être dans la Cuisine	[12:00 ; 12:30]	[1 ; 30] min	-	Présence dans la Cuisine	Cuisine utilisée	
	Chauder la préparation	Utiliser les Plaques chauffantes pour chauffer la préparation	Être devant les Plaques	[12:15 ; 12:45]	]5 ; 30] min	Plaques chauffantes allumées	Présence devant les Plaques chauffantes	Plaques chauffantes utilisées
	Servir dans des plats	Disposer la préparation dans des plats	Être devant la Table	[12:30 ; 13:00]	]0 ; 5] min	-	Présence devant la Table	Table utilisée

TABLE 2.1 – Exemple simplifié de la veille pour l'activité : Préparer un repas chaud

2.3.1 Processus de veille

Le processus de veille à l'activité proposé en tableau 2.1 décrit les étapes nécessaires pour concevoir la veille automatisée de l'activité humaine au module de reconnaissance. Il est organisé en quatre grandes étapes :

1. *Comportement humain*, référant à l'activité et à sa description en actions ;
2. *Indicateurs utiles*, référant aux indicateurs choisis pour caractériser chaque action, étant : l'interaction, le lieu et la temporalité (moment et durée) ;
3. *Réseau de capteurs*, référant aux informations sensorielles acquises par les capteurs ;
4. *Système de veille*, référant aux informations traitées par le module de reconnaissance d'activité.

À chaque étape, l'activité est précisée voire réduite afin d'être simplifiée pour être identifiable. En premier, l'expert en comportement humain analyse l'activité afin de la décomposer en actions : il précise l'activité en la décrivant. Ensuite, il caractérise chaque action afin de la définir généralement : il réduit chaque action à seulement quatre indicateurs, perdant toutes les habilités utiles à la qualification et réalisation de l'action. Cette deuxième étape permet de résumer l'activité en des informations observables par capteurs, simples et objectives.

En troisième, un expert en instrumentation analyse ces caractéristiques afin de déterminer les informations capteurs adaptées : il réduit chaque indicateur à des quantités/mesures au préalable de l'instrumentation. Enfin, il lie chaque état (voire événement) de capteurs à une interprétation d'utilisation (ou d'action) : il associe chaque état à des actions possibles réalisées. Cette dernière étape nécessite la mise en place d'un module de reconnaissance qui à partir des états des capteurs (et de leur lien possible avec les actions) reconnaîtra l'activité.

2.3.1.1 Des simplifications à chaque étape : une frontière entre la réalité comportementale et sensorielle

Qu'il s'agisse d'un apprentissage par les données ou par l'expérience, la reconnaissance d'activité doit à partir d'une connaissance/vision incomplète de l'environnement reconnaître un comportement si complexe et précis qu'est l'activité. Qu'il s'agisse des capacités d'analyse du système de veille, des capacités d'acquisition du réseau de capteurs, ou de la caractérisation des actions voire de leur exhaustivité, la veille à la personne est fortement contrainte et ardue à automatiser tant les étapes de simplification sont nombreuses et nécessaires.

Au niveau du réseau de capteurs, il existe une étape cruciale du processus de veille et forte de conséquence : une frontière entre la réalité comportementale (activité, action) et la réalité sensorielle (prise de mesure automatisée) où l'acquisition par capteurs des indicateurs dans leur complexité est difficile. Dans notre exemple en tableau 2.1, nos indicateurs utiles sont simplifiés et préformatés afin d'être aisément instrumentables. Or, chaque action peut-être décrite en indicateurs plus complexes (*e.g.* avoir un ingrédient en main) mais plus précis (où les ouvertures non-pertinentes sont écartées). Cependant, les capteurs et ressources logicielles nécessaires à la reconnaissance de ces indicateurs constituent un frein à l'acceptation des personnes de la technologie d'assistance (*e.g.* intrusivité et invasivité) ; *cf.* introduction 1.1.2. Étant donné les contraintes²⁸ imposées et légitimes par les personnes au système d'assistance à l'autonomie à domicile, il est nécessaire d'utiliser des capteurs spécifiques afin de concevoir un réseau non-

²⁸ l'intimité et la confidentialité des personnes est la principale critique à l'égard des systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile [Cai⁺05][Cha⁺09][Dem09][Din⁺11] : le réseau de capteurs doit être discret et accepté par la personne [Cha⁺09]

intrusif, non-invasif et non-porté. Par conséquent, le franchissement cette frontière nécessite une simplification en amont des indicateurs utiles afin d'être en accord avec les exigences des personnes en terme de confiance et d'acceptabilité. En passant du cadre théorique au réel –symbolisé par cette frontière–, nous devons adapter la veille au monde sensible, à ce qui est possible de faire technologiquement mais surtout humainement.

Ainsi, au préalable de l'instrumentation, sa conception –particulièrement le choix des informations à capter, à partir des indicateurs utiles– est une étape cruciale du processus de veille automatisée, tant elle impose une perte d'informations –due aux informations choisies– qu'elle impose les informations utilisées –due aux capteurs possibles, choisis et positionnés– par le module de reconnaissance d'activité. Elle incite l'expert en comportement à simplifier les actions (étape 2) en amont, et elle diminue la qualité des informations captées (étape 3) et fournies (étape 4) en aval.

2.3.1.2 Discussion

Nous considérerons que le système de veille ramène/simplifie les informations d'*interaction* et de *lieu* à une information (état ou événement) d'*utilisation* de l'objet. Dans notre cadre²⁹, ces deux caractéristiques de l'action ne sont pas nécessairement toutes deux acquises par le réseau de capteurs : l'une pouvant être plus *précise* ou *sensible* que l'autre sur l'utilisation de l'objet –ou des objets– de l'action ; cf. section 2.3.3.3. Par exemple, pour l'action *S'asseoir à table* l'instrumentation du lieu autour de la table est plus intéressante que celle de chaque assise. Autrement, pour l'action *Regarder la télévision* l'instrumentation de la télévision est plus intéressante que celle du lieu de visionnage.

En réalité, l'automatisation de la veille à la personne nécessite une spécification détaillée des activités du quotidien afin de lier les observations capteurs (bas niveau) et les concepts (haut niveau) requis pour la reconnaissance d'activité humaine [Mag⁺13]. La reconnaissance d'activité est le problème d'identifier si une séquence d'observations issues d'un environnement instrumenté peut-être interprétée étant l'empreinte d'un ensemble d'actions et d'activité réalisée par la même personne [Mag⁺13]. Par conséquent, la reconnaissance d'activité nécessite fortement des observations capteurs utiles, fiables et précises afin de reconnaître l'activité à partir de leurs séquences et temporalités. Ces observations dépendent du réseau de capteurs installé au domicile de la personne.

Le réseau de capteurs est conçu spécialement pour un environnement donné (*i.e.* domicile) et conformément aux préférences de la personne : le réseau de capteurs doit être discret et accepté par la personne [Cha⁺09]. L'acquisition de toutes les caractéristiques de chaque action impose un coût financier supplémentaire et des capteurs supplémentaires voire différents, pouvant entraîner des sentiments d'invasité et d'intrusivité pour la personne. Garantir l'acquisition de toutes les caractéristiques –certes optimale pour la reconnaissance– implique de sacrifier notre objectif de veille abordable et acceptable. Il est nécessaire de réaliser des **compromis**.

Ainsi, à la lumière du processus de veille et des enjeux de la conception, nous adaptons le modèle d'activité aux contraintes du réseau de capteurs.

2.3.2 Adaptation du modèle à la conception : caractéristiques écartées

De fait, les systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile sont contraints par les technologies d'acquisition employées. À dessein de conception, nous formulons deux postulats : 1) les

²⁹ des systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile et du placement de capteurs

spécificités inter-individuelles sont déterminées en amont par l'expert en comportement humain ; 2) la temporalité est négligeable, gérée en aval par le module de reconnaissance d'activité.

2.3.2.1 Variabilité inter-individuelle

Personne ne réalise les activités de la même manière. La réalisation d'une activité varie selon les personnes et la personne : une même personne ne réalise pas une même activité voire une action toujours de la même manière. Ces variabilités inter-individuelles, intrinsèques à la personne et à son environnement, sont dépendantes de plusieurs caractéristiques : sa masse, sa vitesse de marche, son état cognitif (*e.g.* attention, mémoire), son état émotionnel, son état physiologique (*e.g.* stress, dette de sommeil), son état psychique (*e.g.* anxiété, charge de travail), sa fatigue, *etc.*

Afin de considérer ces caractéristiques innombrables, nous posons qu'elles sont des paramètres (en amont) de la conception. Ils influent sur les indicateurs utiles, par exemple : en modifiant l'étendu de la région d'interaction pour le lieu, ou en changeant l'objet pertinent pour l'interaction, voire en augmentant la durée bornée de réalisation pour la temporalité.

2.3.2.2 Temporalité : inutile pour un réseau statique

Un réseau de capteurs fournit des informations hétérogènes en continu sur l'état de ses capteurs, appelé mesure. Ces informations capteurs sont exclusivement liées à l'espace physique (*i.e.* interaction, lieu), et elles sont envoyées voire enregistrées informatiquement (dans un historique). La temporalité (moment et durée) attire au système informatique (*i.e.* module de reconnaissance d'activité) utilisé en aval : elle est importante pour la reconnaissance d'activité.

Dans notre présent travail, nous considérons uniquement des capteurs statiques pour notre conception (*e.g.* capteurs infrarouges passifs, contacteurs), et nous excluons les capteurs portés par la personne (*e.g.* bracelet accéléromètre [Lom⁺09], étiquette RFID [Azg⁺15]). Ainsi, les aspects temporels ne relèvent pas du champ d'étude du présent travail. Nous nous intéressons à concevoir un réseau de capteurs opérant quelle que soit la temporalité, dont le placement est invariant temporellement.

Après avoir défini notre modèle d'activité pour la veille automatisée à la personne, nous nous intéressons à la conception de l'instrumentation et à son processus, au travers d'exemples.

2.3.3 Conception de l'instrumentation : exemple et discussion

La conception de l'instrumentation est un préalable à l'installation, où il est nécessaire de bien concevoir le réseau de capteurs : choisir judicieusement les instruments de mesures (capteurs) à installer et leur configuration. Afin d'étudier la conception, nous considérons le plan d'un appartement normé, qui décrit la disposition des murs et les positions des objets³⁰ dans l'espace ; illustré en figure 2.5. La considération d'un plan normé permet de disposer des contraintes architecturales d'aménagement et des mesures des espaces de vie, afin de mieux situer les activités au sein du domicile standardisé.

L'appartement fut conçu selon les réglementations architecturales en vigueur depuis 2007, concernant l'accessibilité des personnes à mobilité réduite aux bâtiments construits ou rénovés accueillant du public ou servant d'habitation [Min⁺07]. L'appartement est un deux pièces (Type

30 aménagement réalisé par Mailys Pointreau



FIGURE 2.5 – Illustration 3D en vue aérienne de l'appartement³⁰

2), composé de : une salle d'eau, des toilettes séparées, un couloir, une terrasse, une chambre et un séjour comprenant la cuisine, le salon et la salle à manger. Il occupe une surface totale de 62,5 m² pour un séjour de 40 m².

En figure 2.6, nous illustrons la cuisine (figure 2.6a) ouverte dans le séjour (figure 2.6b). Nous dénotons que l'appartement (virtuel) est aménagé³⁰ avec du mobilier et des objets du quotidien à dessein de réalisme. Cet aménagement sert de support à notre travail afin de réfléchir et d'anticiper l'instrumentation d'objets ou de lieux.

En nous fondant sur l'OTPF et sur l'AMPS, nous discutons sur les difficultés de l'instrumentation.



(a) Cuisine



(b) Séjour

FIGURE 2.6 – Illustration 3D intérieure de l'appartement³⁰

2.3.3.1 Le réseau de capteur : l'instrument pour mesurer l'action

L'instrumentation du domicile est le fait de concevoir et d'installer un réseau de capteurs au sein d'un environnement intérieur, où le réseau de capteurs est un instrument conçu pour y mesurer les actions d'activité. Il est nécessaire de comprendre les notions de *mesure* et d'*instrument* afin de réussir la conception du réseau de capteurs, soit l'instrumentation de l'environnement.

Mesurer est le fait d'associer une valeur numérique à une quantité. La mesure est souvent associée à la notion de *dimension*, où mesurer signifie déterminer la longueur (0D), l'aire (2D), le volume (3D) *etc.* d'une entité, bien que la mesure puisse s'adresser à des phénomènes/propriétés plus abstraites [Kim⁺08] ; *e.g.* qualité de vie, adhésion des patients.

La Théorie des Mesures est le domaine des mathématiques qui étudie cette notion de *mesure* : elle repose sur l'Algèbre et la Théorie des Ensembles [Bog07]. Par définition, une *mesure* est effectuée sur un ensemble [Tao11] : elle qualifie par une valeur numérique non-négative la quantité associée à cet ensemble, pouvant être l'union de plusieurs sous-ensembles³¹ ; l'ensemble vide étant à mesure nulle.

L'instrument de mesure Il est nécessaire d'utiliser voire de concevoir un instrument pour mesurer des grandeurs physiques (*e.g.* distance, température, intensité lumineuse), des caractéristiques psychologiques (*e.g.* état cognitif, fatigue, stress) *etc.* L'instrument de mesure effectue un **test** afin de quantifier un phénomène d'après une référence étalon ou absolue : sa qualité est liée à la *validité* et la *fiabilité* des mesures [Kim⁺08].

La **Validité** qualifie le « degré dans lequel les interprétations des résultats d'un test sont garantis, dépendant de l'utilisation prévue du test soit la mesure de concepts sous-jacents » ; *e.g.* l'action d'activité. Elle n'est pas une propriété intrinsèque du test, où l'action est testée/définie à partir –d'une combinaison– de mesures du réseau de capteurs. Par conséquent, la validité du réseau de capteurs dépend de la *bonne* modélisation des activités et représentation des actions (*i.e.* caractéristiques, quantification).

La **Fiabilité** qualifie le « degré dans lequel les incertitudes des résultats d'un test sont garantis, dépendant de la stabilité des mesures du test » ; *e.g.* l'identification de l'action. Elle est une propriété intrinsèque du test, où toute valeur obtenue par un instrument de mesure est constituée de la *vrai* valeur, qui est inconnue, et de l'*erreur* du processus de mesure. Généralement, la fiabilité est exprimée par une valeur comprise entre 0 et 1.

Ainsi, la conception et la validation d'un instrument de mesure consiste principalement à **réduire les erreurs lors du processus de mesure**³². Il est nécessaire d'identifier les sources d'erreurs voire de quantifier leurs effets afin d'en améliorer la qualité.

Concevoir un réseau de capteurs pour mesurer l'action Un capteur permet de réaliser automatiquement des mesures –en continu– et de les transmettre électroniquement. Le réseau de capteurs est un instrument de mesure particulier, qui s'appuie sur plusieurs capteurs travaillant de concert. Sa conception pour la veille automatisée consiste à créer un instrument complexe pour mesurer l'action (propriété abstraite) en captant ses caractéristiques (phénomène physique).

Pour l'identification, la réalisation de l'action est décrite par une expression logique de

³¹ propriété d'additivité des mesures

³² *e.g.* mesure de l'action (propriété abstraite), de la distance (grandeur physique), de l'état cognitif (caractéristique psychologique)

mesures capteurs, s'agissant respectivement du phénomène à quantifier et du test à passer. La référence absolue de notre test sont les régions d'intérêt³³, modélisant les actions et leurs caractéristiques. La qualité du test et sa définition sont inhérentes au réseau de capteurs et à ses régions de couverture³³, dépendantes de nos choix et aux configurations des capteurs : le placement de capteurs.

Pour représenter actions (*i.e.* région d'intérêt) et capteurs (*i.e.* région de couverture), nous développons un modèle des régions en chapitre 3. Par conséquent, la *validité* du réseau de capteurs est inhérente –certes à notre modèle des activités ci-présenté (permettant de définir et de décrire celles-ci) mais– surtout à leur transcription/quantification dans le modèle des régions. De plus, la *fiabilité* du réseau de capteurs est inhérente à l'évaluation³⁴ du modèle des régions, où le test de la réalisation de l'action est défini automatiquement³⁵ à partir du placement de capteurs et par maximisation d'une quantification de sa fiabilité pour l'action. Par ailleurs, l'*incertitude* de mesure est inhérente à une valeur particulière de mesure ; cependant cette évaluation³⁶ peut améliorer indirectement la fiabilité du test : sa définition à partir des informations captées.

Ainsi, concevoir un réseau de capteurs pour mesurer l'action c'est s'intéresser à la validité et à la fiabilité du placement de capteurs, voire à l'incertitude de mesure. Nous abordons l'aspect évaluation –fiabilité et incertitude– dans les chapitres 4 et 6, préférant nous concentrer dans l'immédiat sur l'aspect validité et sur la difficulté d'instrumenter avec des capteurs les actions et leurs caractéristiques.

2.3.3.2 Une instrumentation ardue voire impossible

Par définition, une action est caractérisée soit par une interaction avec un objet, soit par une présence dans une région. Théoriquement pour chaque action, nous pouvons instrumenter chaque caractéristique par des capteurs dédiés. Par exemple, pour l'activité *Préparer un repas* et son action *Chauffer la préparation* avec les plaques chauffantes : nous pouvons soit instrumenter les plaques chauffantes directement par un capteur d'état, soit instrumenter la région où la personne interagit avec les plaques par des capteurs de présence.

Dans certains cas, nous ne pouvons instrumenter raisonnablement une des caractéristiques de l'action. Pour l'activité *Prendre un repas* et son action *S'asseoir à table* : nous pouvons soit difficilement instrumenter chaque chaise, soit aisément instrumenter le lieu autour de la table où ces objets seront disposés. Pour l'activité de loisir *Regarder la télévision* et son action *Regarder la télévision* (où regarder signifie observer) : nous pouvons soit aisément instrumenter la télévision directement par un capteur d'état, soit difficilement instrumenter tous les lieux possibles de visionnage ; la personne devant être en vue directe de la télévision pour l'observer. Concernant, l'activité *Préparer un repas* et son action *Découper et Préparer* : nous ne pouvons pas instrumenter tous les ustensiles de cuisine, seulement la région où la personne prépare/travaille (habituellement) ses ingrédients ; *e.g.* un plan de travail ou une table.

Dans d'autres cas, nous ne pouvons instrumenter les caractéristiques de l'action et nous devons utiliser des *stratagèmes* de mesures indirectes (déductives). Pour l'activité *Préparer un repas* et son action *Prendre des ingrédients* dans le réfrigérateur : nous pouvons soit instrumenter la région où la personne interagit avec le réfrigérateur par des capteurs de présence, soit instrumenter sa porte par un capteur binaire. Bien que l'action concerne les ingrédients dans sa définition, nous mesurons indirectement cette interaction de la personne avec les ingrédients. À ce jour, il est difficile d'instrumenter tous les ingrédients ou leur contenant, voire d'identifier tous les

³³ cf. chapitre 3 ³⁴ cf. chapitre 4 ³⁵ inhérent à notre méthodologie afin d'améliorer la qualité du réseau de capteurs ; cf. chapitres 3 et 4 ³⁶ cf. chapitre 6

ingrédients utilisés ; *e.g.* par lecture de puce RFID [Phi⁺04], ou par reconnaissance visuelle [Haz16]. Pour l'activité *Entretenir ses lunettes* et son action *Nettoyer ses lunettes* : nous pouvons soit instrumenter par des capteurs de présence la région, soit instrumenter par un capteur binaire l'éventuelle porte de tiroir/placard, où la personne range ses outils d'entretien.

2.3.3.3 Fiabilité de l'instrumentation : Précision et Sensibilité des mesures

L'inconvénient de ces *stratagèmes* est leur fiabilité à bien mesurer l'action, étant une source d'erreurs pour l'instrument de mesure qu'est le réseau de capteurs ; *cf.* section 2.3.3.1. Il s'agit de leur :

1. **Précision** : Pour toutes les actions réalisées où ces informations sensorielles interviennent, quelle est la proportion concernant l'action d'intérêt ? Avons-nous choisi des informations sensorielles trop larges pour possiblement identifier la réalisation de l'action d'intérêt ?
2. **Sensibilité** : Pour les informations sensorielles considérées, quelle est la proportion d'actions non-concernées ? Avons-nous considéré assez d'informations capteurs pour possiblement acquérir toutes les déclinaisons de réalisation de l'action d'intérêt ?

Intuitivement, dans notre exemple précédent de l'action *Chauffer la préparation* de l'activité *Préparer un repas*, nous pouvons statuer que la réalisation de l'action est plus vraisemblable lorsque nous obtenons une mesure³⁷ par la première instrumentation (*i.e.* capteur d'état) contrairement par la seconde (*i.e.* capteur de présence). Nous définissons ainsi une probabilité de réalisation de l'action sachant la mesure³⁷ et l'instrumentation, concernant la **précision** : $P(\text{action} \mid \text{mesure})$.

Similairement, dans notre exemple précédent de l'action *S'asseoir à table* de l'activité *Prendre un repas*, nous pouvons statuer que l'instrumentation directe peut faillir à être présente sur toutes les assises (*e.g.* tabouret, chaise oubliée) contrairement à celle du lieu autour de la table n'en oubliant aucune. La réalisation de l'action est ainsi plus vraisemblablement observée lorsque nous obtenons une mesure³⁷ par la seconde instrumentation (*i.e.* capteur de présence) contrairement par la première (*i.e.* capteurs de pression), concernant la **sensibilité** : $P(\text{mesure} \mid \text{action})$.

Par ailleurs, l'action n'est pas toujours réalisée de la même manière par une même personne ; *i.e.* la variabilité inter-individuelle, *cf.* section 2.3.2.1. Diverses informations sensorielles peuvent être nécessaires pour pouvoir identifier (Sensibilité), certaines étant plus adéquates (Précision). Ainsi, une instrumentation fiable vise à assurer l'identification de l'action.

2.3.3.4 Conception de l'instrumentation : choix des informations et placement des capteurs

Dans le cadre de cette thèse, nous ne nous intéressons pas aux méthodes d'instrumentation ou stratagèmes pour déterminer les indicateurs utiles à capter. Les indicateurs utiles sont considérés préalablement donnés, étant chacun préalablement lié à une caractéristique voire une action. Nous nous concentrons uniquement sur la conception du réseau de capteurs et à son évaluation (fiabilité ou incertitude des indicateurs utiles captés). La conception est composée de deux étapes :

- Choix des informations à capter, à partir d'indicateurs utiles de l'action
- Placement des capteurs, à partir des informations capteurs choisies

³⁷ où la mesure correspond à l'indicateur utile retenu et la caractéristique qu'il représente

Nous définissons le placement de capteurs étant *le processus de choisir et de configurer (position et orientation) les capteurs afin d'acquérir au mieux les informations capteurs préalablement désignées*. Dans cette seconde étape, fiabilité et incertitude se qualifient au regard des capteurs choisis et configurés (positionnés et orientés), et des informations captées d'intérêt. La fiabilité des indicateurs est dépendante de la Précision et de la Sensibilité du réseau de capteurs, influencées par les deux grandes étapes ci-décrites. L'incertitude des indicateurs est dépendante des natures et des incertitudes de mesure des capteurs. Le placement de capteurs est primordial tant il conditionne les informations captées pour l'identification des actions.

Dans ce chapitre, nous développons un modèle des activités fondé sur les travaux d'Ergothérapie : le cadre OTPF et l'échelle AMPS. Les activités sont décomposées en une liste –ou séquence(s)– d'actions, certaines actions pouvant être communes à plusieurs activités. Chaque action est caractérisée par des indicateurs utiles possibles d'*interaction* avec un objet ou de *lieu* dans l'environnement à capter, mais englobés dans une temporalité. Ces caractéristiques fondamentales permettent de définir (après traitement) de nombreuses autres informations potentielles. En discutant de l'application de notre modèle pour la veille automatisée pour une activité simplifiée, nous avons mis en exergue les étapes essentielles et nécessaires pour concevoir la veille à la personne. Un effort de simplification et d'adaptation est nécessaire en amont, au niveau de la description des actions afin de permettre leur observation par des capteurs intégrés et installés au sein de l'environnement de la personne. À présent, nous devons concevoir le réseau de capteurs –étape importante pour la veille automatisée– afin d'acquérir des informations hétérogènes de manière fiable ou robuste. La première étape à la conception est de représenter le problème du placement de capteurs : la relation actions-capteurs.

Chapitre 3

Modèle des régions pour une représentation générique

Sommaire

3.1 La région : modélisation des actions et des capteurs	38
3.1.1 Définition de la région	39
3.1.2 Régions d'intérêt et de couverture : des régions incluent dans la région de travail	40
3.1.3 Combinaison des régions : fusion d'informations pour améliorer la couverture des intérêts	41
3.2 Représentation des capteurs discrétisés	44
3.2.1 Régions de mesure : des régions incluent dans la région de couverture . . .	44
3.2.2 Exemple de représentations	46
3.2.3 Combinaison de capteurs hétérogènes	48
3.3 Représentation des intérêts prioritaires et des capteurs incertains	50
3.3.1 Généralisation des régions et partitionnement selon les actions	50
3.3.2 Occurrence et Détectabilité des régions	52
3.4 Aspects techniques du modèle	55
3.4.1 Dimension de travail	56
3.4.2 Caractéristiques de l'action	56
3.4.3 Volumétrie de la personne	56

Dans ce chapitre, nous implémentons le *modèle des activités* défini précédemment décomposant les activités en un ensemble d'actions. Nous modélisons *action* et *capteur* en développant une représentation **unifiée**, **unique** et **flexible**. Une telle approche est particulièrement ambitieuse tant actions et capteurs sont différents et divers par nature. Les actions sont définies par des caractéristiques différentes (*i.e.* interaction, lieu, temporalité), *cf.* section 2.2.2. Les capteurs sont différents par nature (*i.e.* binaire, discret ou continu) et divers par type (*e.g.* capteur infrarouge passif, contacteur, caméra), *cf.* introduction 1.1.1. Pour ce faire, nous choisissons d'utiliser les ensembles nommés **régions**, issus de la Théorie des Ensembles [Kwo02]. Nous définissons chaque caractéristique d'action ou chaque observation capteur par une région dédiée, permettant l'unicité et la flexibilité de notre représentation intitulée *modèle des régions*.

En réalité, il est très ardu de déterminer un modèle représentant parfaitement un phénomène physique. De nombreuses approximations sont nécessaires afin de proposer un modèle approprié

selon l'application¹, décrivant les caractéristiques essentielles du phénomène sous une formulation utile. La modélisation est un compromis entre la *qualité* et la *complexité* du modèle [Che⁺13]. La qualité de l'évaluation et sa nature¹ dépendent fortement de la modélisation considérée et des approximations réalisées.

La modélisation et l'évaluation sont ainsi des concepts intimement liés tant l'évaluation est fortement dépendante de la modélisation choisie, et tant notre modélisation est conçue en vue d'une évaluation : la *fiabilité* du réseau de capteurs pour l'identifiabilité des actions ; cf. chapitre 4. Nous introduisons ces concepts essentiels à notre méthodologie séparément mais successivement à dessein de clarté.

3.1 La région : modélisation des actions et des capteurs

Dans le domicile, nous nous intéressons à plusieurs actions d'activité. Ces actions (*e.g.* *S'asseoir sur le canapé* ou *S'asseoir à table*) sont réalisées par la personne lors de son interaction avec son environnement (*e.g.* le séjour), illustré en figure 3.1a. Par exemple, l'action *S'asseoir à table* est réalisée par la personne lorsqu'elle est présente devant la table. Le lieu *Devant la table* est délimité par une région géométrique² regroupant l'ensemble des positions possibles prises dans le domicile par la personne pour interagir avec la table. Nous appelons cette région particulière *région d'intérêt*, illustrée en figure 3.1b.

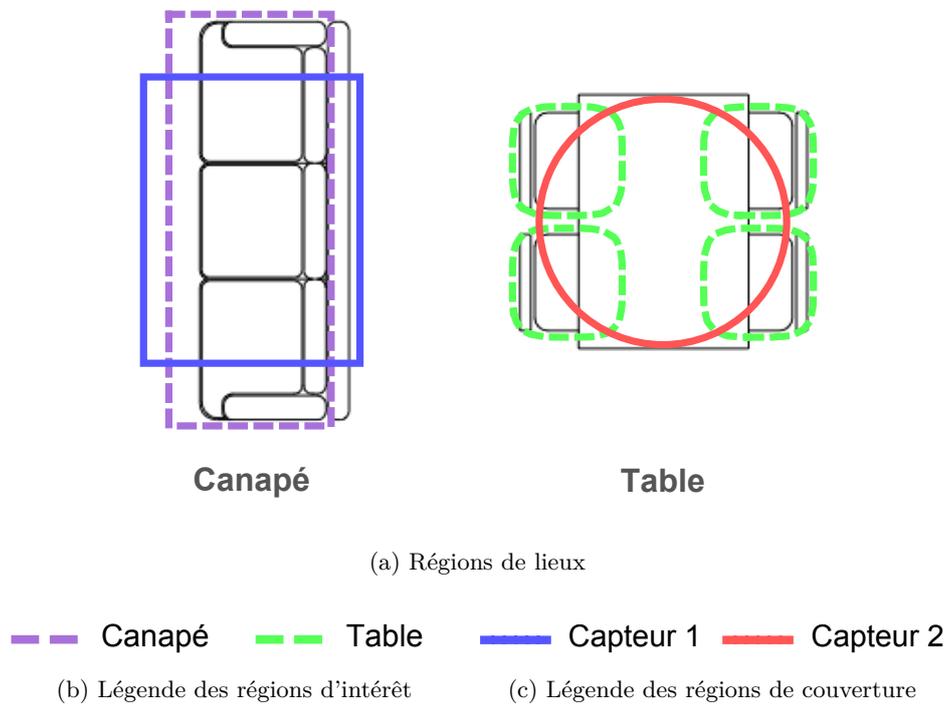


FIGURE 3.1 – Illustration de régions d'intérêt et de couverture dans le séjour

Pour la veille automatisée, nous devons capter la présence de la personne dans cette région du domicile en installant au minimum un capteur dans l'environnement. Par exemple, un capteur

¹ *e.g.* évaluation de la fiabilité du réseau de capteurs, de l'incertitude des informations estimées (observabilité)

² la région ci-considerée regroupe des positions géométriques

de présence permet de connaître lorsque la personne est située dans sa région d'acquisition effective. Nous appelons cette région particulière *région de couverture*, illustrée en figure 3.1c.

Implicitement, nous avons une troisième région qui délimite le champ d'instrumentation et de veille étant l'environnement de la personne : le domicile (voire une pièce). Nous appelons cette région globale *région de travail*, illustrée en figure 3.2a.

Notre modélisation est fondée sur la notion ensembliste de *région* et sa généralité, étant unifiante (actions et capteurs) et flexible (différentes caractéristiques d'action), afin de développer un modèle unique permettant d'évaluer le réseau de capteurs.

3.1.1 Définition de la région

Une *région* est l'union d'un ensemble connexe ouvert³ et de son ensemble frontière⁴ [Kwo02], notée \mathcal{R} . Nous considérons qu'un *ensemble* est une collection finie ou infinie, et non-ordonnée d'objets. Nous appelons *élément* un membre d'un ensemble ou d'une région, noté $e \mid e \in \mathcal{R}$.

3.1.1.1 Adaptation de la région aux caractéristiques des actions

Nous adaptons la nature de ces éléments, soit la nature de la région, afin de gérer chaque caractéristique : *e.g.* une région de *lieux* collecte des positions alors qu'une région d'*interactions* collecte des utilisations. Nous avons ainsi pour chaque action d'intérêt plusieurs régions. Au besoin, si de nouvelles caractéristiques d'action sont considérées, le modèle est aisément adaptable (flexibilité).

3.1.1.2 Représentation, mesure des régions et dimension de travail

Par définition, une région de *lieux* est un ensemble de points ou positions. La représentation d'une région \mathcal{R} doit autoriser l'application des opérateurs ensemblistes, par exemple :

- une simple liste de points finie ou infinie : *e.g.* $\mathcal{R} = \{p_1, p_2, \dots, p_k, \dots\}$
- un d-polytope convexe ou non-convexe : *e.g.* un rectangle
- une courbe frontière : *e.g.* un disque défini par l'équation d'un cercle
- une combinaison logique d'inégalités : *e.g.* un tore

Par ailleurs, il est nécessaire de pouvoir *mesurer* la région afin de l'évaluer : quantifier les éléments e d'une région \mathcal{R} . Nous définissons $M(\mathcal{R})$ étant la fonction de mesure des éléments **distincts** d'une région \mathcal{R} , s'agissant (selon la dimension de la région) de son compte (0D), sa longueur (1D), son aire (2D), son volume (3D) *etc.* ; pour une région de lieux. Cette fonction consiste soit à compter (0D) le nombre d'éléments présent dans la région, soit à intégrer (1D, 2D ...) sur la région la valeur unité : $M(\mathcal{R}) = \int \dots \int_{\mathcal{R}} 1 \, du_1 \dots du_d \, \forall d = \text{Dim}(\mathcal{R}) \geq 1$.

En dimension 2, la mesure d'une région \mathcal{R} correspond à l'aire, soit : $M(\mathcal{R}) = A(\mathcal{R}) = \iint_{\mathcal{R}} 1 \, dx \, dy \mid \text{Dim}(\mathcal{R}) = 2$. Il est possible de discrétiser l'espace de dimension 2 (*e.g.* par une grille) pour le ramener en dimension 0, permettant d'approximer son aire, soit : $M(\mathcal{R}) = \text{Card}(\mathcal{R}) = \sum_{e \in \mathcal{R}} 1 \mid \text{Dim}(\mathcal{R}) = 0$.

Les concepts et outils ci-développés sont valides quelle que soit la dimension d de travail, et quelle que soit la représentation des régions choisie. La dimension de travail est inhérente aux algorithmes et bibliothèques utilisés pour implémenter le modèle des régions, ainsi qu'aux efforts

3 *angl.* open connected set 4 *angl.* boundary set

fournis et à l'investissement déployé pour la conception. Ainsi, nous pouvons théoriquement travailler (*e.g.*) en 3D pour nos régions de lieux, et en pratique uniquement si l'implémentation le permet ; bien que nous illustrons des régions de lieux en 2D dans ce document.

3.1.2 Régions d'intérêt et de couverture : des régions incluses dans la région de travail

Nous définissons formellement les trois notions essentielles ci-introduites : la *région d'intérêt* pour les actions, la *région de couverture* pour les capteurs, et la *région de travail* pour l'environnement.

Chacune de ces régions est potentiellement l'union de plusieurs régions, car des régions différentes ou disjointes peuvent être liées. Par définition, une région regroupe des éléments liés sur le plan *spatial* : c'est-à-dire connexes, proches pour la réalisation de l'action ; *e.g.* des positions connexes dans l'espace physique. Or, des éléments non-connexes *spatialement* peuvent être liés sur le plan des actions, tout aussi « proches » pour la réalisation de l'action. Par exemple, l'action *S'asseoir à table* est réalisée lorsque la personne est assise, concernant plusieurs objets du mobilier : *e.g.* différentes chaises ; illustrée en figure 3.1. Autrement, l'action *Se savonner les mains*⁵ est réalisée lorsque la personne utilise un des lavabos (différentes pièces) de son environnement ou un gel hydroalcoolique.

3.1.2.1 Région d'intérêt

Nous définissons la *région d'intérêt*⁶ étant l'union des régions contenant tous les éléments pertinents⁷ pour la réalisation de l'action, notée \mathcal{I} ; illustrées en figure 3.1b.

Nous associons à chaque caractéristique d'action une région d'intérêt. En terme de *lieu*, elle représente toutes les positions possibles pouvant être prises par la personne pour réaliser l'action. En terme d'*interaction*, elle représente tous les cas d'utilisation pouvant être utilisés par la personne pour réaliser l'action. Par exemple, l'action *Prendre de la nourriture dans le réfrigérateur* est réalisée lorsque la personne ouvre la porte de son réfrigérateur (interaction), ou lorsqu'elle est présente devant son réfrigérateur (lieu).

3.1.2.2 Région de couverture

Nous définissons la *région de couverture*⁸ étant l'union des régions contenant tous les éléments observables⁹ par le capteur, notée \mathcal{C} ; illustrées en figure 3.1c.

Nous associons à chaque capteur une région de couverture. En terme de *lieu*, elle représente toutes les positions possibles couvertes par le capteur. En terme d'*interaction*, elle représente tous les cas d'utilisations possibles détectés par le capteur. Par exemple, le réfrigérateur de l'action *Prendre de la nourriture dans le réfrigérateur* est soit instrumenté avec un capteur binaire sur sa porte (interaction), soit instrumenté avec un capteur de présence devant sa porte (lieu).

5 où *Se laver les mains* est l'activité de rendre ses mains propres, et *Se savonner les mains* est l'action de frotter/appliquer le savon sur ses mains

6 *angl.* interest region (IR)

7 éléments appropriés ou préférentiels mais nécessaires pour réaliser l'action, usuellement nommés informations à capter : *e.g.* utilisations d'un objet ou espaces physiques sollicités ; *cf.* section 2.2.1.1

8 *angl.* coverage region (CR) 9 éléments présents dans le champ de vision effectif du capteur

3.1.2.3 Région de travail

La *région de travail*¹⁰ constitue notre univers, regroupant ainsi tous les éléments existants, notée \mathcal{T} ; illustrée en figure 3.2a.

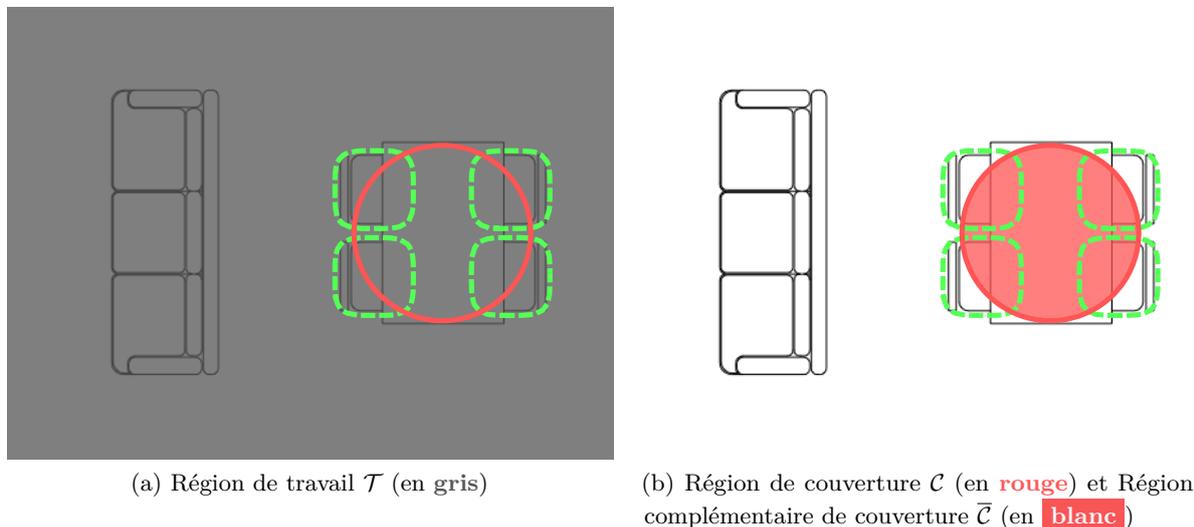


FIGURE 3.2 – Illustration de la région de travail (en gris) et d'une région complémentaire de couverture (en blanc)

Chaque région \mathcal{R} est incluse dans la région de travail \mathcal{T} , telle que : $\mathcal{R} \subset \mathcal{T}$. Nous définissons la *région complémentaire* étant la différence entre la région de travail \mathcal{T} et la région \mathcal{R} , notée $\bar{\mathcal{R}}$ telle que : $\mathcal{R} \sqcup \bar{\mathcal{R}} = \mathcal{T}$. Par exemple, la région complémentaire de couverture $\bar{\mathcal{C}}$ correspond à tous les éléments possibles où notre capteur de présence ne peut détecter la personne ; illustrée en figure 3.2b.

3.1.3 Combinaison des régions : fusion d'informations pour améliorer la couverture des intérêts

Utilisant plusieurs capteurs, nous souhaitons fusionner leur informations de couverture afin d'exploiter au mieux le potentiel d'acquisition des capteurs. Leur régions de couverture peuvent s'intersecter dans la région de travail, de sorte à former de nouvelles régions à l'intérieur desquelles tous les éléments peuvent être détectés par ses capteurs associés ; cf. figure 3.3.

Nous combinons les informations issues des capteurs en partitionnant nos régions de couverture.

3.1.3.1 Principe du partitionnement

Le partitionnement d'une région¹¹ \mathcal{R} consiste à diviser celle-ci en sous-régions disjointes, de telle sorte que chaque élément $e \in \mathcal{R}$ appartienne à une et seulement une sous-région notée τ . Ainsi, $\forall \tau \subset \mathcal{R}$ nous avons :

- une sous-région τ est une région non-vide : $\tau \neq \emptyset$
- la région \mathcal{R} est l'union disjointe de ses sous-régions : $\mathcal{R} = \bigsqcup_{\tau \subset \mathcal{R}} \tau$

¹⁰ angl. work region (WR) ¹¹ angl. region partitioning

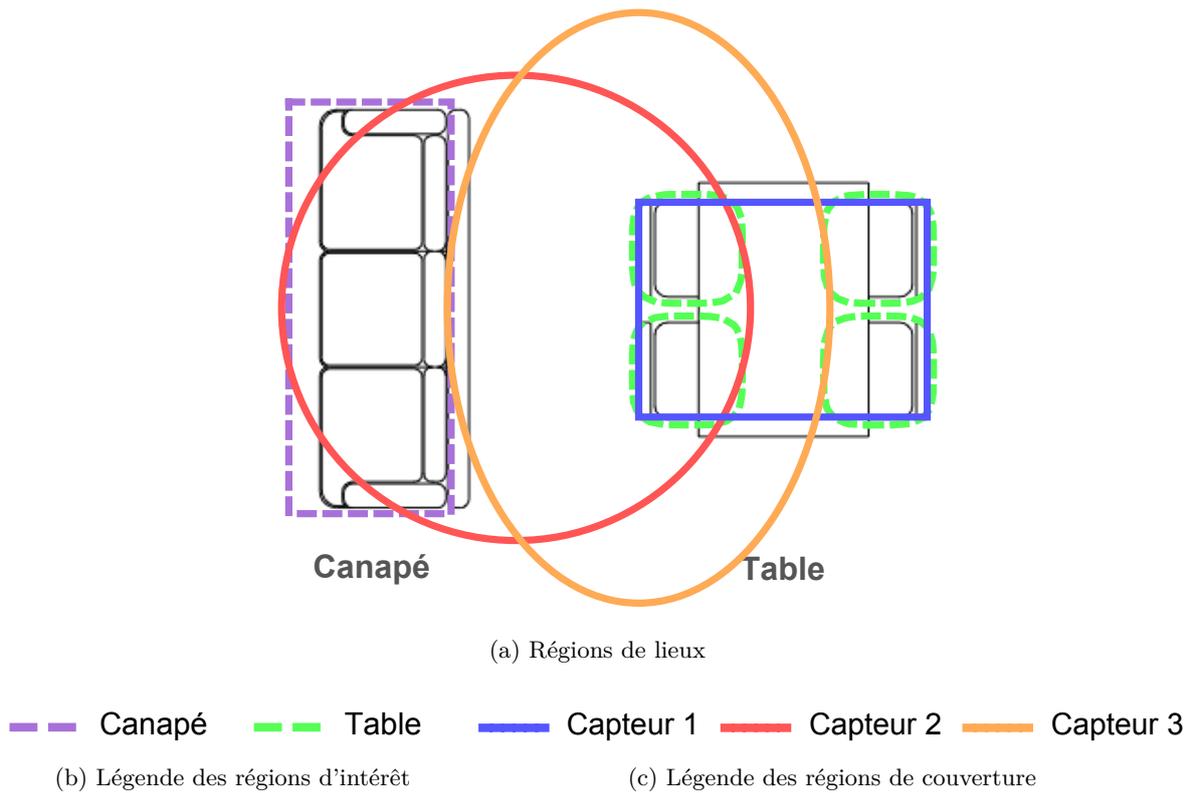


FIGURE 3.3 – Illustration de régions de couverture dans le séjour ; chaque couleur correspond à un capteur différent

Afin de fusionner les informations capteurs, nous nous intéressons à partitionner toutes les régions de couverture afin de déterminer toutes les combinaisons utiles (possibles) des capteurs. Il s'agit de déterminer les sous-régions illustrées en figure 3.4.

3.1.3.2 Région générale et sous-région de couverture : des régions pour partitionner et sélectionner

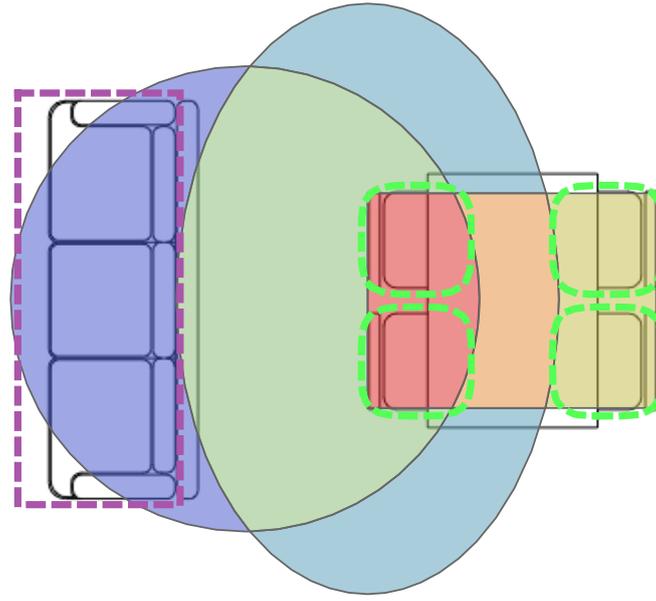
Nous introduisons deux nouvelles notions : la *région générale de couverture* à partitionner, et la *sous-région de couverture* pour couvrir l'intérêt à sélectionner.

Région générale de couverture Nous définissons la *région générale de couverture*¹² étant l'union de toutes les régions de couverture, notée \mathcal{C}_{all} ; telle que pour K capteurs : $\mathcal{C}_{all} = \mathcal{C}_{\mathcal{K}} = \bigcup_{k \in \mathcal{K}} \mathcal{C}_k \mid \mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$. Nous définissons conjointement l'ensemble des parties de \mathcal{C}_{all} noté $\mathcal{P}(\mathcal{C}_{all})$ étant l'ensemble dont les éléments c sont les sous-ensembles de \mathcal{C}_{all} : $c \in \mathcal{P}(\mathcal{C}_{all}) \iff c \subset \mathcal{C}_{all} \mid \mathcal{P}(\mathcal{C}_{all}) = \{c_1, \dots, c_N\}$.

Sous-région de couverture Nous appelons chacun de ces sous-ensembles *sous-région de couverture*¹³, notée c ; illustrée en figure 3.4. Chaque région de couverture est l'union de certaines sous-régions de couverture. Par exemple en figure 3.4, nous avons $\mathcal{C}_1 = c_1 \sqcup c_2 \sqcup c_3$.

Par conséquent, nous écrivons notre région générale de couverture \mathcal{C}_{all} à partir de ces

¹² angl. coverage general region (CGR) ¹³ angl. coverage sub-region (CSR)



(a) Sous-régions de lieux



(b) Légende des sous-régions de couverture

FIGURE 3.4 – Illustration de sous-régions de couverture, chaque couleur correspond à une sous-région ; *cf.* figure 3.3

sous-régions, telle que : $\mathcal{C}_{all} = c_{\mathcal{N}} = \bigsqcup_{n \in \mathcal{N}} c_n \mid \mathcal{N} = \{1, \dots, N\} \subset \mathbb{N}$; où N est le cardinal des sous-régions de couverture $N = \text{Card}(\mathcal{P}(\mathcal{C}_{all})) = \text{Card}(\mathcal{N})$, \mathcal{N} est l'ensemble des indices associés à chaque sous-région c , et $c_{\mathcal{N}}$ est la région résultante de l'union des sous-régions c_n pour les indices n apparaissant dans l'ensemble des indices (*e.g.*) \mathcal{N} (*i.e.* soit tous). Par exemple en figure 3.4, nous avons $c_{\{1,2,4\}} = c_1 \sqcup c_2 \sqcup c_4 = \mathcal{C}_1$.

À partir de ces sous-régions de couverture, nous pouvons sélectionner celles nous permettant de couvrir *au mieux*¹⁴ l'intérêt afin de façonner une nouvelle région épousant la région d'intérêt ; *cf.* section 4.1.3.2.

3.1.3.3 Expression logique associée aux régions de couverture et d'intérêt

En réalité, l'environnement est observé au travers des capteurs et de leurs combinaisons (*i.e.* sous-régions de couverture). Pour chaque sous-région de couverture, nous pouvons déterminer l'expression logique associée c_n à l'observation effective d'un élément en sous-région c_n : *e.g.* $c_1 = \mathcal{C}_1.\overline{\mathcal{C}_2}$ et $c_5 = \overline{\mathcal{C}_1}.\mathcal{C}_2.\mathcal{C}_3$; où la variable booléenne \mathcal{C}_k est vraie si le capteur S_k détecte dans sa région de couverture \mathcal{C}_k . Chaque région d'intérêt peut être ainsi décrite indirectement à travers d'une combinaison de capteurs –plusieurs sous-régions de couverture– soit une expression logique de capteurs : *e.g.* pour le canapé $I_1 \hat{=} \mathcal{C}_1.\overline{\mathcal{C}_2}$ et pour la table $I_2 \hat{=} (\mathcal{C}_1.\mathcal{C}_2.\mathcal{C}_3) + (\mathcal{C}_3.\overline{\mathcal{C}_2})$; *cf.* figure 3.4.

Une force du modèle des régions est d'*unifier* action et capteur, c'est-à-dire la région d'intérêt et la région de couverture, en liant formellement l'environnement réel et observé grâce

¹⁴ où mieux est défini/optimisé par la fonction d'évaluation utilisée

aux expressions logiques. Ces expressions logiques –ou définition de la région d’intérêt à partir de sous-régions de couverture– sont primordiales pour bien évaluer la performance du réseau de capteurs au préalable, sachant qu’elle seront utilisées pour l’identification des actions.

Ainsi, notre modélisation par région nous permet de gérer une large diversité de “*formes géométriques*”, n’étant pas contraints à des “*formes régulières*” (convexes ou non) ; dans le cadre des régions de lieux. Le partitionnement des régions de couverture permet de réaliser une conception écologique du réseau de capteurs afin d’obtenir une meilleure évaluation ; cf. chapitres 4 et 6. De plus, notre modélisation nous permet de fournir en aval de la conception l’expression logique des capteurs associée à chaque région d’intérêt. Après l’introduction des notions clés, nous augmentons notre modèle des régions de sorte à pouvoir représenter les capteurs discrétisés, et enrichir notre modèle des contraintes de la veille et des capteurs.

3.2 Représentation des capteurs discrétisés

Jusqu’à présent nous avons uniquement considéré des capteurs binaires, nous augmentons notre modèle des régions pour représenter et prendre en considération les capteurs discrétisés¹⁵ : *e.g.* capteurs de distance, capteurs LIDAR¹⁶, caméras. Nous développons une représentation unique afin de fusionner les informations de capteurs hétérogènes.

3.2.1 Régions de mesure : des régions incluses dans la région de couverture

Au sein de sa région de couverture, un capteur binaire acquiert tous les éléments et détecte de manière indifférenciée lorsqu’un de ces éléments est utilisé. Par exemple, un capteur de présence permet de connaître lorsque la personne est présente/située dans sa région de couverture voire absente, sans déterminer à quelle position exacte. Autrement, un contacteur permet de connaître lorsque la personne utilise l’objet associé dans sa région de couverture, sans déterminer son utilisation exacte ; *e.g.* l’ouverture de la porte d’un réfrigérateur pour prendre une boisson fraîche bien qu’il puisse être utilisé pour prendre de la nourriture.

Par définition, la région de couverture représente la région d’acquisition effective du capteur. D’un point de vue technique, nous posons que les capteurs acquièrent l’information dans une région élémentaire non-ponctuelle et disposent pour chaque information d’une incertitude associée ; cf. section 2.3.3.1. De ce fait, nous pouvons définir pour chaque information une région d’acquisition. Nous appelons cette région d’acquisition effective d’une information possible *région de mesure*.

3.2.1.1 Modèle unique des capteurs binaires et discrétisés

En réalité, un capteur binaire n’acquiert qu’une seule information. Pour un capteur de présence, si la personne est présente dans sa région de couverture, alors il délivre une information qui est une unique et possible mesure de position, sinon il n’en délivre pas. Autrement pour un contacteur, si la personne utilise l’objet dans sa région de couverture (*i.e.* l’étendue/région des utilisations qu’elle couvre), alors il délivre une information qui est une unique et possible mesure de contact, sinon il n’en délivre pas.

Dans le modèle binaire, la valeur booléenne *faux* n’est pas une information : elle correspond

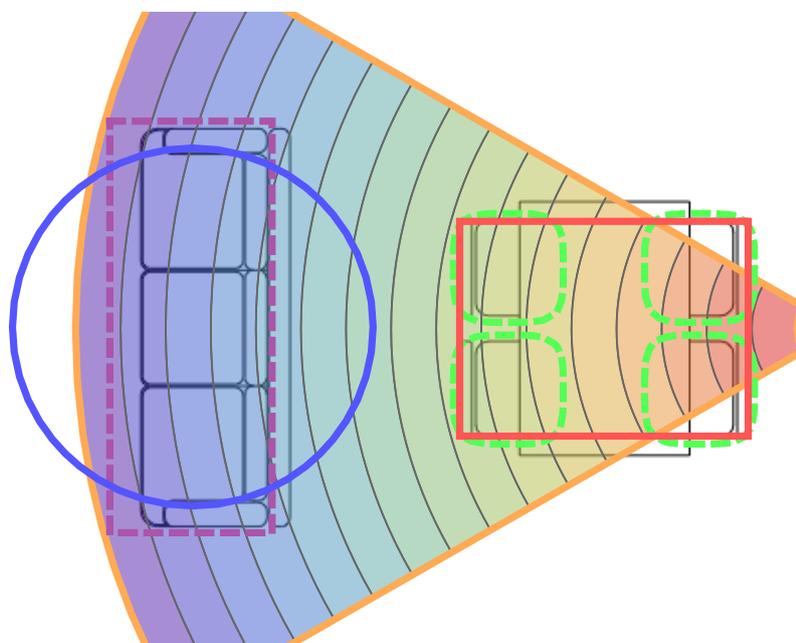
¹⁵ *i.e.* capteur discret ou continu alors discrétisé ¹⁶ *fr.* détection et estimation de la distance par la lumière

à une absence de mesure. En opposition, la valeur booléenne *vrai* correspond à une information, c'est-à-dire la disponibilité de mesure. Nous statuons que *vrai* signifie que le capteur délivre une mesure, et que *faux* signifie qu'il ne délivre pas de mesure. Par exemple, une règle ne mesure la longueur que lorsqu'un objet lui est présentée pour mesure. Nous décrivons ainsi les capteurs binaires et continus dans un unique modèle unifié : celui d'un capteur unique.

Nous définissons le *capteur* étant un instrument délivrant une-des information-s de mesure sujettes aux incertitudes et disposant d'un état informant s'il dispose d'au moins une information de mesure. Nous avons ainsi une représentation de la diversité –voire multiplicité– des mesures (aspect discrétisé), et une représentation de l'état du processus de mesure (aspect binaire).

3.2.1.2 Région de mesure

Nous définissons la *région de mesure*¹⁷ étant la région d'incertitude d'une mesure possible d'un capteur, notée \mathcal{M} ; illustrée figure (3.5). Une définition complémentaire serait qu'elle soit la région où la mesure est réalisée.



(a) Régions de lieux

— Presence 1 — Presence 2 — Distance

(b) Légende des régions de couverture

FIGURE 3.5 – Illustration de régions de mesure ; chaque couleur arc-en-ciel pleine correspond à une région de mesure du capteur de distance

Nous associons à chaque information (de mesure) d'un capteur une région de mesure. En terme de lieu, elle représente toutes les positions possibles pouvant être la vraie (valeur de) position. En terme d'interaction, elle représente tous les cas d'utilisation pouvant être la vraie utilisation. Par exemple, la personne est située devant le réfrigérateur ou l'évier ; pour un capteur de distance. Autrement, la personne utilise la télévision ou les plaques chauffantes ; pour un capteur de consommation électrique.

¹⁷ *angl.* measure region (MR)

3.2.1.3 Des régions (non-)disjointes incluses dans la région de couverture

Nous écrivons que l'union des régions de mesure d'un capteur est sa région de couverture, telle que : $\mathcal{C}_k = \bigcup_{j \in \mathcal{J}_k} \mathcal{M}_j$; où \mathcal{J}_k représente l'ensemble des indices j associés aux régions de mesure incluses dans la région de couverture \mathcal{C}_k et issues du capteur S_k . Nous définissons l'ensemble des parties de \mathcal{C}_k noté $\mathcal{P}(\mathcal{C}_k)$ étant l'ensemble dont les éléments \mathcal{M} sont les sous-ensembles de \mathcal{C}_k : $\mathcal{M} \in \mathcal{P}(\mathcal{C}_k) \iff \mathcal{M} \subset \mathcal{C}_k$.

Par ailleurs, les régions de mesure ne sont pas nécessairement disjointes. En effet, plusieurs éléments peuvent être liés à plusieurs mesures possibles. Par définition, une région de mesure est une mesure possible du capteur et l'incertitude associée à cette mesure : ainsi la discrétisation –ou précision– des mesures possibles n'est pas nécessairement plus grande que l'incertitude commise. Par exemple, un goniomètre permet de mesurer un angle au moyen d'une lunette de visée : bien qu'il soit possible d'obtenir une mesure au degré près, une erreur de positionnement de la lunette peut entraîner une erreur de mesure supérieure au degré.

Cependant, il est possible d'avoir une précision supérieure à l'incertitude de mesure sur une étendue partielle ou totale du capteur ; selon les capteurs. Ainsi, nous pouvons considérer des régions de mesure disjointes par endroit (en des sous-régions) et de surcroît des régions de mesure non-disjointes en d'autres endroits.

3.2.2 Exemple de représentations

Dans nos illustrations, nous représentons principalement des régions de mesure disjointes et peu précises (aux pas de mesures et incertitudes grandes) à dessein de clarté. De plus, selon les capteurs toutes les régions de mesure ne sont pas actives simultanément : l'existence des régions de mesure dépend du capteur et des mesures réalisées. Par exemple, une caméra délivre une mesure par pixel mais pour tous (*i.e.* toutes ses régions de mesure) simultanément.

3.2.2.1 Capteur d'angle ou de distance

Pour un capteur d'angle ou de distance, il n'existe qu'une seule région de mesure active : ces capteurs ne délivrent qu'une seule mesure à la fois. Ils sont conçus de telle sorte à mesurer l'angle –*resp.* la distance– de l'objet le plus proche. Nous illustrons un capteur d'angle en figure 3.6a et un capteur de distance en figure 3.6c, ainsi que qu'une sélection des régions de mesure pertinentes pour la veille ; *i.e.* couvrant au *mieux* chaque région d'intérêt.

3.2.2.2 Capteur angle et distance

Pour un capteur de distance et d'angle, il existe un ensemble de régions de mesure non-complet comprenant autant de régions de mesure que de pas/mesures d'angle possibles ; inhérent à la physique de fonctionnement du capteur. Ces capteurs sont conçus de telle sorte à mesurer pour chaque angle la distance de l'objet le plus proche. Nous illustrons un capteur d'angle et distance en figure 3.7, ainsi qu'une sélection des régions de mesure pertinentes pour la veille.

3.2.2.3 Capteur caméra

Pour une caméra, toutes les régions de mesure sont actives : c'est-à-dire un ensemble de régions de mesure complet. Ces capteurs sont conçus de telle sorte à mesurer pour chaque cellule

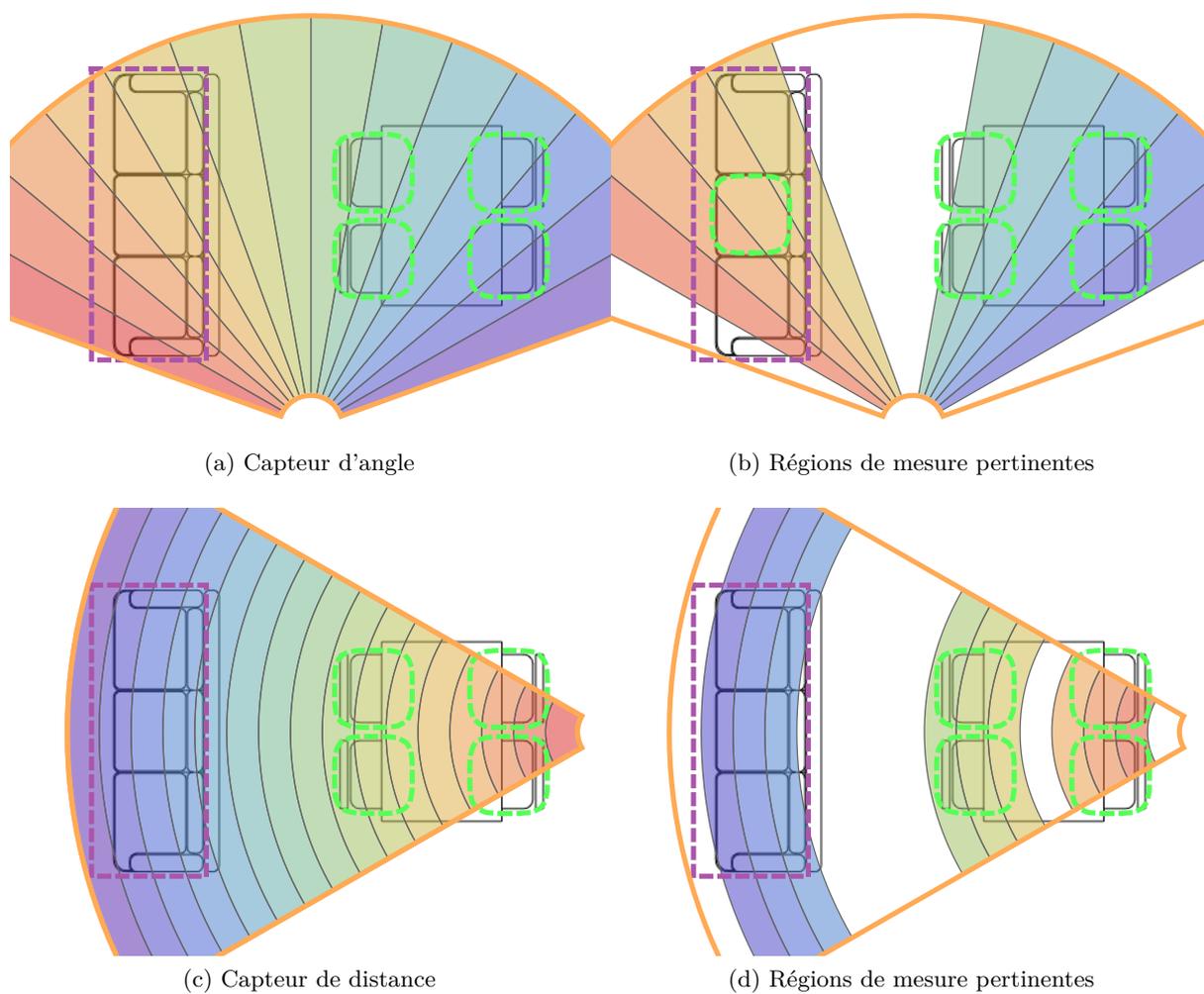


FIGURE 3.6 – Illustration de régions de mesure d'un capteur d'angle, et d'un de distance

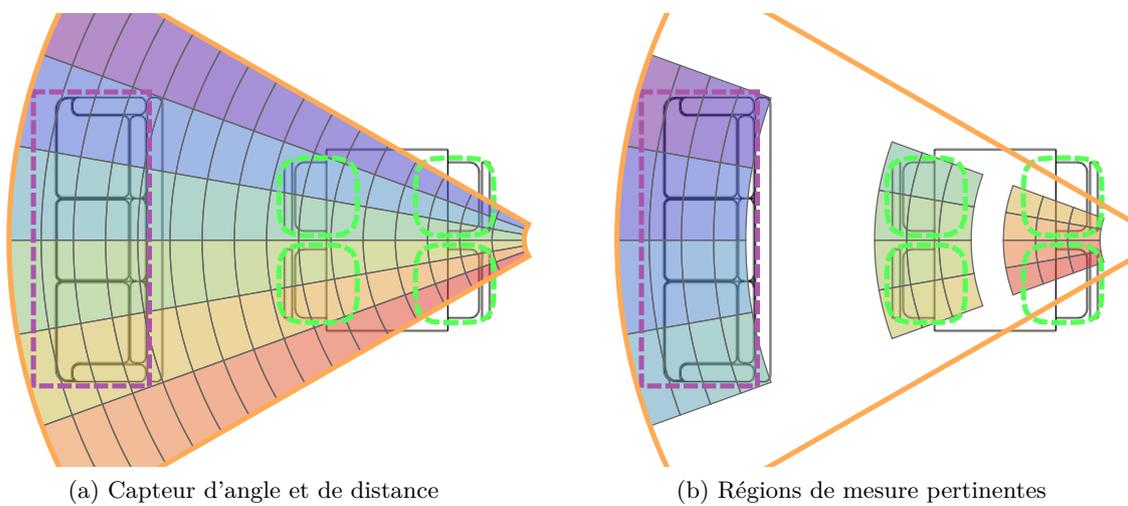
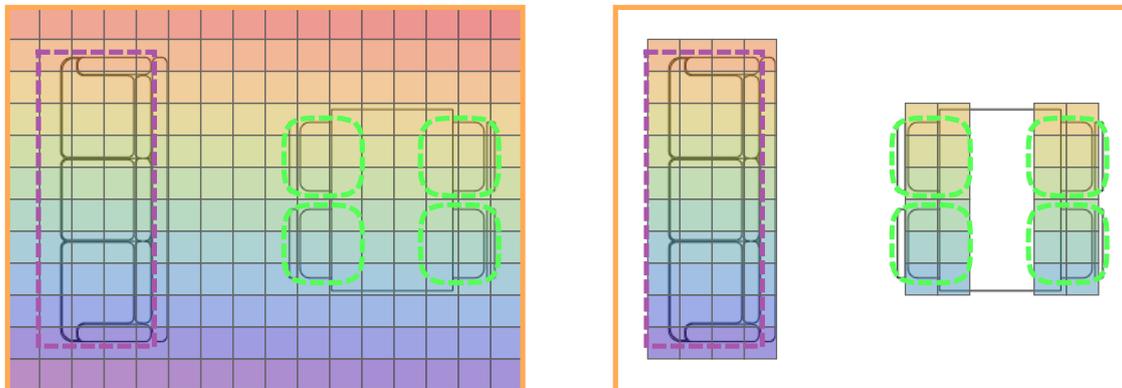


FIGURE 3.7 – Illustration de régions de mesure d'un capteur d'angle et de distance

l'intensité lumineuse réfléchi par l'objet le plus proche. Nous illustrons un capteur caméra en figure 3.8, ainsi qu'une sélection des régions de mesure pertinentes pour la veille.



(a) Capteur caméra

(b) Régions de mesure pertinentes

FIGURE 3.8 – Illustration de régions de mesure d'un capteur type caméra

3.2.3 Combinaison de capteurs hétérogènes

Similairement aux régions de couverture, les régions de mesure de capteurs différents peuvent s'intersecter dans la région de travail, représentant l'ensemble des éléments possibles pouvant être mesurés par les capteurs. À présent, nous nous intéressons à fusionner les informations issues des capteurs en partitionnant les régions de mesure ; celles-ci étant des sous-régions de la région de couverture.

3.2.3.1 Partitionnement des régions de mesure

Le partitionnement s'effectue uniquement entre régions de mesure de capteurs différents. Nous négligeons la temporalité, soit toute forme de mémoire ou historique nous autorisant à fusionner les informations du passé acquises en continu par le module en aval ; cf. section 2.3.2.2. Par exemple, il n'existe qu'une région de mesure pour un capteur de distance/angle, qu'un sous-ensemble de régions de mesure pour un LIDAR, mais toutes les régions de mesure pour la caméra.

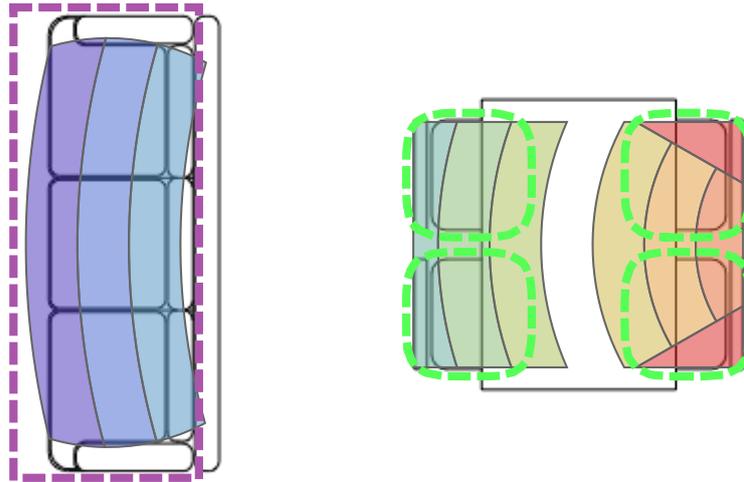
Région générale de couverture Nous définissons autrement la *région générale de couverture* étant l'union de toutes les régions de mesure, notée \mathcal{M}_{all} pour cette définition, telle que pour K capteurs : $\mathcal{M}_{all} = \mathcal{C}_{all} = \bigcup_{k \in \mathcal{K}} \left(\bigcup_{j \in \mathcal{J}_k} \mathcal{M}_j \right) \mid \mathcal{J}_k \subset \mathcal{J} = \{1, \dots, J\}$; où J est le cardinal des régions de mesure du réseau de capteurs, pour l'ensemble des capteurs $\mid J = \sum_{k \in \mathcal{K}} J_k$. Nous définissons l'ensemble des parties de \mathcal{M}_{all} noté $\mathcal{P}(\mathcal{M}_{all})$ étant l'ensemble dont les éléments m sont les sous-ensembles de \mathcal{M}_{all} : $m \in \mathcal{P}(\mathcal{M}_{all}) \iff m \subset \mathcal{M}_{all} = \mathcal{M}_{all} \mid \mathcal{P}(\mathcal{M}_{all}) = \{m_1, \dots, m_L\}$.

Sous-région de mesure Nous appelons chacun de ces sous-ensembles *sous-région de mesure*¹⁸, notée m ; illustrée en figure 3.9. Chaque sous-région de couverture est l'union de certaines

¹⁸ angl. measure sub-region (MSR)

sous-régions de mesure.

Par conséquent, nous pouvons écrire notre région générale de couverture \mathcal{M}_{all} telle que : $\mathcal{M}_{all} = m_{\mathcal{L}} = \bigsqcup_{l \in \mathcal{L}} m_l \mid \mathcal{L} = \{1, \dots, L\} \subset \mathbb{N}$; où L est le cardinal des sous-régions de mesure $L = \text{Card}(\mathcal{P}(\mathcal{M}_{all})) = \text{Card}(\mathcal{L})$, \mathcal{L} est l'ensemble des indices associés à chaque sous-région m , et $m_{\mathcal{L}}$ est la région résultante de l'union des sous-régions m_l pour les indices l apparaissant dans l'ensemble des indices (*e.g.*) \mathcal{L} (*i.e.* soit tous).



(a) Régions de lieux

— Canapé — Table

(b) Légende des régions d'intérêt

FIGURE 3.9 – Illustration de sous-régions de mesure, *cf.* figure 3.5 ; chaque couleur arc-en-ciel pleine correspond à une sous-région

3.2.3.2 Expression logique associée aux régions de mesure et d'intérêt

Par définition, chaque région de mesure est liée à une valeur-élément particulière, si nous avons un ensemble connexe de valeurs, alors nous pouvons définir un intervalle de valeurs nous permettant de simplifier l'expression logique I des capteurs associée à la région d'intérêt \mathcal{I} .

Par exemple, si la personne se situe à $d \in \{20, 50, 40, 60, 30\} \text{ cm} \subset \mathcal{D}^{19}$ du capteur de distance pour être attablée –définie par la région d'intérêt \mathcal{I}_2 de l'action *S'asseoir à Table* et supposant une précision des mesures d'un pas $\epsilon_d = 10 \text{ cm}$, alors cela correspond à $d \in [20 ; 60] \text{ cm}$: soit l'expression logique $I_2 = (d \geq 20).(d \leq 60)$. Par conséquent, malgré notre partitionnement en région pour chaque mesure possible (*i.e.* la région de mesure), nous pouvons déterminer des expressions logiques simples fondées sur des intervalles de valeurs.

¹⁹ où $\mathcal{D} = \{10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100\} \subset \mathbb{N}$ est l'ensemble des mesures possibles du capteur de distance, avec $J_k = \text{Card}(\mathcal{D}) = 10$

Une force du modèle des régions est d’avoir une représentation unique pour les capteurs binaire, discret et continu en discrétisant les mesures des capteurs grâce aux régions de mesure. Ces régions de mesure sont primordiales pour bien évaluer la performance du réseau de capteurs au préalable. De plus, elles permettent de déterminer des expressions logiques –utiles pour l’identification– de capteurs hétérogènes par nature mais d’informations homogènes.

Ainsi en discrétisant les capteurs, nous prenons en considération les capteurs discrets et continus afin de rendre nos placements de capteurs plus écologique. La définition des régions de mesure permet une modélisation réaliste des performances des capteurs prenant en compte la complexité de la veille, et de fournir l’expression logique associée à chaque région d’intérêt fondée sur les capteurs et leurs états. Dans notre présent travail, nous nous limitons à utiliser uniquement des capteurs binaires soit des régions de couverture, ne développant ni ne travaillant sur les régions de mesure. Cependant, les définitions fondées sur les (sous-)régions de couverture sont aisément extensibles aux (sous-)régions de mesure ; étant simplement des régions calculées différemment.

3.3 Représentation des intérêts prioritaires et des capteurs incertains

Afin de proposer une modélisation écologique, nous devons prendre en compte l’importance des éléments et l’incertitude des capteurs. D’une part, il est nécessaire de modéliser les régions d’intérêt par différentes densités afin de représenter leur importance [Chr⁺14][Vla⁺15]. D’autre part, il est nécessaire de considérer un modèle probabiliste de capteurs afin d’éviter une modélisation irréaliste des performances des capteurs, amenant à concevoir un placement sous-optimal [Akb⁺13]. Pour ce faire, nous introduisons respectivement les notions d’Occurrence et de Détectabilité des régions pour qualifier l’efficacité du placement de capteurs.

3.3.1 Généralisation des régions et partitionnement selon les actions

Au préalable de leur définition, nous généralisons la région et précisons notre définition d’un ensemble afin de proposer une modélisation écologique. Cette définition précise est nécessaire aux notions d’Occurrence et de Détectabilité des régions.

3.3.1.1 Généralisation de la région aux éléments multiples

Dans notre définition initiale de la *région* en section 3.1.1, nous n’avons pas clairement statuer sur la quantité des éléments : « un *ensemble* est une collection finie ou infinie, et non-ordonnée d’objets ». Dans les ensembles usuels, les éléments sont uniques (non-multiples) et apparaissent au plus une seule fois. Nous généralisons la notion de région en autorisant plusieurs instances de chaque élément : la région est ainsi un multiensemble ; *e.g.* $\{a, a, b\}$.

Un *multiensemble*²⁰ est une collection finie ou infinie, multiple et non-ordonnée d’objets. Outre ce terme officiel, d’autres dénomination existent incluant : liste, sac, pile voire **ensemble pondéré**²¹ [Knu97]. Nous définissons la *multiplicité* d’un élément étant son nombre d’instance dans un multiensemble donné. Par exemple dans le multiensemble $\{a, a, b\}$, a est de multiplicité 2 et b de multiplicité 1 ; pouvant être noté $\{a^2, b^1\}$.

²⁰ *angl.* multiset ²¹ *angl.* respectivement list, bag, head, weighted set

Formellement pour une région finie \mathcal{R} , son multiensemble est noté (\mathcal{R}, m) tel que $m(e \in \mathcal{R})$ est la fonction de multiplicité renvoyant le cardinal de chaque élément e présent dans la région \mathcal{R} ; $m : \mathcal{R} \rightarrow \mathbb{N}^*$. Par exemple pour le multiensemble $\{a, a, b\}$, nous avons $(\{a, b\}, \{(a, 2), (b, 1)\})$ équivalent à $\{a^2, b^1\}$. Ainsi, toutes nos régions précédemment²² définies sont l'ensemble sous-jacent d'un multiensemble ; *e.g.* pour le multiensemble (\mathcal{R}, m) la région \mathcal{R} est son ensemble sous-jacent.

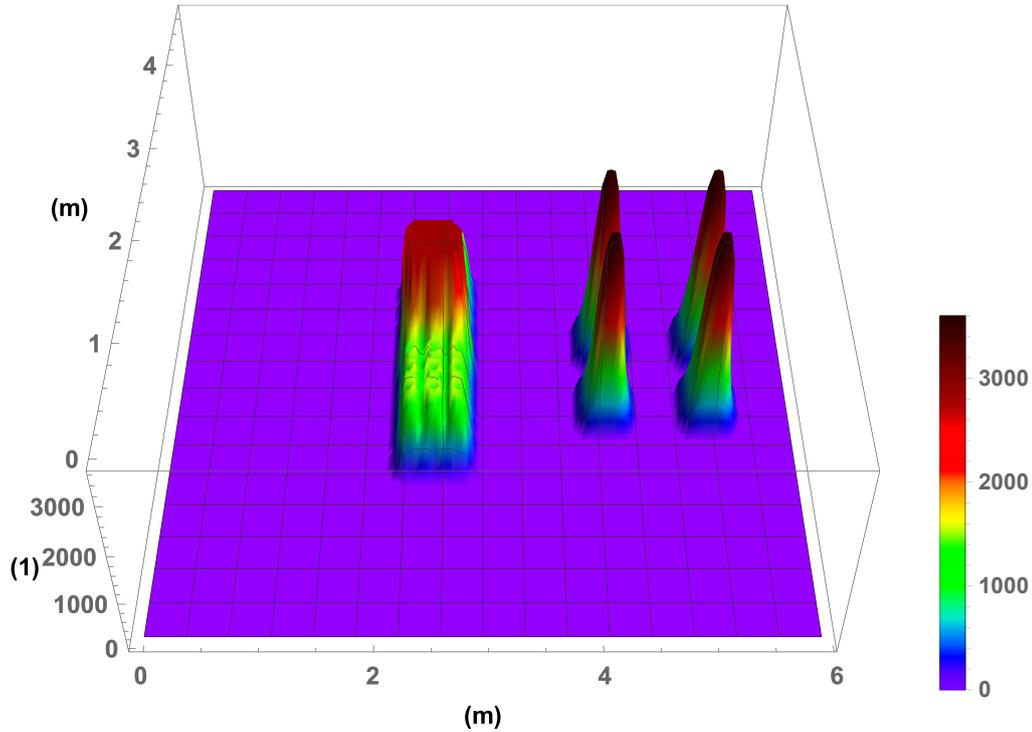


FIGURE 3.10 – Multiensemble d'une région de lieux 2D, dont la 3^e dimension représente la multiplicité des positions 2D ; *cf.* figure 3.1a

De part cette généralisation, nous attribuons une nouvelle propriété aux régions nous permettant de qualifier l'importance d'un élément. À représenter géométriquement pour une région de dimension $d = 2$, il s'agit d'ajouter une 3^e dimension dont la mesure représente la multiplicité ; *cf.* figure 3.10. Par exemple, une carte topographique est une représentation géométrique en général plane mais indiquant les altitudes d'une région terrestre.

3.3.1.2 Région d'action : la région de travail partitionnée selon les actions

Pour chaque élément e , nous pouvons constituer un sous-multiensemble disjoint τ dans le multiensemble de la région \mathcal{R} contenant uniquement les instances de cet élément e , noté τ_e tel que : $\tau_e = \{e, e, \dots\} \mid \mathcal{R} = \bigsqcup_{e \in \mathcal{R}} \tau_e$. Chaque élément du sous-multiensemble τ_e est certes identique $-M(\tau_e) = 1$ pour $\text{Card}(\tau_e) \geq 1$ – mais leur *apparition* peut être liée à des actions différentes. Nous pouvons partitionner cet ensemble τ_e en sous-ensembles (disjoints) liés à une action particulière a_m (*i.e.* noté $\tau_{e|a_m}$), voire liés à plusieurs actions réalisées simultanément (*i.e.* noté $\tau_{e|a_m \cap a_o}$) ; *e.g.* *Ouvrir le robinet pour Se laver les mains et Nettoyer la vaisselle.*²³

²² comprenant les régions d'intérêt, (sous-)régions de couverture, (sous-)régions de mesure et la région de travail

²³ Pour chaque élément e , nous pouvons déterminer sa Précision au regard d'une action a_m , étant la probabilité

Nous définissons la *région d'action* étant l'union de tous ces sous-ensembles liés à une même action, notée \mathcal{A} ; telle que pour une action a_m , $\mathcal{A}_m = \sqcup \tau_{e|a_m}$. Nous définissons l'ensemble des parties de \mathcal{A}_m noté $\mathcal{P}(\mathcal{A}_m)$ étant l'ensemble dont les éléments $\tau_{e|a_m}$ sont les sous-ensembles de \mathcal{A}_m : $\tau_{e|a_m} \in \mathcal{P}(\mathcal{A}_m) \iff \tau_{e|a_m} \subset \mathcal{A}_m$.

Dans le cas simple (sans actions simultanées), il existe dans la région de travail autant d'ensembles qu'il y a d'actions d'intérêt et une action non-d'intérêt²⁴ : soit $M + 1$ ensembles pour M actions. Notre région de travail est ainsi définie par l'union disjointe de ces ensembles, telle que : $\mathcal{T} = \mathcal{A}_0 \sqcup (\sqcup_m \mathcal{A}_m) \mid m \in \mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$. Nous définissons l'ensemble des parties de \mathcal{T} noté $\mathcal{P}(\mathcal{T})$ étant l'ensemble dont les éléments \mathcal{A} sont les sous-ensembles de \mathcal{T} : $\mathcal{A} \in \mathcal{P}(\mathcal{T}) \iff \mathcal{A} \subset \mathcal{T} \mid \mathcal{P}(\mathcal{T}) = \{\mathcal{A}_0, \mathcal{A}_1, \dots, \mathcal{A}_M\}$.

Ce partitionnement de la région de travail selon les actions permet la qualification de la pertinence des éléments vis-à-vis de l'action à travers la notion d'*Occurrence* des régions.

3.3.2 Occurrence et Détectabilité des régions

À partir de ces nouvelles notions, nous définissons deux notions utiles pour qualifier le réseau de capteurs : l'*Occurrence* pour les régions de travail et d'intérêt, et la *Détectabilité* pour la région de couverture.

3.3.2.1 Occurrence des régions de travail et d'intérêt

Au sein de la région de travail, certains éléments sont plus importants que d'autres, étant plus usités par la personne et décrivant ainsi des sous-régions à plus forte densité. Cette importance quantifiable est dénommée *Occurrence*. Il s'agit du fait –ou fréquence²⁵– que cet élément apparaisse. Par exemple, le graphique circadien –représentant le rythme circadien des activités d'une personne– dénombre, au travers de l'utilisation des capteurs étendue sur plusieurs jours, cette occurrence des éléments par mesure ; cf. section 2.2.2.3 et figure 2.4.

Par définition, la région d'intérêt est l'ensemble des éléments possibles pour la réalisation de l'action. L'*Occurrence* de la région d'intérêt reflète les préférences des éléments de la personne ; qu'il s'agisse de positionnements ou d'utilisations préférentielles. Tous les éléments de la région d'intérêt sont possibles, or certains sont plus intéressants à capter que d'autres, ou plus néfastes à ne pas capter, voire plus néfastes à capter par les régions de couverture²⁶. Ces effets dépendent de l'*Occurrence* des éléments et vis-à-vis de l'action : un même élément e peut concerner plusieurs actions, avec des importances différentes selon celles-ci. Bien qu'un élément e est très important pour une action, il peut l'être voire plus pour une autre action. L'*Occurrence* permet de quantifier cette importance vis-à-vis d'une action donnée.

Nous définissons l'*Occurrence*²⁷ d'un élément e étant sa multiplicité sous conditions d'action, notée $\text{Occ}(e)$; telle que $\text{Occ}(e) = \text{Card}(\tau_e) \geq 0$. Et nous définissons l'*Occurrence* d'une région \mathcal{R} étant la somme des *Occurrences* de ses éléments e sous conditions d'action, notée $\text{Occ}(\mathcal{R}) \geq 0$. Nous avons ainsi pour chaque élément e –ou région \mathcal{R} – sa multiplicité : en général notée $\text{Occ}(e)$, pour une action spécifique a notée $\text{Occ}(e \mid a)$, pour le complément d'une action a notée $\text{Occ}(e \mid \bar{a})$ etc.

conditionnelle suivante : $P(a_m \mid e) = \frac{\text{Card}(\tau_{e|a_m})}{\text{Card}(\tau_e)} = \frac{P(a_m \cap e)}{P(e)}$. Cette probabilité qualifie pour tous les éléments e , quelle est sa proportion concernant l'action d'intérêt a_m ; cf. section 4.2.2.

²⁴ tous les autres actions sont regroupées en un seul ensemble

²⁵ non au sens hertzien, mais étant son nombre d'apparition ²⁶ respectivement les vrais positifs, faux négatifs et faux positifs ; cf. évaluation de la fiabilité en chapitre 4 ²⁷ angl. Occurrence

La signification de l'Occurrence d'un élément (ou son unité) dépend de la caractéristique de l'action à laquelle il est associé, définissant la nature de sa région : *e.g.* région de lieux, région d'interactions ; *cf.* section 3.1.1.1. Pour des régions de lieux, l'Occurrence d'un élément est similaire à son *nombre de visite*²⁸ ; *cf.* [Vla⁺15]. L'Occurrence –des éléments– d'une région \mathcal{R} consiste à intégrer sur la région \mathcal{R} la fonction d'occurrence $\text{Occ}(e)$ pour une action a . Pour une région \mathcal{R} de lieux, nous avons :

$$\begin{aligned} \text{Occ}(\mathcal{R} | a) &= \iint_{\mathcal{R}} \text{Occ}(e | a) dx dy = \iint_{\mathcal{R}} \text{Card}(\tau_{e|a}) dx dy & | \text{Dim}(R) = 2 \\ \text{Occ}(\mathcal{R} | a) &= \sum_{e \in \mathcal{R}} \text{Occ}(e | a) = \sum_{e \in \mathcal{R}} \text{Card}(\tau_{e|a}) & | \text{Dim}(R) = 0 \end{aligned}$$

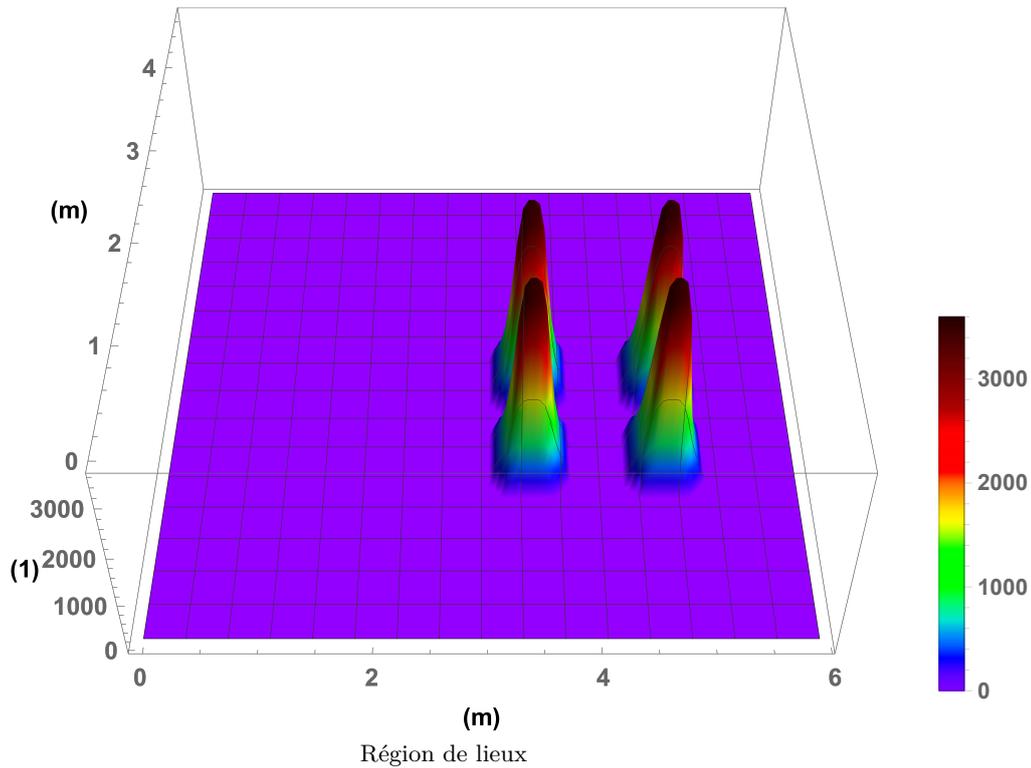


FIGURE 3.11 – Illustration de l'Occurrence de la Table en figure 3.1, représentant le nombre de visite de ces positions (caractéristique de lieu)

Par exemple, pour l'action *Regarder la télévision* nous pouvons instrumenter tous les lieux possibles de visionnage, notamment les chaises de la table à manger ; illustré en figure 3.11. Lorsque ces chaises sont instrumentées, nous avons soit une utilisation pour l'action *Regarder la Télévision* a_{rtv} , soit pour l'action *S'asseoir à table* a_{sat} , soit pour d'autres actions non-d'intérêt a_{ni} . L'Occurrence en général $\text{Occ}(e)$ rassemble en totalité les actions : $\text{Occ}(e) = \text{Occ}(e | a_{rtv}) + \text{Occ}(e | a_{sat}) + \text{Occ}(e | a_{ni})$. En évaluant l'Occurrence pour l'action *Regarder la Télévision* a_{rtv} , nous pouvons déterminer la probabilité de *Regarder la Télévision* sachant la région d'intérêt : $P(a_{rtv} | \mathcal{I}) = \text{Occ}(\mathcal{I} | a_{rtv}) / \text{Occ}(\mathcal{I}) = \frac{\text{Card}(a_{rtv} \cap \mathcal{I})}{\text{Card}(\mathcal{I})} \in [0 ; 1]$; correspondant à la **Précision**²⁹ de la région d'intérêt au regard de cette action.

Ainsi, une *région d'intérêt* \mathcal{I}_m collecte les éléments dont la multiplicité pour l'action a_m n'est pas nulle : $\mathcal{I}_m | \forall e \in \mathcal{I}_m, \text{Occ}(e | a_m) > 0$.

²⁸ *angl.* visited count ²⁹ définie formellement en section 4.1.2.1

3.3.2.2 Détectabilité des régions de couverture

Par ailleurs, la région de couverture définit l'ensemble des positions possibles pouvant être détectées par le capteur S . En son sein, certains éléments sont plus aisément détectés que d'autres. Cette capacité quantifiable est dénommée *Détectabilité*. Il s'agit de la probabilité que cet élément soit détecté par le capteur.

La *Détectabilité* de la région de couverture reflète les performances de détection du capteur mettant en exergue les dispositions optimales d'acquisition du capteur ; qu'il s'agisse d'informations de positionnements (région de lieux³⁰) ou d'utilisations (région d'interactions³⁰). Tous les éléments de la région de couverture sont détectables, or certains sont plus précis à capter que d'autres. De plus, si élément est couvert par plusieurs capteurs, il peut suffire qu'il soit détecté par au moins un capteur, renforçant ainsi sa *détectabilité*.

Nous définissons la *Détectabilité*³¹ d'un élément e étant sa probabilité de détection sous conditions de capteur(s), notée $\text{Dec}(e)$; telle que $\text{Dec}(e) \in [0 ; 1]$. Nous avons ainsi pour chaque élément e sa probabilité de détection : pour un capteur S notée $\text{Dec}(e | S)$, pour plusieurs capteurs $S_{j \in \mathcal{J}}$ notée $\text{Dec}(e | \bigcap_{j \in \mathcal{J}} S_j)$ etc.

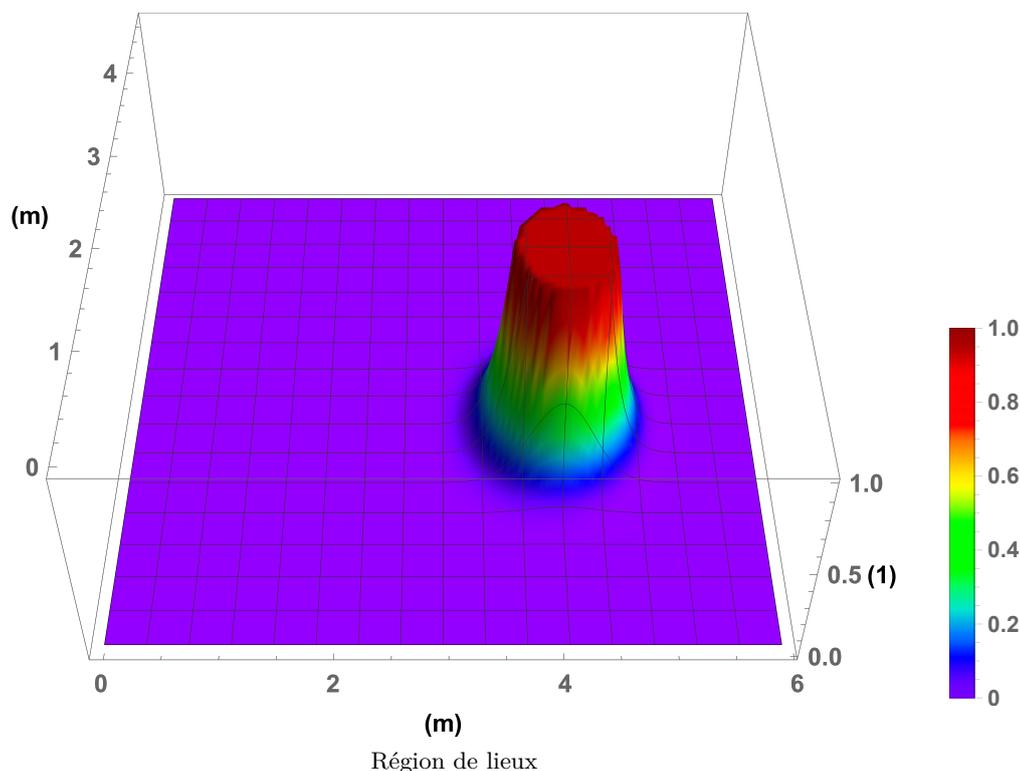


FIGURE 3.12 – Illustration de la *Détectabilité* du Capteur 2 en figure 3.1

Par exemple, pour l'action *S'asseoir à table* nous pouvons installer différents capteurs de présence au dessus de chaque chaise autour de la table. Lorsque ces capteurs s'intersectent dans une région d'intérêt, définissant idéalement de nouvelles régions épousant la région d'intérêt, nous avons une détection des éléments pour soit un premier capteur S_1 , soit un deuxième capteur S_2 , soit ces deux capteurs $S_1 \cap S_2$ etc. ; cf. section 3.1.3. En évaluant la *Détectabilité* pour chaque élément de cette intersection de régions, nous pouvons déterminer la probabilité de *Détecter l'élément*

³⁰ pour les différentes caractéristique de l'action, la nature de la région s'adapte ; cf. section 3.1.1.1

³¹ angl. Detectability

par la sous-région de couverture c sachant l'élément e : $P(c | e) = \text{Dec}(e | c) = \frac{\text{Card}(c \cap e)}{\text{Card}(e)} \in [0 ; 1]$; correspondant à la **Sensibilité**³² de la sous-région de couverture au regard de chaque élément.

Ainsi, une *région de couverture* \mathcal{C}_k collecte les éléments dont la probabilité de détection par le capteur S_k n'est pas nulle : $\mathcal{C}_k | \forall e \in \mathcal{C}_k, \text{Dec}(e | S_k) \in]0 ; 1]$. Par ailleurs, une *sous-région de couverture* c collecte les éléments dont la probabilité de détection par ses capteurs associés n'est pas nulle : il est nécessaire de combiner les Détectabilités des régions de couverture s'y intersectant afin de calculer sa Détectabilité effective.

3.3.2.3 Combinaison des Détectabilités

Afin de calculer chaque Détectabilité des sous-régions de couverture formées par le placement de capteurs, nous introduisons le *principe d'inclusion-exclusion*. Nous appliquons le principe d'inclusion-exclusion uniquement entre les capteurs et leurs régions de couverture associées à la sous-région de couverture.

Principe d'inclusion-exclusion Le *principe d'inclusion-exclusion* (ou formule du crible) permet de calculer « le cardinal d'une réunion finie d'ensembles finis en fonction du cardinal de ces ensembles et de leurs intersections » ; cf. équation 3.1. Il se traduit directement en termes de probabilités, où les \mathcal{A}_i représentent des événements (au lieu des ensembles).

$$M\left(\bigcup_{i=1}^n \mathcal{A}_i\right) = \sum_{k=1}^n \left((-1)^{k-1} \sum_{\substack{I \subset \{1, \dots, n\} \\ \text{Card}(I)=k}} M\left(\bigcap_{i \in I} \mathcal{A}_i\right) \right) \quad (3.1)$$

Par ailleurs, pour des probabilités $\{P(\mathcal{A}_1), \dots, P(\mathcal{A}_n)\}$ indépendantes, la formule générale du principe d'inclusion-exclusion (3.1) se simplifie en :

$$P\left(\bigcup_{i=1}^n \mathcal{A}_i\right) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(\mathcal{A}_i)) \quad (3.2)$$

Par exemple, pour $n = 2$ ensembles, la formule du principe d'inclusion-exclusion est :

$$M\left(\bigcup_{i=1}^2 \mathcal{A}_i\right) = M(\mathcal{A}_1) + M(\mathcal{A}_2) - M(\mathcal{A}_1 \cap \mathcal{A}_2)$$

Ainsi, nous avons intégré de nouvelles propriétés à nos régions afin d'améliorer notre modélisation, afin qu'elle soit plus écologique. Ces notions d'Occurrence et de Détectabilité sont primordiales afin d'améliorer la qualité de l'évaluation du réseau de capteurs.

3.4 Aspects techniques du modèle

Du modèle des régions ci-proposé, de nombreuses interrogations subsistent concernant son application pour le placement de capteurs. Nous éclaircissons certains aspects techniques nécessaires au préalable pour l'implémentation et l'utilisation du modèle : la gestion de l'environnement 3D, les caractéristiques de l'action, et la volumétrie de la personne.

³² définie formellement en section 4.1.2.1

3.4.1 Dimension de travail

Bien que nous illustrons nos régions de lieux au sein du domicile en 2D, notre modèle est compatible et applicable quelle que soit la dimension de travail $d = \text{Dim}(\mathcal{T})$; *cf.* section 3.1.1.2. En réalité, la dimension de travail est imposée par l'implémentation du modèle : les bibliothèques et outils utilisés, les choix et contraintes de modélisation. Dans cette thèse, nous avons choisi de travailler en 2D afin d'implémenter et d'illustrer simplement la méthodologie proposée. Notre choix d'implémentation et d'illustration ne doit en aucun cas desservir la généralité d'application de notre modèle à des espaces de dimensions autres ; *e.g.* 0D, 1D, 3D, 4D.

Par conséquent, notre méthodologie est applicable en 3D mais son implémentation nécessite d'utiliser ou de développer des bibliothèques et outils compatibles avec la dimension de travail souhaitée.

3.4.2 Caractéristiques de l'action

Dans le chapitre 2, nous avons caractérisé l'action simplement par un lieu, une interaction et une temporalité ; *cf.* section 2.2.2. Bien que nos illustrations de régions se focalisent sur la caractéristique de lieu des actions (à dessein de clarté), notre modèle des régions est compatible et applicable quelle que soit la caractéristique de l'action ; *cf.* section 3.1.1.1. En réalité, un ensemble peut être illustré par un diagramme de Venn permettant de représenter graphiquement/géométriquement par diagramme toutes les relations logiques possibles d'une collection finie d'ensembles ; *e.g.* N et K finis. En terme de lieu, la représentation géométrique (*i.e.* nos illustrations) équivaut directement à un diagramme de Venn : les représentations graphiques sont facilement compréhensibles par l'humain et favorisent l'assimilation de nos concepts.

Par conséquent, notre méthodologie est applicable à d'autres caractéristiques que celle illustrée (*i.e.* lieu), et surtout que celles considérées dans cette thèse.

3.4.3 Volumétrie de la personne

Implicitement, nous considérons que les capteurs acquièrent une ou plusieurs information(s) ponctuelle(s). En terme de lieu, la personne est caractérisée par une position unique : nos capteurs pouvant acquérir directement cette position particulière, conceptuellement appelée *modèle-point*.

Or, bien que nous puissions caractériser la personne par la position de son centre de gravité (voire une projection de celui-ci au sol $\text{Dim}(\mathcal{R}) = 2$), la quasi-majorité des capteurs de positions (*e.g.* de présence, distance, angle, caméra) ne peuvent acquérir directement cette information. De fait, ils acquièrent la position de l'élément appartenant à la personne (après un éventuel traitement de données) en visibilité directe de leur *centre* d'acquisition, qui est la position la plus proche de celui-ci. De plus, la personne est constituée d'un ensemble de positions, décrivant une région et pouvant être approximée au plus simple par une forme ellipsoïdale. En majorité, nos capteurs acquièrent ainsi –une position de– l'enveloppe de l'humain, soit l'ensemble frontière de cette région.

Par conséquent, cette région structurante influe sur la région de couverture et les régions de mesure des capteurs.

3.4.3.1 Somme de Minkowski

Une solution, employée en Robotique pour la navigation dans un environnement rempli d'obstacles, est d'utiliser la *somme de Minkowski*³³. Issue du domaine de la Morphologie Mathématique, il s'agit de réaliser une *dilatation* de la région à partir d'une région structurante (ou élément structurant) afin d'étendre la "*forme*" de cette première région.

En Robotique mobile, elle est utilisée afin de calculer un chemin viable pour se déplacer et atteindre une position cible. La région structurante représente la forme géométrique du robot : en dilatant chaque région obstacle de l'environnement, un nouvel environnement est déterminé au sein duquel le robot est ramené à une unique position, sans épaisseur. Par conséquent, l'exploration des chemins est facilitée en travaillant uniquement avec une seule position. Par ailleurs, la forme du robot est généralement grossie afin de s'assurer de sa manœuvrabilité ; celle-ci pouvant être considérée circulaire afin de pouvoir aisément³⁴ franchir les obstacles.

3.4.3.2 Application à la conception

Appliquée, la somme de Minkowski permet de calculer une nouvelle région de couverture prenant en compte la morphologie de la personne ; *e.g.* ellipsoïdale. Or, nous devons être précis dans la définition de cette région structurante. Il est nécessaire de déterminer ce que le capteur peut détecter de l'humain : détectera-t-il sa main ou son épaule alors que la personne est *hors-champ* ?

Bien que la somme de Minkowski nous permette d'utiliser le modèle point, tous les éléments corporels ainsi compressés en un même point ne sont pas pertinents, engendrant des erreurs de détection³⁵. Ces erreurs s'avèrent difficiles à anticiper ou à améliorer lors de la conception. Elles sont dues à une *mauvaise interprétation des informations captées*, et relèvent du module de reconnaissance d'activité en aval. Seul celui-ci est en capacité d'écarter ces erreurs de détection³⁵. Nous nous abstrayons ainsi d'intégrer ces erreurs³⁵ dans notre modélisation, mais nous gardons à l'esprit leur existence future.

Par ailleurs, utiliser la somme de Minkowski implique de modifier voire créer artificiellement des Détectabilités pour chaque élément nouvellement ajouté à la région de couverture : est-elle une simple prolongation ou suit-elle une fonction précise ? De fait, il est nécessaire de modéliser l'influence de la forme de la personne sur la Détectabilité du capteur. Cette modélisation nécessite des analyses précises de la physique du capteur et de ses performances, au regard des différentes morphologies. Pour des Détectabilités parfaites, ce cas ne se présente pas. Quoiqu'il en soit, il est nécessaire de bien modéliser le capteur en amont –sa régions de couverture et sa Détectabilité– et de proposer une transformation des régions afin de prendre en compte la personne dans toute sa dimension.

Ainsi, nous gérons la personne dans toute sa dimension en touchant seulement à la création des régions de couverture au travers de la somme de Minkowski. Dans cette thèse, nous considérons que les régions de couverture des capteurs fournies intègrent au préalable la volumétrie de la personne.

Dans ce chapitre, nous développons une représentation des actions et capteurs fondée sur la Théorie des Ensembles : le modèle des régions. Actions et capteurs sont décrits par

³⁴ attrayant à la commandabilité du robot ³⁵ *i.e.* des faux positifs, *cf.* chapitre 4

deux notions de régions étant respectivement la région d'intérêt et la région de couverture. Chaque caractéristique de l'action est décrite par une nouvelle région dédiée, dont la nature est adaptée au besoin. Capteurs binaires et discrétisés sont gérés au sein d'une même représentation grâce aux région de couverture et région de mesure, permettant de fusionner des capteurs hétérogènes aux informations homogènes. Notre modèle des régions offre un cadre représentatif **unifié** (actions et capteurs), **unique** (capteurs hétérogènes, binaires et discrétisés) et **flexible** (différentes caractéristiques de l'action). Il permet une modélisation écologique de la veille à la personne prenant en compte la fusion des informations capteurs, l'importance des régions et l'incertitude des capteurs. À présent, nous devons évaluer le réseau de capteurs afin de quantifier précisément sa qualité pour la veille. Cette deuxième étape de la conception concerne l'évaluation de la fiabilité du réseau de capteurs.

Chapitre 4

Évaluation de la fiabilité du réseau de capteurs

Sommaire

4.1 La matrice de confusion pour l'évaluation de la fiabilité	60
4.1.1 Définition de la matrice de confusion	60
4.1.2 Définition d'un placement de qualité	62
4.1.3 Combinaison des régions de couvertures : fusion d'informations pour une meilleure fiabilité	64
4.2 Évaluation des intérêts prioritaires et des capteurs incertains vis à vis de l'action	67
4.2.1 Efficacité des régions de couverture	67
4.2.2 Redéfinition des informations de confusion	69
4.3 Aspects techniques de l'évaluation	74
4.3.1 Incertitudes de placements et d'estimations	74
4.3.2 Intégration des incertitudes avec l'analyse par intervalles	75

Dans ce chapitre, nous évaluons le *modèle des régions* défini précédemment représentant le problème du placement de capteurs. Nous qualifions la fiabilité du réseau de capteurs au regard de chaque action d'intérêt, étant un compromis entre la **Précision** de l'identification et la **Sensibilité** de la couverture. Il s'agit de quantifier les erreurs d'identification du réseau de capteurs (*e.g.* fausses alarmes) en s'intéressant à la disposition des régions de couverture vis-à-vis de chaque région d'intérêt. Pour ce faire, nous utilisons la **matrice de confusion**, issue du Test d'Hypothèses et utilisée en Classification Statistique [Faw06]. Nous transcrivons ainsi les informations détenues par notre modélisation en régions dans une matrice de confusion.

En réalité, notre modélisation a été conçue (principalement) en vue de cette évaluation, bien qu'elle puisse être utilisée pour évaluer l'incertitude des informations mesurées. Nous développons de manière incrémentale l'évaluation de la fiabilité, conformément à notre présentation du modèle des régions.

4.1 La matrice de confusion pour l'évaluation de la fiabilité

Notre évaluation est fondée sur la notion statisticienne de *matrice de confusion* et sa capacité de comparaison, afin de qualifier les informations captées (effectives) au regard des

informations d'intérêt (à capter absolument). En réalité, les régions d'intérêt et de couverture détiennent des informations précieuses permettant d'évaluer la qualité d'un réseau de capteurs : *i.e.* sa fiabilité. Nous utilisons les outils usités en Test d'Hypothèses et Classification Statistique afin d'extraire ces informations.

Le *Test d'Hypothèses* consiste à évaluer un ensemble de données obtenues notamment par échantillonnage en fonction d'un ensemble synthétisé à partir d'une modélisation. La *Classification Statistique* consiste à identifier la classe d'appartenance d'une nouvelle observation. Elle se base usuellement sur un ensemble d'entraînement contenant des observations (ou instances) dont nous connaissons la classe en amont. Ces deux sous-domaines de la Statistique visent ainsi à comparer des échantillons d'un phénomène considéré avec une modélisation de celui-ci afin de s'assurer que le modèle représente au mieux ce phénomène. Dans le cadre de la veille, les régions d'intérêt et de couverture sont respectivement notre phénomène et notre modèle.

4.1.1 Définition de la matrice de confusion

Une *matrice de confusion*¹ –ou table de confusion– permet de visualiser et de comparer le phénomène considéré et sa modélisation sous forme d'une matrice, pour des échantillons donnés [Faw06].

En colonne nous exprimons le résultat de la prédiction du **modèle** (la classe déterminée) tandis qu'en ligne nous exprimons la condition réelle de l'échantillon du **phénomène** (la classe réelle) ; *e.g.* tableau 4.1. Au croisement d'une condition du phénomène et d'un résultat du modèle, chaque élément du tableau est un nombre entier représentant le total des cas où cette condition et ce résultat sont valides en même temps ; pour des échantillons donnés. Par conséquent, la matrice de confusion quantifie leur total sur l'ensemble des cas pour toutes les combinaisons de conditions et résultats possibles.

Couverture Intérêt	Résultat Positif	Résultat Négatif
Condition Positive	Vrai Positif (VP)	Faux Négatif (FN)
Condition Négative	Faux Positif (FP)	Vrai Négatif (VN)

TABLE 4.1 – Matrice de confusion : intérêt (phénomène) en lignes et couverture (modèle) en colonnes

Pour la veille et notre modélisation en régions, nous sommes dans le cadre du test d'une hypothèse, autrement nommée classification binaire. Notre matrice carrée est ainsi de dimension 2, où les notions d'intérêt et de couverture sont respectivement notre phénomène (action réalisée) et notre modèle (détection effective). Cette matrice définit ainsi quatre combinaisons possibles entre phénomène et modèle, réparties en deux catégories : les erreurs et succès.

¹ *angl.* confusion matrix

4.1.1.1 Informations de confusion : les erreurs et succès de la couverture

La matrice de confusion définit deux types d'erreurs :

1. un **Faux Positif**² ou erreur de type I, noté FP, est une détection du capteur (résultat positif) pour une non-réalisation de l'action (condition négative)
2. un **Faux Négatif**³ ou erreur de type II, noté FN, est une non-détection du capteur (résultat négatif) pour une réalisation de l'action (condition positive)

De manière duale, elle définit deux types de succès :

1. un **Vrai Positif**⁴ ou succès de type I, noté VP, est une détection du capteur (résultat positif) pour une réalisation de l'action (condition positive)
2. un **Vrai Négatif**⁵ ou succès de type II, noté VN, est une non-détection du capteur (résultat négatif) pour une non-réalisation de l'action (condition négative)

Nous appelons les éléments de la matrice de confusion des *informations de confusion*⁶. Une information de confusion représente (selon la dimension de travail) le compte (0D), la longueur (1D), l'aire (2D), le volume (3D) *etc.* **total** de la combinaison associée. Nous rapprochons chaque information de confusion d'une combinaison possible des régions d'intérêt et de couverture, définissant ainsi quatre nouvelles régions.

4.1.1.2 Régions d'information de confusion

En combinant régions d'intérêt et de couverture, nous définissons quatre régions disjointes représentant chacune une information de confusion :

- la **Région Vraie Positive** définie par $\mathcal{VP} = \mathcal{I} \cap \mathcal{C}$
- la **Région Vraie Négative** définie par $\mathcal{VN} = \bar{\mathcal{I}} \cap \bar{\mathcal{C}} = \mathcal{T} \setminus (\mathcal{I} \cup \mathcal{C})$
- la **Région Faux Positive** définie par $\mathcal{FP} = \bar{\mathcal{I}} \cap \mathcal{C} = \mathcal{C} \setminus \mathcal{I}$
- la **Région Faux Négative** définie par $\mathcal{FN} = \mathcal{I} \cap \bar{\mathcal{C}} = \mathcal{I} \setminus \mathcal{C}$

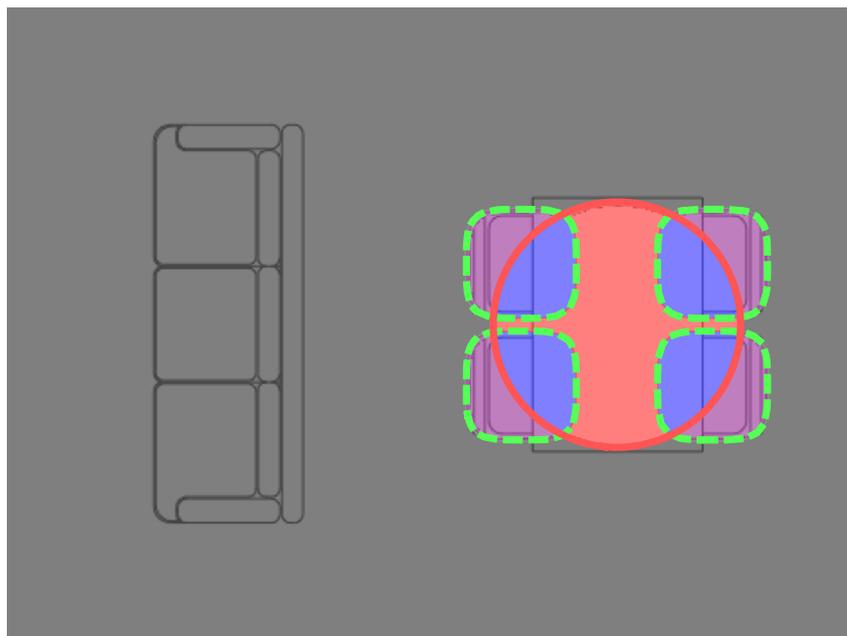
Nous appelons chacune de ces nouvelles régions –regroupant les deux notions duales d'intérêt et de couverture– une *région d'information de confusion*, notées \mathcal{IC} ; cf. figure 4.1. Les quatre régions d'information de confusion sont disjointes et décrivent à elles seules entièrement notre région de travail \mathcal{T} , telles que : $\mathcal{VP} \sqcup \mathcal{VN} \sqcup \mathcal{FP} \sqcup \mathcal{FN} = \mathcal{T}$. Nous définissons l'ensemble des parties de \mathcal{T} noté $\mathcal{P}(\mathcal{T})$ étant l'ensemble dont les éléments \mathcal{IC} sont les sous-ensembles de \mathcal{T} : $\mathcal{IC} \in \mathcal{P}(\mathcal{T}) \iff \mathcal{IC} \subset \mathcal{T} \mid \mathcal{P}(\mathcal{T}) = \{ \mathcal{VP}, \mathcal{VN}, \mathcal{FP}, \mathcal{FN} \}$.

Nous évaluons ainsi chaque information de confusion \mathcal{IC} en mesurant sa région d'information de confusion \mathcal{IC} , telle que :

$$\mathcal{IC} = M(\mathcal{IC}) \mid \mathcal{IC} \in \{ \mathcal{VP}, \mathcal{VN}, \mathcal{FP}, \mathcal{FN} \} \quad (4.1)$$

Par conséquent, l'intérêt de la matrice de confusion réside dans la nature associée à ses éléments les informations de confusion, que nous déterminons directement à partir des régions d'intérêt et de couverture. Par combinaison de ses informations de confusion, nous pouvons évaluer la *qualité* d'un placement.

² angl. False Positive (FP) ³ angl. False Negative (FN) ⁴ angl. True Positive (TP)
⁵ angl. True Negative (TN) ⁶ angl. confusion information (CI)



(a) Régions d'information de confusion

■ Vrai Positif ■ Vrai Négatif ■ Faux Positif ■ Faux Négatif

(b) Légende

FIGURE 4.1 – Illustration des régions d'information de confusion issues des régions en figure 3.1 : \mathcal{VP} en **bleu**, \mathcal{VN} partiellement affiché en gris, \mathcal{FP} en **rouge** et \mathcal{FN} en **violet**

4.1.2 Définition d'un placement de qualité

La conception d'un réseau de capteurs consiste à créer un instrument de mesure pour mesurer l'action : le placement de capteurs doit permettre l'identification de l'action ; cf. section 2.3.3.1. Il est nécessaire de définir la qualité d'un placement en accord avec nos objectifs de veille (*i.e.* régions d'intérêt) et en considérant nos contraintes et choix d'instrumentation (*i.e.* régions de couverture). Par exemple pour l'action *S'asseoir à table*, nous associons la détection d'une présence de la personne au sein de la région de couverture à la réalisation de l'action (à partir de sa région d'intérêt) ; cf. figure 3.1.

Idéalement, nous devons couvrir parfaitement notre région d'intérêt avec notre région de couverture tel que : $\mathcal{C} = \mathcal{I}$. Ainsi, le placement parfait correspond à : $\mathcal{VP} = \mathcal{C}$, $\mathcal{FP} = \mathcal{FN} = \emptyset$ et $\mathcal{VN} = \bar{\mathcal{C}}$. Si la disposition du capteur est mauvaise, alors la région faux positive ou faux négative existe : *i.e.* $\mathcal{FN} \neq \emptyset$ ou $\mathcal{FP} \neq \emptyset$. La région faux positive \mathcal{FP} correspond à une réalisation non-pertinente détectée, tandis que la région faux négative \mathcal{FN} correspond à une réalisation pertinente non-détectée.

Nous définissons qu'un *placement de qualité* est caractérisé par : $M(\mathcal{FP}) \rightarrow 0$ et $M(\mathcal{FN}) \rightarrow 0$, impliquant $M(\mathcal{VP}) \rightarrow M(\mathcal{I})$. Nous identifions ainsi plusieurs sources d'erreurs étant naturellement les faux positifs (ou fausses alertes) et les faux négatifs.

4.1.2.1 Indices de qualité

Dans la littérature en Statistique, de nombreux indices existent pour quantifier différentes qualités du modèle [Sok⁺09]. Ces indices de qualité aux propriétés diverses sont déterminés par

combinaison des informations de confusion. Nous reportons seulement les indices usités dans la littérature en classification binaire ou test d'une hypothèse : *i.e.* la Sensibilité, la Spécificité, la Précision, et la Valeur Prédictive Négative. Bien que ces indices combinent seulement deux informations de confusion, nous pouvons en rapprocher certains de notre définition concrète de la *qualité* d'un placement concernant sa fiabilité ; *cf.* section 2.3.3.3.

Sensibilité⁷ représente la vraisemblance qu'une réalisation soit détectée ; nommée taux de vrai positif⁸, taux de succès⁹ ou rappel¹⁰.

$$\text{Sensibilité} = \frac{VP}{VP + FN} \quad (4.2)$$

Spécificité¹¹ représente la vraisemblance qu'une non-réalisation ne soit pas détectée ; nommée taux de vrai négatif¹².

$$\text{Spécificité} = \frac{VN}{VN + FP} \quad (4.3)$$

Précision¹³ représente la vraisemblance qu'une détection soit exacte ; nommée valeur prédictive positive¹⁴ ou confiance¹⁵.

$$\text{Précision} = \frac{VP}{VP + FP} \quad (4.4)$$

Valeur Prédictive Négative¹⁶ représente la vraisemblance qu'une non-détection soit exacte.

$$\text{Valeur Prédictive Négative} = \frac{VN}{VN + FN} \quad (4.5)$$

La Sensibilité et la Précision sont des indices duaux : ils comparent respectivement les faux négatifs et faux positifs aux vrais positifs. Similairement, la Valeur Prédictive Négative et la Spécificité comparent respectivement les faux négatifs et faux positifs aux vrais négatifs. Idéalement, nous souhaitons que chacun de ces quatre indices soit maximisés à 1 afin d'atteindre notre objectif de qualité. Or, un seul couple de ces indices –Sensibilité et Précision, ou Valeur Prédictive Négative et Spécificité– est nécessaire pour l'évaluation. À dessein de fiabilité, nous optimisons le couple Sensibilité et Précision ; *cf.* section 2.3.3.3.

La Sensibilité mesure la qualité de notre couverture –*i.e.* les exigences de couvertures– et la Précision mesure la performance de l'identification, directement à partir de ce qui doit être véritablement mesuré : les vrais positifs. Nous réunissons ces indices en une seule évaluation appropriée et pratique, représentant la fiabilité du placement de capteurs.

4.1.2.2 Fiabilité du placement de capteurs : la F-mesure

Nous choisissons pour évaluer la fiabilité du placement de capteurs un indice de qualité unique : la *F-mesure*¹⁷. Par définition [Sas07][Pow11], elle est une moyenne harmonique pondérée de la Sensibilité et de la Précision ; *cf.* équation 4.6. Son coefficient réel positif β exprime si nous

⁷ *angl.* sensibility ⁸ *angl.* true positive rate (TPR) ⁹ *angl.* hit rate ¹⁰ *angl.* recall ¹¹ *angl.* specificity

¹² *angl.* true negative rate (TNR) ¹³ *angl.* precision ¹⁴ *angl.* positive predictive value (PPV)

¹⁵ *angl.* confidence ¹⁶ *angl.* negative predictive value (NPV) ¹⁷ *angl.* F-measure

devons favoriser la Sensibilité ($\beta > 1$) ou la Précision ($\beta < 1$).

$$F_{\beta\text{-mesure}} = \frac{(1 + \beta^2) \cdot VP}{(1 + \beta^2) \cdot VP + \beta^2 \cdot FN + FP} \in [0 ; 1] \quad | \quad \beta \in \mathbb{R}^+ \quad (4.6)$$

$$F_{\beta} = (1 + \beta^2) \cdot \frac{\text{Sensibilité} \cdot \text{Précision}}{\beta^2 \cdot \text{Précision} + \text{Sensibilité}}$$

Les F-mesures courantes sont $F_{\beta=1}$, $F_{\beta=2}$ et $F_{\beta=0,5}$: $F_{\beta=1}$ accorde autant d'importance aux deux indices, tandis que $F_{\beta=2}$ met plus d'emphase sur la Sensibilité que sur la Précision, contrairement à $F_{\beta=0,5}$.

Des vrais négatifs importants voire inconnus La F-mesure est utilisée en Recherche d'Information¹⁸, domaine où les vrais négatifs sont très nombreux voire inconnus, et de ce fait ne sont pas requis [Hri⁺05]. Similairement en placement de capteurs, la région de travail est vaste comparée à n'importe quelle région d'intérêt. Ainsi, la F-mesure permet d'éviter toute inflation de l'indice de qualité qui aurait éclipsé les améliorations des valeurs des vrais positifs, faux positifs ou faux négatifs.

Par exemple, nous avons calculé en table 4.2 les informations de confusion et les F-mesures (à $\beta = 1$) pour les régions d'intérêt et de couverture en figure 3.1 ; où *resp.* $VP = M(\mathcal{VP})$, $VN = M(\mathcal{VN})$, $FP = M(\mathcal{FP})$ et $FN = M(\mathcal{FN})$. Dans le cadre de notre appartement normalisé en figure 2.5, nous dénotons que les vrais négatifs sont 30¹⁹ à 40²⁰ fois importants que le cumul des vrais positifs, faux positifs et faux négatifs.

	$F_{\beta=1}$	Vrai Positif	Vrai négatif	Faux Positif	Faux Négatif
Canapé	0,7218	1,0340	60,670	0,3447	0,4525
Table	0,5297	0,5394	61,000	0,5201	0,4376

TABLE 4.2 – F-mesure et informations de confusion (en m²) de la (figure 3.1)

F-mesure : une approximation de la fiabilité Par ailleurs, en Recherche d'Information, la F-mesure est utile pour évaluer la fiabilité d'une référence étalon²¹ issue d'experts [Hri⁺05], lorsque que les vrais négatifs sont très nombreux voire inconnus. De plus, elle est appropriée pour quantifier la fiabilité relative²² [Kim⁺08], étant l'évaluation de la concordance des mesures entre différents observateurs ; *i.e.* entre la région d'intérêt et les régions de couverture.

Ainsi, nous utilisons la F-mesure en tant qu'approximation de la **fiabilité** du réseau de capteurs, au regard d'une action donnée. Nous cherchons à qualifier si notre placement de capteurs –*i.e.* ses régions de couverture résultantes– concorde avec les objectifs de veille –*i.e.* les régions d'intérêt– issues d'experts et constituant notre référence étalon. En accordant le placement de capteurs à cette référence étalon, nous concevons un réseau fiable minimisant les erreurs d'identification : les faux positifs et les faux négatifs.

4.1.3 Combinaison des régions de couvertures : fusion d'informations pour une meilleure fiabilité

Utilisant plusieurs capteurs, nous souhaitons considérer au mieux le potentiel d'acquisition des capteurs afin d'affiner notre évaluation de la fiabilité. Il s'agit de considérer la fusion des

¹⁸ *angl.* Information Retrieval ¹⁹ pour la table ²⁰ pour le canapé ²¹ *angl.* gold standard

²² *angl.* interrater reliability

informations des capteurs : *i.e.* les sous-régions de couverture ; où le calcul des informations de confusion –nécessaires à la F-mesure– est fondé sur les régions de couverture.

4.1.3.1 Définition augmentée des régions d'information de confusion

À partir des sous-régions de couverture, nous définissons plus précisément les régions d'information de confusion. En réalité, les sous-régions importantes sont celles qui intersectent la région d'intérêt. Les autres régions, disjointes avec la région d'intérêt \mathcal{I} , ne contribuent qu'à la région d'information de confusion \mathcal{VN} . Seules les sous-régions de couverture c non-disjointes avec la région d'intérêt \mathcal{I} influent sur les régions d'information de confusion \mathcal{VP} , \mathcal{FP} et \mathcal{FN} .

Pour une action a_m et sa région d'intérêt \mathcal{I}_m , nous posons \mathcal{N}_m un sous-ensemble de \mathcal{N} , regroupant l'ensemble des sous-régions de couverture intéressantes pour l'action particulière a_m , telle que chaque sous-région de couverture c_n de cet ensemble s'intersecte avec la région d'intérêt \mathcal{I}_m (liée à l'action a_m) : $\forall n \in \mathcal{N}_m, c_n \cap \mathcal{I}_m \neq \emptyset$. Nous définissons l'ensemble des parties $\mathcal{P}(c_{\mathcal{N}_m})$ étant l'ensemble dont les éléments c_n sont les sous-ensembles de $c_{\mathcal{N}_m}$: $c_n \in \mathcal{P}(c_{\mathcal{N}_m}) \iff c_n \subset c_{\mathcal{N}_m} \mid \mathcal{I}_m \subset c_{\mathcal{N}_m}$. Par conséquent, l'ensemble des parties $\mathcal{P}(c_{\mathcal{N}_m})$ est un partitionnement grossier mais possiblement englobant de la région d'intérêt \mathcal{I}_m en sous-régions de couverture c .

Ainsi, nous avons :

$$\begin{aligned}\mathcal{VP}(\mathcal{I}_m) &= \mathcal{I}_m \cap c_{\mathcal{N}_m} \\ \mathcal{VN}(\mathcal{I}_m) &= \bar{\mathcal{I}}_m \setminus c_{\mathcal{N}_m} \\ \mathcal{FP}(\mathcal{I}_m) &= \bar{\mathcal{I}}_m \cap c_{\mathcal{N}_m} \\ \mathcal{FN}(\mathcal{I}_m) &= \mathcal{I}_m \setminus c_{\mathcal{N}_m}\end{aligned}\tag{4.7}$$

avec $c_{\mathcal{N}_m} = \bigsqcup_{n \in \mathcal{N}_m} c_n$, et $a_m \implies \mathcal{I}_m$.

4.1.3.2 Amélioration de la fiabilité : choix des sous-régions pertinentes

Toutes les sous-régions de couverture –regroupées dans l'ensemble des parties $\mathcal{P}(c_{\mathcal{N}_m})$ – ne sont pas pertinentes pour la veille à l'action a_m . Si $\mathcal{P}(c_{\mathcal{N}_m})$ propose un partitionnement grossier en sous-régions de couverture c_n de la région d'intérêt \mathcal{I}_m , des éléments de certaines sous-régions de couverture constituent des faux positifs contribuant à la région d'information de confusion $\mathcal{FP}(\mathcal{I}_m)$. De plus, si $\mathcal{P}(c_{\mathcal{N}_m})$ propose un partitionnement non-englobant en sous-régions de couverture c_n de la région d'intérêt \mathcal{I}_m , des éléments non-couverts de la région d'intérêt constituent des faux négatifs contribuant à la région d'information de confusion $\mathcal{FN}(\mathcal{I}_m)$. Or, la région d'intérêt ne peut-être partitionnée au delà des sous-régions de couverture, c'est-à-dire au niveau de leurs éléments. Nous devons nous contenter des sous-régions de couverture possibles pour couvrir au mieux chaque région d'intérêt.

Nous choisissons judicieusement les sous-régions de couverture pertinentes en maximisant la F-mesure F_β : il s'agit de déterminer les sous-régions de couverture optimales, soit l'ensemble des parties $\mathcal{P}(c_{\mathcal{N}_m})$ optimal. Nous procédons ainsi à une optimisation du réseau de capteurs de sorte à déterminer les sous-régions de couverture –soit la combinaison de capteurs– offrant la meilleure F-mesure. Nous définissons l'ensemble des parties $\mathcal{P}(c_{\mathcal{N}_m})$ étant l'ensemble dont les éléments c_n contribuent à maximiser la F-mesure F_β pour l'action a_m : $c_n \in \mathcal{P}(c_{\mathcal{N}_m}) \iff c_n \subset c_{\mathcal{N}_m} \mid c_{\mathcal{N}_m} \subset \mathcal{C}_{all}$. Par extension, \mathcal{N}_m est l'ensemble des indices n (liés à une sous-régions de couverture) maximisant la F-mesure pour une action a_m .

Ainsi, nous avons :

$$\begin{aligned} & \max_{\mathcal{P}(c_{\mathcal{N}_m})} F_{\beta}(\mathcal{I}_m, \mathcal{P}(c_{\mathcal{N}_m})) \\ & \text{sachant } \mathcal{P}(c_{\mathcal{N}_m}) \subset \mathcal{P}(\mathcal{C}_{all}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

En figure 4.2, nous illustrons les sous-régions de couverture maximisant la F-mesure ; issues des régions de couverture en figure 3.4. En tableau 4.3, nous reportons les F-mesures et informations de confusion correspondantes. En terme de couverture, nous pouvons ainsi approximer chaque région d'intérêt par $\mathcal{I}_1 \approx c_{\{1\}} = c_1 = \mathcal{C}_1 \setminus \mathcal{C}_2$ et $\mathcal{I}_2 \approx c_{\{4,6\}} = c_4 \cup c_6 = (\mathcal{C}_1 \cap \mathcal{C}_2 \cap \mathcal{C}_3) \sqcup (\mathcal{C}_3 \setminus \mathcal{C}_2)$, afin d'en déterminer l'expression logique associée à leur action respective : $\mathbf{a}_1 \hat{=} c_1 = \mathcal{C}_1 \cdot \overline{\mathcal{C}_2}$ et $\mathbf{a}_2 \hat{=} c_4 + c_6 = (\mathcal{C}_1 \cdot \mathcal{C}_2 \cdot \mathcal{C}_3) + (\mathcal{C}_3 \cdot \overline{\mathcal{C}_2})$; cf. section 3.1.3.3.

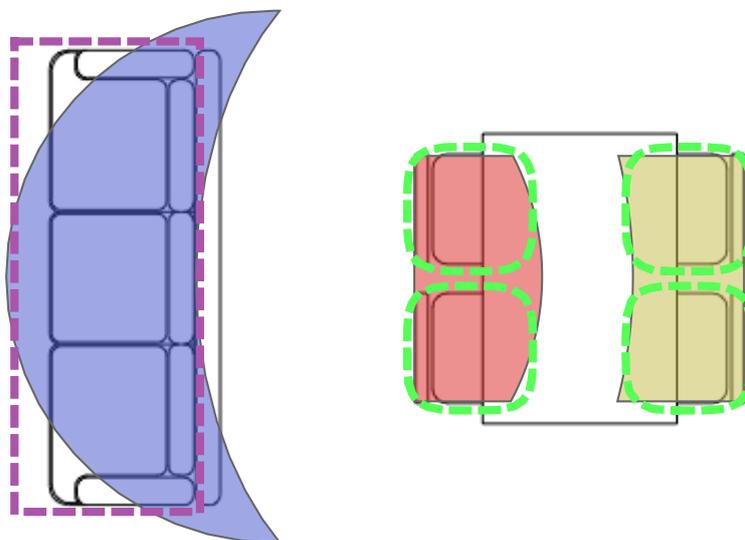


FIGURE 4.2 – Illustration de sous-régions de couverture maximisant la F-mesure ; pour le canapé (région en **bleu**) et la table (régions en **rouge** et en **jaune**)

	$\mathbf{F}_{\beta=1}$	Vrai Positif	Vrai Négatif	Faux Positif	Faux Négatif
Canapé	0,8268	1,2036	60,792	0,2212	0,2831
Table	0,8910	0,8754	61,410	0,1032	0,1111

TABLE 4.3 – F-mesure et informations de confusion (en m²) de la (figure 4.2)

Notre évaluation de la fiabilité, la F-mesure, est ainsi le résultat d'une pré-optimisation des sous-régions de couverture à sélectionner afin de considérer au mieux le potentiel d'acquisition des capteurs. Cette sélection *optimale* des sous-régions de couverture nous permet de déterminer pour chaque action, l'expression logique associée à sa vraisemblable réalisation. Ces expressions sont importantes pour le module en aval de reconnaissance d'activité, qu'elles en servent de base (*i.e.* approches axées données) ou qu'elles en soient le cœur (*i.e.* approches axées connaissances). Dès la conception, les actions et leurs capteurs pertinents sont liés automatiquement.

Ainsi, notre évaluation par matrice de confusion est fondée sur un critère **pertinent** (pour notre conception) et **éprouvé** (par la littérature), évaluant les exigences de couvertures (Sensibilité) et les performances d'identification (Précision) : la F-mesure. Elle permet d'approximer la fiabilité du réseau de capteurs, et de déterminer optimalement au préalable l'expression logique de capteurs associée à chaque action. Après l'introduction de ces notions clés, nous augmentons notre évaluation de sorte à pouvoir prendre en compte l'importance des éléments (Occurrence) et l'incertitude des capteurs (Déteçtabilité).

4.2 Évaluation des intérêts prioritaires et des capteurs incertains vis-à-vis de l'action

Afin de proposer une modélisation écologique, notre modèle des régions considère l'importance des éléments et l'incertitude des capteurs : nommées respectivement *Occurrence* et *Déteçtabilité* ; cf. section 3.3. De plus, en certaines régions, nous pouvons déterminer une unique mesure combinant Occurrence et Déteçtabilité : l'*Efficacité* des régions. Il est nécessaire d'intégrer ces notions à notre évaluation afin de qualifier le réseau de capteurs au regard des objectifs et contraintes de la veille.

4.2.1 Efficacité des régions de couverture

Les mesures des régions d'intérêt et de couverture –ainsi que de leur compléments– représentent des notions différentes, or ces régions s'intersectent dans la région de travail. L'intersection d'une région d'intérêt \mathcal{I} et d'une région de couverture \mathcal{C} représente l'ensemble des éléments pertinents qui seront déteçtés, tandis que l'intersection d'une région d'intérêt complémentaire $\bar{\mathcal{I}}$ et d'une région de couverture \mathcal{C} représente l'ensemble des éléments non-pertinents qui seront déteçtés. De fait, ces éléments appartiennent respectivement soit à la région d'information de confusion des vrais positifs \mathcal{VP} , soit à celle des faux positifs \mathcal{FP} . En leur sein, certains éléments sont plus fréquemment et plus aisément déteçtés que d'autres : nous avons pour chaque élément une moyenne d'occurrence de l'élément déteçté. Cette moyenne d'importance et de capacité est dénommée *Efficacité*.

L'Efficacité de la région vrai positif \mathcal{VP} ou de la région faux positif \mathcal{FP} reflète l'importance des éléments tels qu'ils seront bien mesurés par le réseau de capteurs, non leur importance réelle (étant l'Occurrence) ; qu'il s'agisse de positionnements ou d'utilisations²³. Tous les éléments sont possibles et déteçtables, or certains sont plus intéressants et précis à capter (vrais positifs), plus intéressants et médiocres à capter (faux négatifs), plus néfastes et précis à ne pas capter (faux positifs), voire plus néfastes et médiocres à ne pas capter (faux positifs). En terme de conception, il s'agit de favoriser ces deux premiers et d'éviter ces deux derniers. Par ailleurs, nous pouvons déterminer le complément à l'Efficacité étant l'importance des éléments tels qu'ils seront mal mesurés par le réseau de capteurs.

Nous définissons l'*Efficacité*²⁴ d'un élément e étant le produit de son Occurrence et de sa Déteçtabilité sous conditions d'action et de capteur(s), notée $\text{Eff}(e) \in [0 ; \text{Occ}(e)]$; cf. équation 4.9. Nous définissons l'*Efficacité* d'une région \mathcal{R} étant la somme des *Efficacités* de ses éléments e sous conditions ; notée $\text{Eff}(\mathcal{R}) \in [0 ; \text{Occ}(\mathcal{R})]$. Nous avons ainsi pour chaque élément e –ou région \mathcal{R} – son efficacité : en général pour un capteur S notée $\text{Eff}(e | S)$, pour une action spécifique a et pour un capteur S notée $\text{Eff}(e | a, S)$, en général pour plusieurs capteurs $S_{j \in \mathcal{J}}$

²³ pour les différentes caractéristique de l'action, la nature de la région s'adapte ; cf. section 3.1.1.1

²⁴ angl. Efficiency

notée $\text{Eff}(e \mid \bigcap_{j \in \mathcal{J}} S_j)$, pour une action spécifique a et pour plusieurs capteurs $\text{Eff}(e \mid a, \bigcap_{j \in \mathcal{J}} S_j)$ etc.

$$\text{Eff}(e \in \mathcal{R} \mid a, S) = \text{Occ}(e \in \mathcal{R} \mid a) \cdot \text{Dec}(e \in \mathcal{R} \mid S) \in [0 ; \text{Occ}(e \in \mathcal{R} \mid a)] \quad (4.9)$$

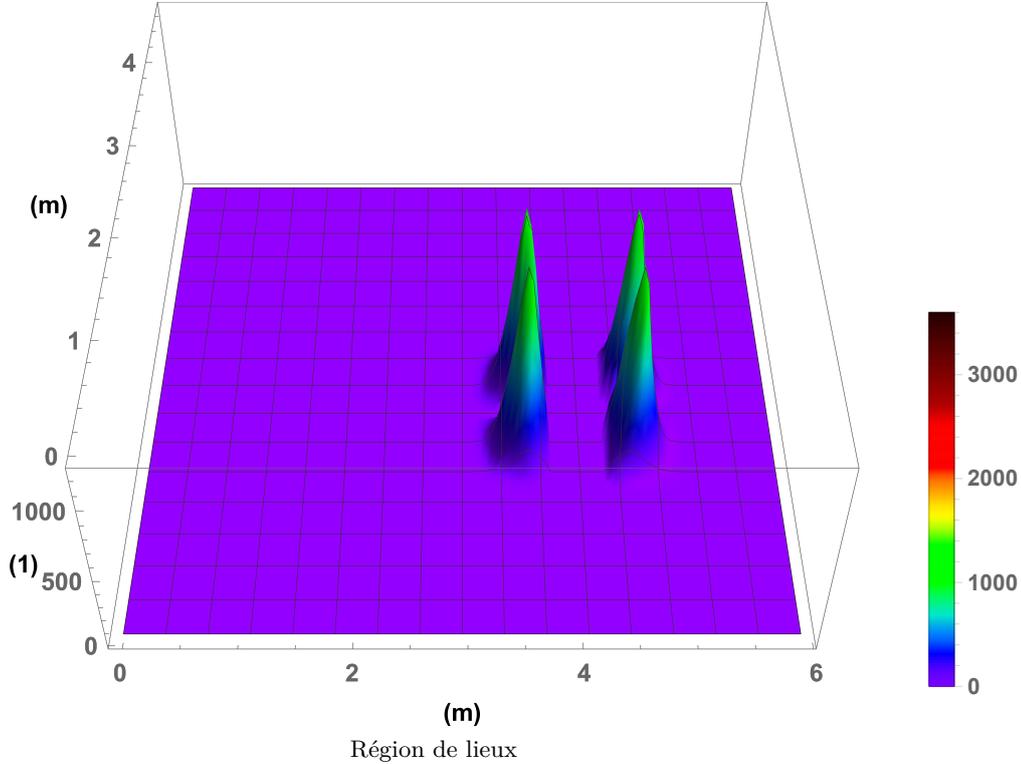


FIGURE 4.3 – Illustration de l'efficacité de la région d'information de confusion \mathcal{VP} issue de l'Occurrence en figure 3.11 et de la Détectabilité en figure 3.12

Nous définissons le complément de l'*Efficacité* –ou *Efficacité complémentaire*– d'un élément e étant la différence entre son Occurrence et son Efficacité sous conditions d'action et de capteur(s), notée $\overline{\text{Eff}}(e) \in [0 ; \text{Occ}(e)]$; cf. équation 4.10. Nous définissons le complément de l'*Efficacité* d'une région \mathcal{R} étant la somme des efficacités complémentaires de ses éléments e sous conditions ; notée $\overline{\text{Eff}}(\mathcal{R}) \in [0 ; \text{Occ}(\mathcal{R})]$. Similairement, nous avons ainsi pour chaque élément e –ou région \mathcal{R} – son efficacité complémentaire : en général pour un capteur S notée $\overline{\text{Eff}}(e \mid S)$, pour une action spécifique a et pour un capteur S notée $\overline{\text{Eff}}(e \mid a, S)$, en général pour plusieurs capteurs $S_j \in \mathcal{J}$ notée $\overline{\text{Eff}}(e \mid \bigcap_{j \in \mathcal{J}} S_j)$, pour une action spécifique a et pour plusieurs capteurs $S_j \in \mathcal{J}$ notée $\overline{\text{Eff}}(e \mid a, \bigcap_{j \in \mathcal{J}} S_j)$ etc.

$$\overline{\text{Eff}}(e \in \mathcal{R} \mid a, S) = \text{Occ}(e \in \mathcal{R} \mid a) \cdot (1 - \text{Dec}(e \in \mathcal{R} \mid S)) \in [0 ; \text{Occ}(e \in \mathcal{R} \mid a)] \quad (4.10)$$

Ainsi, l'Efficacité –des éléments– d'une région consiste à intégrer sur la région \mathcal{R} la fonction d'efficacité $\text{Eff}(e)$ pour une action a et un capteur S . Pour une région \mathcal{R} de lieu, nous avons :

$$\begin{aligned} \text{Eff}(\mathcal{R} \mid a, S) &= \iint_{\mathcal{R}} \text{Occ}(e \mid a) \cdot \text{Dec}(e \mid S) dx dy \\ &= \iint_{\mathcal{R}} \text{Card}(\tau_{e|a}) \cdot \text{P}(e \mid S) dx dy & | \text{Dim}(\mathcal{R}) = 2 \\ \text{Eff}(\mathcal{R} \mid a, S) &= \sum_{e \in \mathcal{R}} \text{Occ}(e \mid a) \cdot \text{Dec}(e \mid S) \\ &= \sum_{e \in \mathcal{R}} \text{Card}(\tau_{e|a}) \cdot \text{P}(e \mid S) & | \text{Dim}(\mathcal{R}) = 0 \end{aligned}$$

Similairement, l'Efficacité complémentaire –des éléments– d'une région consiste à intégrer sur la région \mathcal{R} la fonction d'efficacité complémentaire $\overline{\text{Eff}}(e)$ pour une action a et un capteur S . Pour une région \mathcal{R} de lieu, nous avons :

$$\begin{aligned} \overline{\text{Eff}}(\mathcal{R} \mid a, S) &= \iint_{\mathcal{R}} \text{Occ}(e \mid a) \cdot (1 - \text{Dec}(e \mid S)) \, dx \, dy \\ &= \iint_{\mathcal{R}} \text{Card}(\tau_{e \mid a}) \cdot (1 - \text{P}(e \mid S)) \, dx \, dy && \mid \text{Dim}(R) = 2 \\ \overline{\text{Eff}}(\mathcal{R} \mid a) &= \sum_{e \in \mathcal{R}} \text{Occ}(e \mid a) \cdot (1 - \text{Dec}(e \mid S)) \\ &= \sum_{e \in \mathcal{R}} \text{Card}(\tau_{e \mid a}) \cdot (1 - \text{P}(e \mid a)) && \mid \text{Dim}(R) = 0 \end{aligned}$$

Ainsi, l'intersection d'une région d'intérêt \mathcal{I}_m et d'une région de couverture \mathcal{C}_k collecte les éléments dont la multiplicité pour l'action a_m et la probabilité de détection par le capteur S_k n'est pas nulle : $\forall e \in \mathcal{I}_m \cap \mathcal{C}_k, \text{Occ}(e \mid a_m) \cdot \text{Dec}(e \mid S_k) \geq 0$.

4.2.2 Redéfinition des informations de confusion

À partir des mesures d'Occurrence, de Détectabilité et d'Efficacité, nous définissons plus précisément les informations de confusion pour une action a_m ; nécessaires pour la F-mesure. Pour ce faire, nous nous intéressons à chaque région d'information de confusion individuellement afin de quantifier précisément les informations de confusion en leur sein ; où chacune de ces informations n'est pas simplement liée à la mesure $M(\mathcal{IC})$ de sa région \mathcal{IC} associée, décrites en équation 4.1.

Nous soulignons l'absence de notation des capteurs dans les formules développées ci-dessous, car les capteurs utilisés dépendent du placement de capteurs. Nous les avons délibérément omis à dessein de généralisation, nous permettant de focaliser l'attention sur les autres variables.

Préambule

Pour une action a_m et sa région d'intérêt \mathcal{I}_m associée, nous rappelons que l'ensemble des parties de la région de travail \mathcal{T} est constitué des régions d'information de confusion suivantes : $\mathcal{P}(\mathcal{T}) = \{ \mathcal{VP}(\mathcal{I}_m), \mathcal{VN}(\mathcal{I}_m), \mathcal{FP}(\mathcal{I}_m), \mathcal{FN}(\mathcal{I}_m) \}$; dénotant $\mathcal{IC} \in \mathcal{P}(\mathcal{T})$ un élément. En terme d'Occurrence, nous posons l'équation liante suivante devant être toujours satisfaite :

$$\mathcal{VP}(\mathcal{I}_m) + \mathcal{VN}(\mathcal{I}_m) + \mathcal{FP}(\mathcal{I}_m) + \mathcal{FN}(\mathcal{I}_m) = \text{Occ}(\mathcal{T})$$

Au sein de chaque région d'information de confusion \mathcal{IC} , il existe les quatre informations de confusion nommément $\{ \mathcal{VP}(\mathcal{IC}), \mathcal{VN}(\mathcal{IC}), \mathcal{FP}(\mathcal{IC}), \mathcal{FN}(\mathcal{IC}) \}$; dénotant $\text{IC}(\mathcal{IC})$ un élément de cet ensemble. Les informations de confusion \mathcal{IC} de la région de travail sont le total respectivement des informations de confusion $\{ \mathcal{VP}(\mathcal{IC}), \mathcal{VN}(\mathcal{IC}), \mathcal{FP}(\mathcal{IC}), \mathcal{FN}(\mathcal{IC}) \}$ par région d'information de confusion $\mathcal{IC} \in \mathcal{P}(\mathcal{T})$: $\text{IC} = \sum_{\mathcal{IC} \in \mathcal{P}(\mathcal{T})} \text{IC}(\mathcal{IC})$. Pour chaque région d'information de confusion \mathcal{IC} , nous redéfinissons chaque valeur d'informations de confusion $\{ \mathcal{VP}(\mathcal{IC}), \mathcal{VN}(\mathcal{IC}), \mathcal{FP}(\mathcal{IC}), \mathcal{FN}(\mathcal{IC}) \}$ en fonction de l'Occurrence et de l'Efficacité. Celles-ci influencent différemment les informations de confusion $\text{IC}(\mathcal{IC})$ selon la nature et la notion associée à la région d'information de confusion \mathcal{IC} .

Nous considérons le placement proposé en tableau 4.4 pour illustrer notre redéfinition afin de veiller à l'action a_m et sa région d'intérêt \mathcal{I}_m associée dont l'Occurrence est $\text{Occ}(\forall e \in \mathcal{I}_m \mid a_m) = 20$, utilisant un unique capteur S dont la Détectabilité est $\text{Dec}(\forall e \in \mathcal{C} \mid S) = 80\%$. Pour chaque sous-section à venir, nous nous référerons à la colonne correspondante \mathcal{IC} pour expliquer le calcul de chaque information de confusion $\{ \mathcal{VP}(\mathcal{IC}), \mathcal{VN}(\mathcal{IC}), \mathcal{FP}(\mathcal{IC}), \mathcal{FN}(\mathcal{IC}) \}$.

Région	Travail			
	Couverture			
		Intérêt		
	\mathcal{FP}	\mathcal{VP}	\mathcal{FN}	\mathcal{VN}
Occurrence	10	30	20	40
Information de confusion	FP	VP	FN	VN

TABLE 4.4 – Exemple de placement dans la région de travail, y figurant la disposition de la région de couverture selon la région d'intérêt et les régions d'information de confusion correspondantes

4.2.2.1 Région vrai positive

Dans cette région \mathcal{VP} , le capteur S ne détecte qu'une partie de l'occurrence globale de $\text{Occ}(\mathcal{VP})$ dépendamment de sa détectabilité –*i.e.* l'efficacité– : $\text{Occ}(\mathcal{VP}) \cdot \text{Dec}(\mathcal{VP}) = \text{Eff}(\mathcal{VP})$. Par conséquent, il est incapable de détecter le complément de cette occurrence –*i.e.* l'efficacité complémentaire– : $\text{Occ}(\mathcal{VP}) - \text{Eff}(\mathcal{VP}) = \overline{\text{Eff}}(\mathcal{VP})$. Or le capteur S ne différencie pas l'action a_m des autres actions lors de la détection, étant les éléments d'intérêt pour l'action a_m de ceux non-d'intérêt. Tous ces éléments sont confondus et contenus dans la région d'intérêt \mathcal{I}_m , *i.e.* la région \mathcal{VP} . Seule la région d'action \mathcal{A} est capable de différencier les éléments d'intérêt, regroupant par définition les éléments d'une même action d'intérêt ; *cf.* section 3.3.1.2. Cependant cette région est inaccessible, ne pouvant être couverte/instrumentée par des capteurs.

Ainsi, l'intégralité des éléments captés $\text{Eff}(\mathcal{VP})$ est composée de vrais positifs et de faux positifs : $\text{Eff}(\mathcal{VP}) = \text{VP}(\mathcal{VP}) + \text{FP}(\mathcal{VP})$. Similairement, l'intégralité des éléments non-captés $\overline{\text{Eff}}(\mathcal{VP})$ est composée de vrais négatifs et de faux négatifs : $\overline{\text{Eff}}(\mathcal{VP}) = \text{VN}(\mathcal{VP}) + \text{FN}(\mathcal{VP})$. Pour différencier, les vrais positifs et faux positifs, ou les faux négatifs et vrais négatifs, nous utilisons la connaissance sur l'occurrence des actions dans la région de travail : $\text{Occ}(\mathcal{I}_m | a_m)$ et $\text{Occ}(\mathcal{I}_m | \bar{a}_m)$.

Ainsi, nous définissons pour la région vrai positif $\mathcal{VP}(\mathcal{I}_m)$ les informations de confusion suivantes :

$$\begin{aligned} \text{VP}(\mathcal{VP}) &= \text{Eff}(\mathcal{VP}(\mathcal{I}_m) | a_m) \\ \text{VN}(\mathcal{VP}) &= \text{Occ}(\mathcal{VP}(\mathcal{I}_m) | \bar{a}_m) - \text{Eff}(\mathcal{VP}(\mathcal{I}_m) | \bar{a}_m) \\ \text{FP}(\mathcal{VP}) &= \text{Eff}(\mathcal{VP}(\mathcal{I}_m) | \bar{a}_m) \\ \text{FN}(\mathcal{VP}) &= \text{Occ}(\mathcal{VP}(\mathcal{I}_m) | a_m) - \text{Eff}(\mathcal{VP}(\mathcal{I}_m) | a_m) \end{aligned}$$

avec $\text{Occ}(\mathcal{VP}(\mathcal{I}_m)) = \text{VP}(\mathcal{VP}) + \text{VN}(\mathcal{VP}) + \text{FP}(\mathcal{VP}) + \text{FN}(\mathcal{VP})$.

Pour notre exemple, nous avons une occurrence globale de $\text{Occ}(\mathcal{VP}) = 30$ pour une occurrence d'intérêt de $\text{Occ}(\mathcal{VP} | a_m) = 20$, *cf.* tableau 4.5. Nos informations de confusion au sein de la région \mathcal{VP} sont : $\text{VP}(\mathcal{VP}) = 20 \times 0,8 = 16$, $\text{VN}(\mathcal{VP}) = (30 - 20) - 8 = 2$, $\text{FP}(\mathcal{VP}) = (30 - 20) \times 0,8 = 8$ et $\text{FN}(\mathcal{VP}) = 20 - 16 = 4$; satisfaisant $\text{Occ}(\mathcal{VP}(\mathcal{I}_m)) = 30 = 16 + 2 + 8 + 4$.

4.2.2.2 Région faux positive

Dans cette région \mathcal{FP} , le capteur S ne détecte qu'une partie de l'occurrence globale de $\text{Eff}(\mathcal{FP})$, étant incapable de détecter son complément $\overline{\text{Eff}}(\mathcal{FP})$ quelle que soit l'action. L'intégralité des éléments captés $\text{Eff}(\mathcal{FP})$ est composée uniquement de faux positifs, et l'intégralité des éléments non-captés $\overline{\text{Eff}}(\mathcal{VP})$ est composée uniquement de vrais négatifs.

	Actuelle		Complément	
Occurrence globale	30		–	
Occurrence d'intérêt	20 (Positif)		10 (Négatif)	
Détectabilité (globale)	24 (VP + FP)		6 (FN + VN)	
	Détecté | Non-détecté			
DéTECTABILITÉ (intérêt)	16	4	8	2
Information de confusion	VP	FN	FP	VN

TABLE 4.5 – Illustration des informations de confusion déterminées à l'intérieur de la région vrai positif de l'exemple en tableau 4.4

Ainsi, nous définissons pour la région faux positif $\mathcal{FP}(\mathcal{I}_m)$ les informations de confusion suivantes :

$$\begin{aligned} \text{VP}(\mathcal{FP}) &= 0 \\ \text{VN}(\mathcal{FP}) &= \text{Occ}(\mathcal{FP}(\mathcal{I}_m) \forall a) - \text{Eff}(\mathcal{FP}(\mathcal{I}_m) \forall a) \\ \text{FP}(\mathcal{FP}) &= \text{Eff}(\mathcal{FP}(\mathcal{I}_m) \forall a) \\ \text{FN}(\mathcal{FP}) &= 0 \end{aligned}$$

avec $\text{Occ}(\mathcal{FP}(\mathcal{I}_m)) = \text{VP}(\mathcal{FP}) + \text{VN}(\mathcal{FP}) + \text{FP}(\mathcal{FP}) + \text{FN}(\mathcal{FP})$.

Pour notre exemple, nous avons une occurrence globale de $\text{Occ}(\mathcal{FP}) = 10$ pour une occurrence d'intérêt de $\text{Occ}(\mathcal{FP} | a_m) = 0$, cf. tableau 4.6. Nos informations de confusion au sein de la région \mathcal{FP} sont : $\text{VN}(\mathcal{FP}) = 10 \times (1 - 0,8) = 10 - 8 = 2$ et $\text{FP}(\mathcal{FP}) = 10 \times 0,8 = 8$; satisfaisant $\text{Occ}(\mathcal{FP}(\mathcal{I}_m)) = 10 = 8 + 2$.

	Actuelle		Complément	
Occurrence globale	10		–	
Occurrence d'intérêt	0 (Positif)		10 (Négatif)	
DéTECTABILITÉ (globale)	8 (VP + FP)		2 (FN + VN)	
	Détecté | Non-détecté			
DéTECTABILITÉ (intérêt)	0	0	8	2
Information de confusion	VP	FN	FP	VN

TABLE 4.6 – Illustration des informations de confusion déterminées à l'intérieur de la région faux positif de l'exemple en tableau 4.4

4.2.2.3 Région faux négative

Dans cette région \mathcal{FN} , l'action a_m ne concerne qu'une partie de l'occurrence globale $\text{Occ}(\mathcal{FN})$ –celle-ci étant définie quelque soit l'action– : $\text{Occ}(\mathcal{FN} | a_m)$. L'intégralité des éléments pertinents pour l'action $\text{Occ}(\mathcal{FN} | a_m)$ est composée uniquement de faux négatifs, et l'intégralité des éléments non-pertinents $\text{Occ}(\mathcal{FN} | \bar{a}_m)$ est composée uniquement de vrais négatifs.

Ainsi, nous définissons pour la région faux négatif $\mathcal{FN}(\mathcal{I}_m)$ les informations de confusion

suivantes :

$$\begin{aligned} \text{VP}(\mathcal{FN}) &= 0 \\ \text{VN}(\mathcal{FN}) &= \text{Occ}(\mathcal{FN}(\mathcal{I}_m) \mid \bar{a}_m) \\ \text{FP}(\mathcal{FN}) &= 0 \\ \text{FN}(\mathcal{FN}) &= \text{Occ}(\mathcal{FN}(\mathcal{I}_m) \mid a_m) \end{aligned}$$

avec $\text{Occ}(\mathcal{FN}(\mathcal{I}_m)) = \text{VP}(\mathcal{FN}) + \text{VN}(\mathcal{FN}) + \text{FP}(\mathcal{FN}) + \text{FN}(\mathcal{FN})$.

Pour notre exemple, nous avons une occurrence globale de $\text{Occ}(\mathcal{FN}) = 20$ pour une occurrence d'intérêt de $\text{Occ}(\mathcal{FN} \mid a_m) = 20$, cf. tableau 4.7. Nos informations de confusion au sein de la région \mathcal{FN} sont : $\text{VN}(\mathcal{FN}) = 20 - 20 = 0$ et $\text{FN}(\mathcal{FN}) = 20$. Notre région \mathcal{FN} a la particularité d'être entièrement dédiée à l'action a_m : il n'y aurait aucun faux positif si elle était couverte par le capteur.

	Actuelle		Complément	
Occurrence globale	20		-	
Occurrence d'intérêt	20 (Positif)		0 (Négatif)	
Détectabilité (globale)	0 (VP + FP)		20 (FN + VN)	
	Déteçté		Non-déteçté	
Déteçtabilité (intérêt)	0	20	0	0
Information de confusion	VP	FN	FP	VN

TABLE 4.7 – Illustration des informations de confusion déterminées à l'intérieur de la région faux négatif de l'exemple en tableau 4.4

4.2.2.4 Région vrai négative

Dans cette région \mathcal{VN} , le capteur S est incapable de détecter l'occurrence globale $\text{Occ}(\mathcal{VN})$, et l'action a_m ne concerne pas cette occurrence : *resp.* $\text{Eff}(\mathcal{VN}) = 0$ et $\text{Occ}(\mathcal{VN} \mid a_m) = 0$. L'intégralité des éléments –*i.e.* non-pertinents– de cette région est composée uniquement de vrais négatifs.

Ainsi, nous définissons pour la région vrai négatif $\mathcal{VN}(\mathcal{I}_m)$ les informations de confusion suivantes :

$$\begin{aligned} \text{VP}(\mathcal{VN}) &= 0 \\ \text{VN}(\mathcal{VN}) &= \text{Occ}(\mathcal{VN}(\mathcal{I}_m) \mid \forall a) \\ \text{FP}(\mathcal{VN}) &= 0 \\ \text{FN}(\mathcal{VN}) &= 0 \end{aligned}$$

avec $\text{Occ}(\mathcal{VN}(\mathcal{I}_m)) = \text{VP}(\mathcal{VN}) + \text{VN}(\mathcal{VN}) + \text{FP}(\mathcal{VN}) + \text{FN}(\mathcal{VN})$.

Pour notre exemple, nous avons une occurrence globale de $\text{Occ}(\mathcal{VN}) = 40$ pour une occurrence d'intérêt nulle, cf. tableau 4.8. Nos informations de confusion au sein de la région \mathcal{VN} sont : $\text{VN}(\mathcal{VN}) = 40$.

4.2.2.5 Formulation générale

À partir des informations de confusion $\{ \text{VP}(\mathcal{IC}), \text{VN}(\mathcal{IC}), \text{FP}(\mathcal{IC}), \text{FN}(\mathcal{IC}) \}$ ci-définies pour chaque région d'information de confusion $\mathcal{IC} \in \{ \mathcal{VP}, \mathcal{VN}, \mathcal{FP}, \mathcal{FN} \}$, nous pouvons généraliser les informations de confusion. En simplifiant les formules, nous obtenons pour une action

	Actuelle		Complément	
Occurrence globale	40		–	
Occurrence d'intérêt	0 (Positif)		40 (Négatif)	
DéTECTABILITÉ (globale)	0 (VP + FP)		40 (FN + VN)	
	DÉTECTÉ		Non-déTECTÉ	
DéTECTABILITÉ (intérêt)	0	0	0	40
Information de confusion	VP	FN	FP	VN

TABLE 4.8 – Illustration des informations de confusion déterminées à l'intérieur de la région vrai négatif de l'exemple en tableau 4.4

a_m , sa région d'intérêt \mathcal{I}_m associée et une combinaison logique de capteurs \mathbf{S} :

$$\begin{aligned}
VP(a_m, \mathbf{S}) &= \text{Eff}(\mathcal{VP}(a_m, \mathbf{S}) \mid a_m, \mathbf{S}) \\
VN(a_m, \mathbf{S}) &= \text{Occ}(\mathcal{VN}(a_m, \mathbf{S}) \mid \forall a) + \text{Occ}(\mathcal{FN}(a_m, \mathbf{S}) \mid \bar{a}_m) \\
&\quad + \overline{\text{Eff}}(\mathcal{FP}(a_m, \mathbf{S}) \mid \forall a, \mathbf{S}) + \overline{\text{Eff}}(\mathcal{VP}(a_m, \mathbf{S}) \mid \bar{a}_m, \mathbf{S}) \\
FP(a_m, \mathbf{S}) &= \text{Eff}(\mathcal{FP}(a_m, \mathbf{S}) \mid \forall a, \mathbf{S}) + \text{Eff}(\mathcal{VP}(a_m, \mathbf{S}) \mid \bar{a}_m, \mathbf{S}) \\
FN(a_m, \mathbf{S}) &= \text{Occ}(\mathcal{FN}(a_m, \mathbf{S}) \mid a_m) + \overline{\text{Eff}}(\mathcal{VP}(a_m, \mathbf{S}) \mid a_m, \mathbf{S})
\end{aligned} \tag{4.11}$$

où \mathbf{S} est l'expression logique signifiant vraisemblablement la réalisation de l'action a_m , *e.g.* $\mathbf{S} = (\mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2) \cdot \bar{\mathbf{S}}_3$; *cf.* section 4.1.3.2.

Intégration de la Précision À partir de la formulation générale des informations de confusion en équation 4.11, nous pouvons y intégrer la Précision de l'action a_m (indépendamment des éléments) pour l'activité A définie en section 2.1.2.3 : $P(a_m \mid A)$. Son intégration permet d'évaluer la fiabilité de l'identification de l'action au regard de l'activité d'intérêt A . Cette mise en perspective permet de comparer toutes les actions d'intérêt de l'activité, et d'en déterminer les actions les plus fiables pour la réalisation de l'activité. Ainsi, nous avons :

$$\begin{aligned}
VP(a_m, A, \mathbf{S}) &= P(A \mid a_m) \cdot \text{Eff}(\mathcal{VP}(a_m, \mathbf{S}) \mid a_m, \mathbf{S}) \\
VN(a_m, A, \mathbf{S}) &= \text{Occ}(\mathcal{VN}(a_m, \mathbf{S}) \mid \forall a) + \text{Occ}(\mathcal{FN}(a_m, \mathbf{S}) \mid \bar{a}_m) \\
&\quad + \overline{\text{Eff}}(\mathcal{FP}(a_m, \mathbf{S}) \mid \forall a, \mathbf{S}) + \overline{\text{Eff}}(\mathcal{VP}(a_m, \mathbf{S}) \mid \bar{a}_m, \mathbf{S}) \\
&\quad + \overline{P(A \mid a_m)} \cdot \left(\text{Occ}(\mathcal{FN}(a_m, \mathbf{S}) \mid a_m) + \overline{\text{Eff}}(\mathcal{VP}(a_m, \mathbf{S}) \mid a_m, \mathbf{S}) \right) \\
FP(a_m, A, \mathbf{S}) &= \text{Eff}(\mathcal{FP}(a_m, \mathbf{S}) \mid \forall a, \mathbf{S}) + \text{Eff}(\mathcal{VP}(a_m, \mathbf{S}) \mid \bar{a}_m, \mathbf{S}) \\
&\quad + \overline{P(A \mid a_m)} \cdot \text{Eff}(\mathcal{VP}(a_m, \mathbf{S}) \mid a_m, \mathbf{S}) \\
FN(a_m, A, \mathbf{S}) &= P(A \mid a_m) \cdot \left(\text{Occ}(\mathcal{FN}(a_m, \mathbf{S}) \mid a_m) + \overline{\text{Eff}}(\mathcal{VP}(a_m, \mathbf{S}) \mid a_m, \mathbf{S}) \right)
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Ainsi, nous avons proposé d'intégrer de nouvelles propriétés à nos régions afin d'améliorer notre représentation, qu'elle soit plus écologique à la réalité et plus fiable à l'évaluation. Ainsi, notre fiabilité (F-mesure) est le résultat d'une intégration judicieuse des Occurrences et Efficacités des régions mais aussi d'une pré-optimisation nécessaire des sous-régions de couverture à sélectionner par maximisation de la F-mesure. Celle-ci permet une meilleure approximation de la fiabilité de sorte à considérer que notre évaluation est très proche de la vraie.

4.3 Aspects techniques de l'évaluation

De l'évaluation ci-proposée à partir du modèle des régions, de nombreuses interrogations subsistent concernant son application pour le placement de capteurs. Nous discutons de certains aspects techniques de l'évaluation du placements de capteurs : les incertitudes de placements et d'estimations du modèle, ainsi que leur potentielle intégration.

4.3.1 Incertitudes de placements et d'estimations

Dues à la nature vivante du domicile et aux erreurs humaines, nous avons de nombreuses incertitudes dans les placements du mobilier et des capteurs, ainsi que dans les estimations de l'expert.

4.3.1.1 Disposition incertaine du mobilier

Le domicile d'une personne est vivant, il évolue au gré de la vie quotidienne. La personne peut décider de réaménager son espace, de changer de mobilier (au pire) voire de déplacer légèrement les éléments de l'environnement consciemment ou inconsciemment (au minimum) ; *e.g.* installer une rallonge de table, décaler la table pour faciliter le passage. En réalité, il est difficile d'anticiper, lors de la conception, ces déplacements du mobilier issus du quotidien et des aléas de vie de la personne. Nous ne pouvons qu'adapter la région d'intérêt à des incertitudes de placement du mobilier, voire de prendre en considération l'incertitude de placement de la région d'intérêt (par sa position et orientation) dans nos calculs d'évaluation.

4.3.1.2 Installation imparfaite des capteurs

Dans notre modélisation, nous considérons que les capteurs sont précisément dans la configuration (position et orientation) spécifiée. En terme d'instrumentation, ils sont considérés installés précisément par les techniciens installateurs en aval de l'évaluation ; celle-ci étant calculée pour ces configurations théoriques, non celles effectives. Or, il existe un degré de précision au delà duquel l'installation des capteurs sera imprécise voire impossible à atteindre. Cette précision se révèle variable dans certaines sous-régions de l'environnement.

En réalité, la précision d'installation dépend du dispositif utilisé pour intégrer le capteur à l'environnement, de la bonne modélisation de l'environnement mais surtout de l'installateur et des outils à sa disposition. Ses outils sont les dispositifs pour situer précisément dans le domicile la configuration spécifiée, de disposer d'un repère utile ainsi que d'un appareil de mesure précis et pratique à utiliser. Par exemple, il s'agit de développer une aide à l'installation permettant de pourvoir les mesures à effectuer et à obtenir sur l'appareil par le technicien installateur pour un point/repère de mesure donné au sein du domicile. Cette aide logicielle permettrait d'améliorer et de faciliter l'installation des capteurs aux configurations spécifiées. Il subsistera certes une incertitude seuil incompressible dans l'installation des capteurs due au dispositif d'intégration, à l'appareil de mesure et à l'humain ; mais pouvant être améliorée.

4.3.1.3 Incertitudes d'estimation

Dans notre modèle des régions, nous avons défini les régions d'action nous permettant de partitionner la région de travail à partir des actions ; *cf.* section 3.3.1.2. Ces régions sont par nature

déterminées par l'expert (idéalement) par une observation capteur poussée et personnalisée, voire par un transfert de connaissance [Hon⁺16][Chi⁺17]. Or, selon le quotidien de la personne et de ses habitudes de vie, ces régions peuvent varier certains jours : pouvant diminuer en importance (*i.e.* cardinal ou occurrence) voire changer de “*forme*”. De plus, l'estimation de l'expert est sujette aux incertitudes d'observation ou de transfert. Par ailleurs, l'incertitude d'estimation s'applique aussi à la précision de l'action, nous permettant de quantifier la pertinence d'une action vis-à-vis de l'activité ; *cf.* section 2.1.2.3.

Ainsi, il est nécessaire de prendre en considération dans nos calculs d'évaluation cette incertitude d'estimation, ainsi que l'incertitude de placement du mobilier et des capteurs. Afin de les intégrer dans notre évaluation, nous pouvons utiliser les techniques développées en Analyse par Intervalle.

4.3.2 Intégration des incertitudes avec l'analyse par intervalles

L'*analyse par intervalles*²⁵ permet de propager les incertitudes de variables afin d'approximer leur influence sur un résultat final numérique en calculant son incertitude. Il s'agit de fournir un intervalle d'incertitude sur certains paramètres encadrant toutes leurs valeurs possibles. En utilisant les techniques d'Analyse par Intervalle, nous pouvons calculer l'intervalle d'incertitude du résultat final, contenant l'ensemble des valeurs possibles. De fait, cet ensemble contient la vraie valeur.

Bien qu'il soit aisé d'intégrer des incertitudes sur des valeurs numériques (*e.g.* Occurrence, Efficacité), il est difficile d'intégrer les incertitudes au niveau des régions. En réalisant un partitionnement de régions selon la constitution de celles-ci (*i.e.* la position des capteurs voire des régions d'intérêt), certaines sous-régions peuvent disparaître voire apparaître. L'analyse par intervalles se concentre beaucoup sur la propagation des erreurs dans un système numérique d'équations (non-)linéaires, soit des incertitudes de variables numériques. Dans le cadre des régions, nous devons trouver le moyen de propager une incertitude d'ensembles par les opérateurs ensemblistes aux régions d'information de confusion et à leurs diverses mesures.

De fait, il est envisageable d'utiliser aisément une analyse par intervalles pour considérer les incertitudes d'estimation de l'expert sur la Précision des actions $P(A | a)$ voire sur la mesure de Détectabilité ou d'Occurrence de chaque élément (sans modifier pour autant les régions). Afin de considérer aussi les incertitudes des régions –étant essentiellement des incertitudes de placements–, nous devons : 1) soit développer de nouveaux outils d'analyse par intervalles ; 2) soit atténuer et contourner ce problème en reportant l'erreur directement sur les valeurs de l'évaluation des régions ; 3) soit imposer une discrétisation de l'environnement en deçà de laquelle nos erreurs sont confinées (*i.e.* placement et constitution grossière des régions d'intérêt et des régions de couverture).

Ainsi, pour prendre en considération les incertitudes d'estimations, nous pouvons utiliser l'analyse par intervalles afin de propager ces incertitudes sur la fiabilité F_β et d'en calculer un intervalle d'incertitude. Autrement pour réduire les incertitudes de placements de capteurs, nous pouvons développer et fournir en amont à l'installateur des outils adéquats facilitant son travail d'intégration et sa précision. Pour réduire l'incertitude de placement du mobilier, nous pouvons considérer l'actualisation en aval des configurations du mobilier ou des capteurs à destination du module de reconnaissance d'activité. Ces pistes nécessitent de développer des outils techniques

²⁵ *angl.* interval analysis

extérieurs au cadre de travail de cette thèse mais permettant d'améliorer la fiabilité du réseau de capteurs.

Dans ce chapitre, nous développons une évaluation de la fiabilité du réseau de capteurs fondée sur le Test d'Hypothèses et la Classification Statistique : la *F-mesure*. Actions et capteurs sont comparés par une matrice de confusion étant respectivement les phénomènes à veiller et ses observations effectives. Chaque caractéristique de l'action est évaluée en considérant l'efficacité de couverture, soit la priorité des actions et l'incertitude des capteurs. Notre évaluation offre une quantification **pertinente** et **éprouvée** de la fiabilité, des exigences de couverture et des performances d'identification. Elle permet de déterminer optimalement au préalable l'expression logique de capteurs associée à chaque action. À présent, nous devons implémenter et développer un algorithme de conception du réseau de capteurs. En chapitre suivant, nous illustrons au travers d'une étude de cas notre méthodologie de conception d'environnement instrumenté pour la veille à la personne, fondée sur l'implémentation du modèle des régions et de l'évaluation de sa fiabilité.

Chapitre 5

Placement de capteurs

Sommaire

5.1 Algorithme de conception	77
5.1.1 Optimisation multi-objectifs par Pareto	78
5.1.2 Exemple simple au séjour	79
5.2 Implémentation du modèle des régions	81
5.2.1 Géométrie Algorithmique	82
5.2.2 Traitement d'Images	82
5.3 Étude de cas en cuisine	83
5.3.1 Description du problème	83
5.3.2 Implémentation	87
5.3.3 Résultats et analyse	88
5.4 Aspects techniques du placement	90
5.4.1 Problème du placement de capteurs	91
5.4.2 Occlusions des régions de couverture	93
5.4.3 Incertitudes du mobilier amovible	96

Dans ce chapitre, nous développons un algorithme de conception du réseau de capteurs adapté au modèle des régions et à son évaluation précédemment définis. Nous optimisons le placements des capteurs simultanément pour toutes les actions d'intérêt et leurs caractéristiques, permettant de choisir et de placer les capteurs au mieux. Nous choisissons optimalement la caractéristique de l'action à couvrir, permettant d'obtenir la meilleure fiabilité selon le placement des capteurs. Notre algorithme de conception propose une large palette de placements-solutions, où nous utilisons la Pareto-optimalité afin de déterminer les meilleurs placements. Nous détaillons les implémentations possibles du modèle des régions afin d'exemplifier clairement ce qui relève des librairies et outils utilisés, des concepts.

Au travers d'une étude de cas, nous illustrons ensuite notre méthodologie de conception nous limitant au capteur de présence mais en nous intéressant à la couverture des caractéristiques de l'action : lieu et interaction.

5.1 Algorithme de conception

Dans le cadre de la conception d'environnement instrumenté, nous devons optimiser le placement des capteurs pour une multitude d'actions soit autant d'évaluation. Il est nécessaire

de comparer puis de classer les placements-solutions en considérant toutes ces évaluations. Nous devons ainsi réaliser une optimisation multi-objectifs.

5.1.1 Optimisation multi-objectifs par Pareto

Nous proposons de concevoir un placement de capteurs en optimisant le positionnement de capteurs de lieu p et l'utilisation de capteurs d'interaction u ; de manière générale les capteurs sont notés s . Nous considérons le problème d'optimisation multi-objectifs (MO) suivant, ayant M actions d'intérêt et K capteurs indifférenciés (lieu ou interaction) :

$$\begin{aligned}
 \text{(MO) } \max_{\mathbf{s}} (F_{\beta}(a_1, \mathbf{s}), \dots, F_{\beta}(a_M, \mathbf{s})) \\
 \text{sachant } \mathbf{s} = [s_1, \dots, s_K] \in \mathcal{T} \mid s_k \in \{p_k, u_k\} \\
 \text{où } p_k \in \mathcal{T}_p \\
 \quad \quad \quad u_k \in \mathcal{T}_u
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

où \mathcal{T}_p est la région de travail de lieu contenant des positions p , et \mathcal{T}_u est la région de travail d'interaction contenant des utilisations u .

Chacun de ces objectifs est en conflit avec les autres : améliorer un objectif peut conduire à en détériorer un autre [Zho⁺11]. De fait, il existe rarement une unique solution optimisant tous ces objectifs simultanément. De plus, il est difficile d'établir une connexion entre ces multiples objectifs en compétition : leurs différences sont purement qualitatives et leur importances relatives ne peuvent être aisément quantifiées numériquement. Par conséquent, il est important de déterminer les meilleures solutions compromis afin d'aider à la décision d'un placement-solution.

Afin de classifier certaines conception solutions étant meilleures que d'autres, nous utilisons le concept de dominance au sens de Pareto (ou Pareto-dominance) [Deb01][Deb11], introduit par [Sta79]. De telles solutions sont nommées Pareto-optimales.

5.1.1.1 Définition : Pareto-dominance et Pareto-optimalité

En optimisation multi-objectifs, la notion de *dominance*¹ entre deux solutions, issue du concept mathématique d'*ordre partiel* (Théorie de l'Ordre), consiste à comparer les relations de dominances entre les objectifs –ou critères– correspondants de chaque solution [Deb01][Deb11].

Une solution \mathbf{s}_1 domine une autre solution \mathbf{s}_2 si et seulement si les deux conditions suivantes sont valides :

1. Dans tous les objectifs, la solution \mathbf{s}_1 n'est jamais plus mauvaise que \mathbf{s}_2 ;
2. Dans au moins un objectif, la solution \mathbf{s}_1 est strictement meilleure que \mathbf{s}_2 .

Par conséquent, une solution est dite dominée par une autre si au moins un de ses objectifs est dominé par celui de l'autre solution. Inversement, une solution est dite non-dominée si elle n'est dominée par aucune autre. Usuellement, l'ensemble des solutions non-dominées est (abusivement) appelé **frontière de Pareto** ; or la détermination de la **vraie** frontière de Pareto nécessite de travailler avec l'ensemble des solutions possibles. Chaque solution non-dominée est appelée **solution Pareto-optimale**, n'étant dominée par aucune autre solution possible.

¹ *angl.* domination

5.1.1.2 Problème d'optimisation général

Nous considérons ainsi le problème d'optimisation Pareto multi-objectifs (PMO) suivant, ayant M actions d'intérêt et K capteurs :

$$\begin{aligned} \text{(PMO)} \quad & \max_{\mathbf{s}} (F_{\beta}(a_1, \mathbf{s}), \dots, F_{\beta}(a_M, \mathbf{s})) \\ & \text{sachant } \mathbf{s} = [s_1, \dots, s_K] \in \mathcal{T} \end{aligned} \quad (5.2)$$

5.1.1.3 Algorithme d'optimisation retenu : NSGA-II

Afin de déterminer un ensemble de solutions non-dominées, nous utilisons un algorithme évolutionniste multi-objectifs² classique : l'algorithme génétique non trié³ NSGA-II.

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation stochastiques et itératifs, s'inspirant de la théorie de l'évolution des espèces de Darwin : la sélection naturelle [Hol92]. À chaque étape, une population d'individus évolue conformément à des opérateurs inspirés de la nature : nommément la mutation, le croisement et la sélection génétique. Par définition, NSGA-II est un algorithme génétique multi-objectifs rapide et élitiste [Deb⁺02]. Son opérateur de sélection est basé sur le classement par Pareto-dominance [Kon⁺06]. NSGA-II fut développé afin de simultanément déterminer plusieurs solutions Pareto-optimales, étendues et proches du vrai front de Pareto [Deb⁺02][Deb11]. Sa complexité combinatoire est pour une population de N_i individus et M objectifs : $O(M \cdot N_i^2)$ [Deb⁺02].

Ainsi, en utilisant la Pareto-optimalité, nous proposons une large palette de solutions diverses et variées. Il sera possible pour le décideur de choisir parmi des placements-solutions qui seront moyens pour plusieurs fiabilités ou qui excelleront dans certaines.

5.1.2 Exemple simple au séjour

Nous illustrons par un exemple simple l'algorithme de conception NSGA-II, optimisant la fiabilité du réseau de capteurs.

5.1.2.1 Définition du problème

Dans le séjour, nous considérons couvrir le canapé et la table à manger qui sont respectivement utilisés dans les actions *S'asseoir dans le canapé* notée a_1 et *S'asseoir à table* notée a_2 ; cf. figure 3.1. Nous veillons à ces actions en nous intéressant uniquement à leur caractéristique de lieu. Nous considérons ainsi le déploiement de deux capteurs de présence de formes différentes : un noté S_1 couvre une région rectangulaire, et l'autre noté S_2 une région circulaire ; cf. figure 3.1.

Nous avons le problème d'optimisation suivant :

$$\begin{aligned} \text{(PMO)} \quad & \max_{\mathbf{p}} (F_{\beta=1}(a_1, \mathbf{p}), F_{\beta=1}(a_2, \mathbf{p})) \\ & \text{sachant } \mathbf{p} = [p_1, p_2] \in \mathcal{T}_p \mid p_k = (x_k, y_k) \end{aligned} \quad (5.3)$$

² angl. multi-objective evolutionary algorithm (MOEA) ³ angl. non-sorted genetic algorithm ii (NSGA-II)

5.1.2.2 Optimisation

Nous établissons une population de $N_i = 100$ individus et nous utilisons des valeurs classiques de paramètres, telles que : une probabilité de mutation⁴ de 20% et une probabilité de croisement⁵ de 80%.

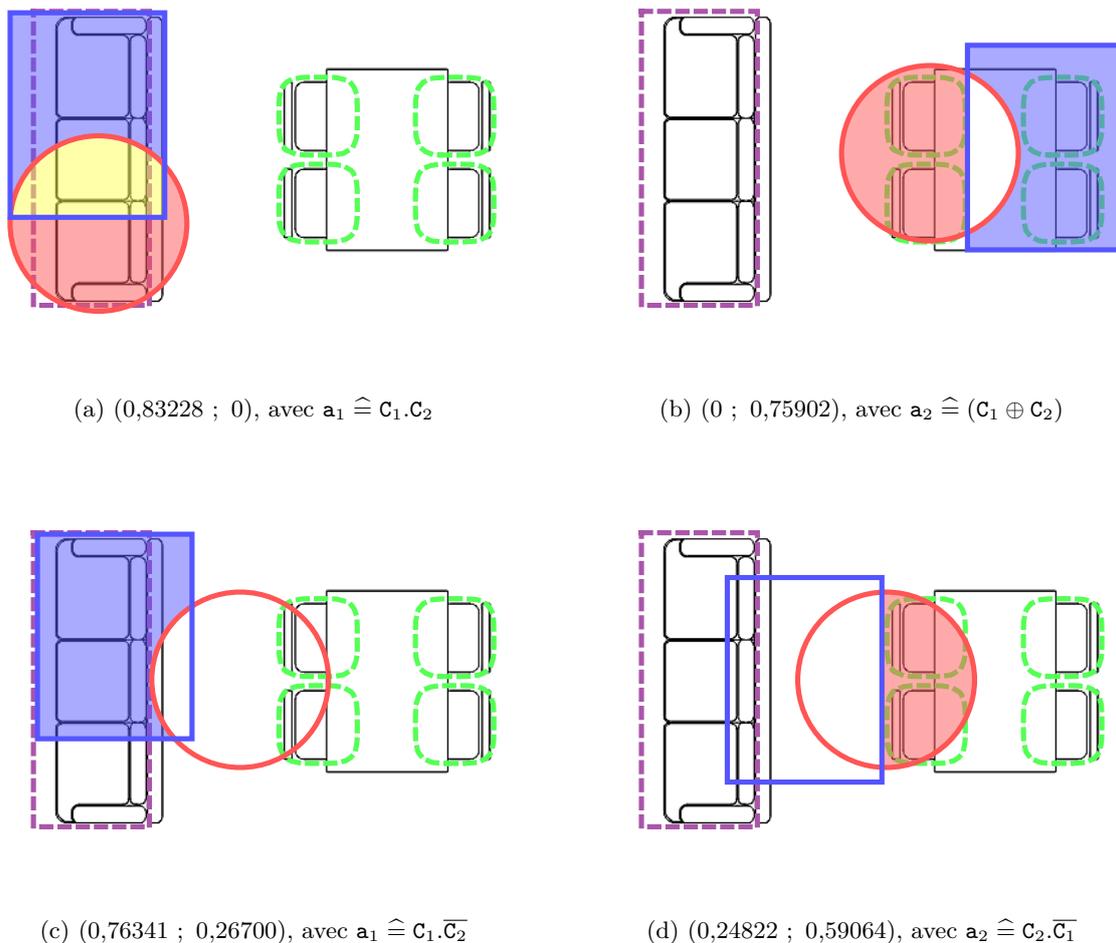


FIGURE 5.1 – Illustration des solutions non-dominées maximisant une fiabilité (5.1a et 5.1b) et sous-maximisant (5.1c et 5.1d), où chaque sous-région de couverture remplie est retenue pour maximiser l'évaluation pour le canapé (5.1a et 5.1c) et pour la table (5.1b et 5.1d)

Après 200 itérations, nous obtenons une frontière de Pareto de 22 solutions. Nos fiabilités maximisent approximativement $F_{\beta=1}(a_1)$ à 0,83228 et $F_{\beta=1}(a_2)$ à 0,75902. En figure 5.1a et figure 5.1b, nous affichons ces deux solutions extrêmes respectivement, en surlignant les sous-régions de couverture utiles respectivement à cette maximisation de l'évaluation. Nous représentons en figure 5.2 les 807 solutions dominées et le front de Pareto à travers toutes les générations.

En figure 5.2, nous dénotons la concentration des solutions en une région pseudo-rectangulaire bornée par les valeurs de F-mesure $F_{\beta=1}(a_1) \approx 0,714$ et $F_{\beta=1}(a_2) \approx 0,579$. Ce rectangle contient les solutions où chaque capteur couvre une région d'intérêt différente.

⁴ angl. mutation probability ⁵ angl. crossover probability

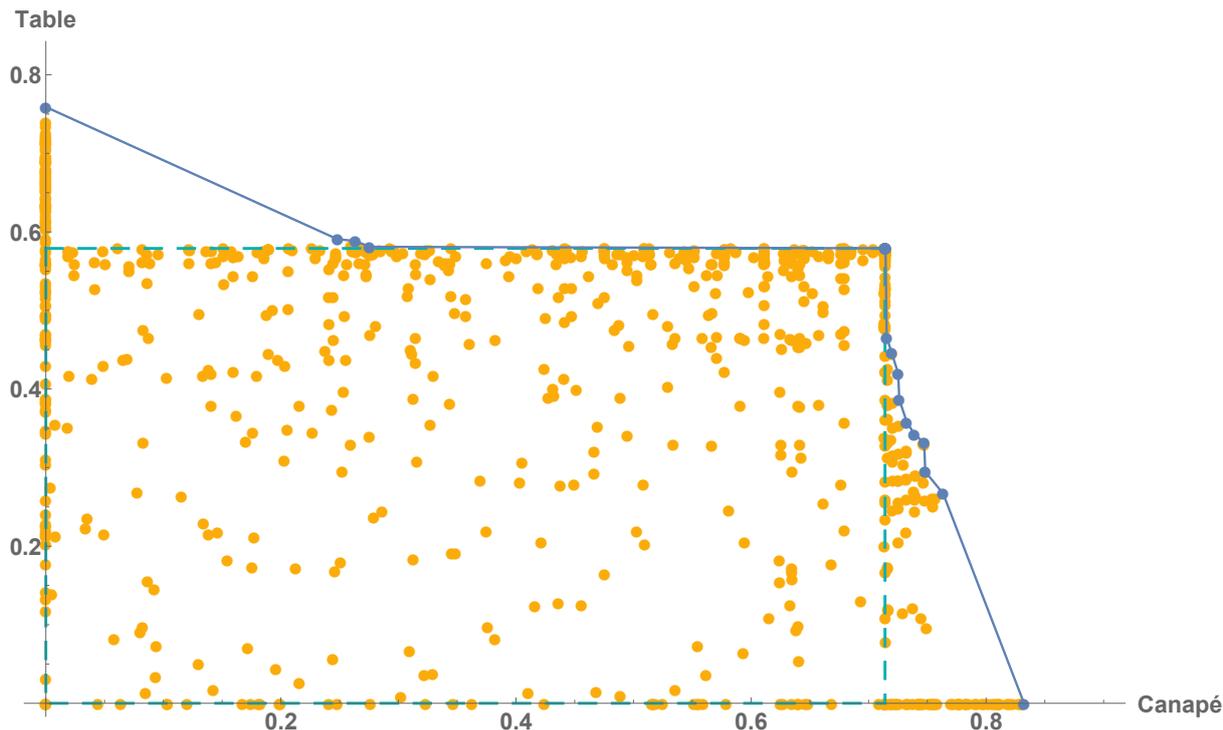


FIGURE 5.2 – Illustration des solutions dominées (en orange) et du front de Pareto (en bleu) dans l’espace des fiabilités $F_{\beta=1}(a_m)$

Autrement, les solutions ne couvrant qu’une seule et même région d’intérêt se concentrent sur les axes $F_1(a_2) = 0$ ou $F_1(a_1) = 0$, et utilisent les deux capteurs. Nous en illustrons en figure 5.1a et figure 5.1b les meilleures, étant les solutions Pareto-optimales maximisant respectivement $F_{\beta=1}(a_1)$ et $F_{\beta=1}(a_2)$.

Ainsi, l’algorithme de conception NSGA-II permet de déterminer une grande variété de solutions : le décideur a la possibilité de choisir parmi une large palette de placements-solutions. Dans le cadre d’une conception, il est important de considérer que tous les objectifs sont importants et par conséquent de chercher un ensemble de solutions optimales compromis [Deb11].

5.2 Implémentation du modèle des régions

Au préalable de toute conception, il est nécessaire d’implémenter le modèle des régions informatiquement afin d’évaluer automatiquement les placements de capteurs. Le modèle des régions et son évaluation développés conceptuellement en chapitres 3 et 4 doivent être représentés informatiquement de sorte à comparer avec vélocité les placements-solutions ; *i.e.* explorés par l’algorithme de conception NSGA-II. Nous faisons écho aux sections 3.1.1.2 et 3.4, abordant légèrement l’implémentation : l’importance du choix d’implémentation et des efforts à fournir.

Dans cette thèse, nous avons codé avec le logiciel *Mathematica* [Wol15] (en langage Wolfram) afin de concevoir et d’illustrer nos placements de capteurs. Ce logiciel permet d’implémenter aisément différents prototypes en s’appuyant sur des bibliothèques/outils nombreux bien intégrés. Par

conséquent, nous implémentons notre modèle des régions de manière formelle et discrète. D’une part, nous utilisons la librairie intégrée de *Géométrie Algorithmique*⁶, incluant une collection riche de régions basiques ou évoluées définies pour n’importe quelle dimension $d = \text{Dim}(\mathcal{T})$: allant des simples polytopes (non-)convexe et lignes infinies à des courbes frontières et combinaisons logiques d’inégalités. D’autre part, nous utilisons la librairie manipulation de liste, fondamentale au langage permettant de représenter les ensembles discrétisés, à rapprocher du *Traitement d’Images*⁷.

5.2.1 Géométrie Algorithmique

En utilisant la Géométrie Algorithmique, nous pouvons modéliser et sculpter des régions aisément et librement. Les régions ainsi définies sont formellement représentées, combinées et mesurées.

L’avantage de manipuler les régions formellement est de pouvoir calculer et mesurer des régions d’information de confusion **exactement** –*i.e.* les intégrales– afin d’améliorer et de réduire les incertitudes/erreurs de l’évaluation. Or, son inconvénient majeur est le temps de calcul à différentes étapes : le partitionnement des régions, la définition et mesure des régions d’information de confusion. Premièrement, le temps du partitionnement est très influencé par le nombre de capteurs, leur type (*i.e.* binaire ou discrétisé), et la nature de leur régions (*e.g.* polygone, cercle). Techniquement, l’algorithme de partitionnement implémenté est fondé sur les opérateurs ensemblistes : il calcule toutes les combinaisons de régions possibles, éliminant celles vides. Outre les combinaisons (nombre de capteurs et leur type), l’algorithme est très sensible à la nature des régions et de l’imbrication de leurs combinaisons étant donné qu’il calcule formellement et précisément chaque mesure des régions. Finalement, le calcul des régions d’information de confusion nécessite similairement une étape supplémentaire de combinaison (*cf.* équation 4.7) complexifiant ainsi et augmentant le temps de calcul.

Afin de solutionner et accélérer le temps de calcul, il est possible de travailler avec une discrétisation des régions (leur frontière) : la région est ainsi représentée/approximée par un d -polytope (non-)convexe. Cette discrétisation est intégrée au sein du logiciel et compatible avec l’algorithme implémenté. Or, son inconvénient est qu’elle augmente les incertitudes/erreurs de l’évaluation. Dans notre travail, nous avons préféré explorer une piste alternative en utilisant le Traitement d’Images binaires.

5.2.2 Traitement d’Images

En utilisant le Traitement d’Images matricielles, nous pouvons simplifier et sculpter les régions au pixel près : à un seuil de précision limite et raisonnable, *i.e.* ϵ_d . Les régions ainsi définies sont représentées, combinées et mesurées rapidement.

L’avantage de manipuler les régions pixelisées est de pouvoir calculer et mesurer des régions d’information de confusion **rapidement** afin d’accélérer et démultiplier l’exploration des placements-solutions. Or, son inconvénient majeur est la précision à différentes étapes : la discrétisation des régions ou leur définition, le partitionnement des régions, la définition et mesure des régions d’information de confusion. Premièrement, la discrétisation et la définition des régions est très influencée par la résolution de l’image (*i.e.* pas de précision ϵ_p) et l’orientation de la région par rapport à l’image (*i.e.* crénelage⁸ des courbes). Techniquement, nous utilisons la librairie de rendu graphique intégrée pour discrétiser les régions ou images vectorielles en images matricielles

⁷ *angl.* image processing ⁸ *angl.* pixelation

aux dimensions, se ramenant à la manipulation d'une liste de pixels. Deuxièmement, l'algorithme de partitionnement implémenté est similaire au précédent, se différenciant par l'appel des fonctions –étant nommées différemment– et la nature des arguments. La qualité du partitionnement –où l'algorithme est identique– est très sensible aux erreurs de discrétisation, mal-définissant ainsi les sous-régions de couverture. Finalement, le calcul des régions d'information de confusion en cascade subit la mauvaise définition des sous-régions de couverture.

Afin de solutionner et améliorer la qualité, il est possible de travailler avec des images vectorielles : la région est ainsi représentée par des primitives géométriques individuelles voire des d -polytopes, revenant à utiliser la méthode développée en sous-section 5.2.1. Sur le principe, les images vectorielles et matricielles nécessitent des bibliothèques différentes mais les principes sous-jacents sont identiques : les opérateurs ensemblistes.

Ainsi, nous avons développé deux implémentations différentes aux avantages et inconvénients renversés. L'algorithme de partitionnement est fondé sur la Théorie des Ensembles, mais il est implémenté en utilisant soit une bibliothèque de Géométrie Algorithmique soit une de manipulation de liste. Techniquement, cela correspond à réaliser un Traitement d'Images vectorielles ou matricielles ; où l'image est une représentation de l'environnement en dimension d . Il est important de différencier l'algorithme et les bibliothèques potentielles pour son implémentation, offrant des performances (vélocité et incertitude) différentes. De plus, il est important de disposer selon la bibliothèque utilisée d'un algorithme implémenté de *lancer de rayons*⁹ afin de calculer les occlusions des régions de couverture ; abordé ultérieurement en section 5.4.2.1.

5.3 Étude de cas en cuisine

À présent, nous illustrons notre méthodologie à travers une étude de cas, illustrant les concepts clés développés dans les chapitres précédents : le modèle des activités, le modèle des régions, et l'évaluation de la fiabilité. Pour ce faire, nous considérons le plan d'un appartement normé, décrivant les positions des murs et du mobilier dans l'espace 2D ; cf. section 2.3.3 illustré en figure 2.5.

5.3.1 Description du problème

Nous souhaitons concevoir un réseau de capteurs afin de veiller à l'activité de vie quotidienne *Préparer un repas chaud*, notée A , située dans la cuisine. Pour ce faire, nous devons identifier des actions pertinentes liées à cette activité car elles seules peuvent être captées pour la veille : il s'agit des actions d'intérêt ; cf. section 2.2.

5.3.1.1 Actions d'intérêt

En section 2.3, nous avons discuté de cette activité au contexte du placement de capteurs et avons décrit ses actions d'intérêt ; cf. tableau 2.1. Les actions d'intérêt liées à l'activité de vie quotidienne *Préparer un repas chaud*, exprimées dans le cadre de la veille, sont ainsi :

- *Prendre des ingrédients*, nécessite de la nourriture ou de l'eau
- *Prendre des ustensiles*, nécessite des couverts ou appareils électroniques
- *Découper et Préparer*, nécessite des récipients ou plan(che)s de travail

⁹ angl. ray casting

- *Chauffer la préparation*, nécessite des casseroles ou marmites
- *Servir dans des plats*, nécessite des assiettes

En approfondissant notre exemple simplifié en tableau 2.1, nous identifions plusieurs éléments pertinents liés à ces actions : des objets et du mobilier. Les objets pertinents sont manipulés ou consommés durant l'action, tandis que le mobilier pertinent est immobile et durable¹⁰. Concernant les objets pertinents pour cette activité, nous avons deux grandes catégories :

- ingrédients, regroupant notamment l'eau et la nourriture,
- ustensiles, regroupant notamment les couverts, les récipients, les plan(che)s de travail, les casseroles, les marmites et les assiettes

Concernant le mobilier pertinent lié à ces actions, nous en identifions sept : quatre placards, le réfrigérateur, les plaques chauffantes et l'évier ; illustrés en figure 5.3. Nous dénotons que la nourriture est située dans le réfrigérateur ou les placards ; les ustensiles sont situés dans les placards ; l'eau se déverse dans l'évier grâce au robinet situé sur l'évier. Nous considérons ici qu'à chaque placard nous attribuons des ustensiles et ingrédients bien définis, augmentant par conséquent notre décomposition de l'activité *Préparer un repas chaud* en actions ; contrairement à notre exemple simpliste en tableau 2.1. Nous définissons ainsi que nous avons autant d'actions à veiller que d'éléments du mobilier identifiés, soit $M = 7$ actions pertinentes pour l'activité A :

- Prendre des **ustensiles sous-utilisés** du **Placard A**, notée a_1 (*e.g.* appareils électroniques, marmites, planches de travail)
- Prendre de la **nourriture sucrée** du **Placard B**, notée a_2
- Prendre de la **nourriture salée** du **Placard C**, notée a_3
- Prendre des **ustensiles classiques** du **Placard D**, notée a_4 (*e.g.* couverts, récipients, casseroles, assiettes)
- Prendre de la **nourriture sucrée ou salée** du **Réfrigérateur**, notée a_5
- *Chauffer la préparation* avec les **Plaques chauffantes**, notée a_6
- Prendre de l'eau du robinet (**Évier**), notée a_7

De ces actions liées à un élément particulier du mobilier, nous définissons pour chacune sept régions d'intérêt de lieux –où la personne doit se situer pour interagir avec l'élément– illustrées en figure 5.3, ainsi que sept régions d'intérêt d'interaction –que la personne doit utiliser pour interagir avec l'élément–.

5.3.1.2 Caractéristiques techniques

Occurrence des actions Nous estimons arbitrairement pour chaque région d'intérêt leur Occurrence, exprimant la fréquence et préférence des positions pour la réalisation de l'action. Nous estimons aussi les faux positifs issus des déplacements de la personne ; *e.g.* la personne longe l'évier pour se déplacer. Nous illustrons en figure 5.4 l'Occurrence en général des actions dans la cuisine.

Nous dénotons dans cette illustration une utilisation générale **forte** au quotidien par la personne du placard C du salé (lié à a_3), du réfrigérateur (lié à a_5) et de l'évier (lié à a_7) ; une utilisation générale **moyenne** du placard D des ustensiles classiques (lié à a_4) et des plaques chauffantes (lié à a_6) ; une utilisation générale **faible** du placard A des ustensiles non-classiques¹¹ (lié à a_1) et du placard B du sucré (lié à a_2). Étant donné que nous avons une unique activité, nous pouvons appliquer cette notion au préalable de l'évaluation des placements.

¹⁰ n'étant pas consommé ou perdu à la suite de la réalisation de l'action ¹¹ *i.e.* sous-utilisés

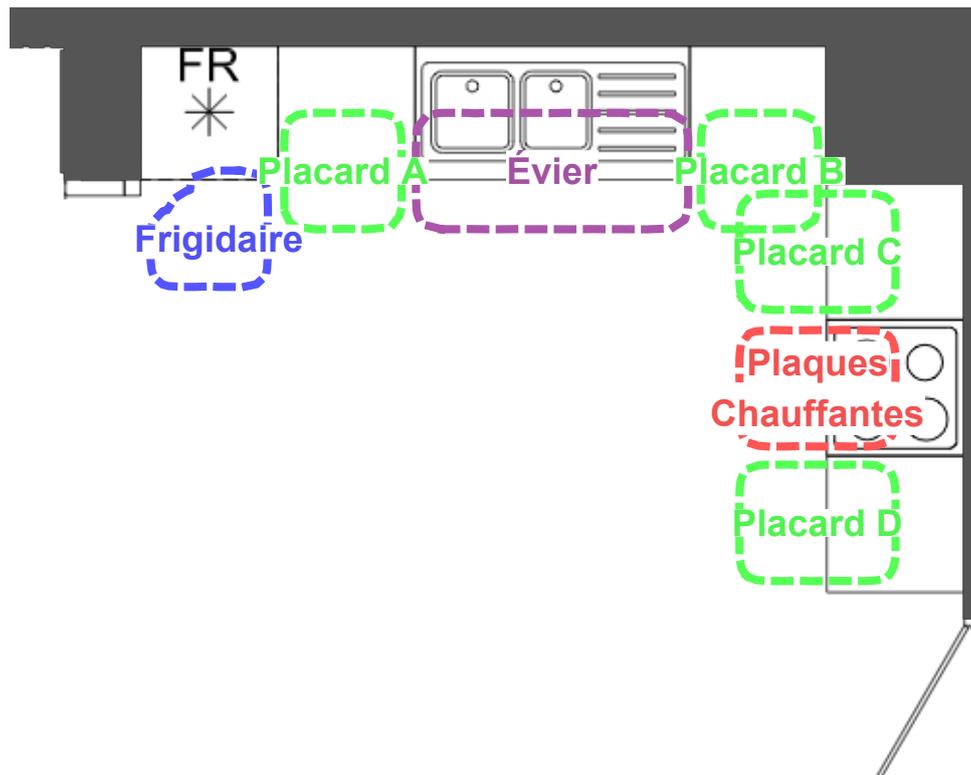


FIGURE 5.3 – Illustrations du plan de la cuisine avec les régions d'intérêt de lieux : placards (en vert), réfrigérateur (en bleu), plaques chauffantes (en rouge) et évier (en violet)

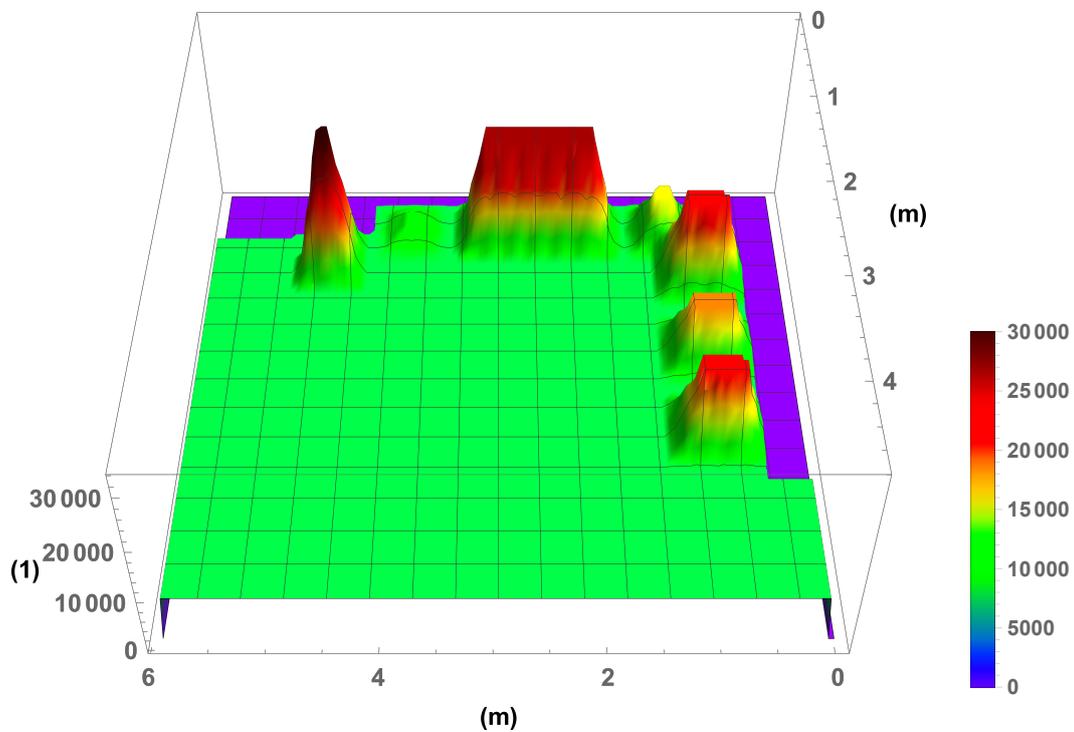


FIGURE 5.4 – Illustration de l'Occurrence générale de lieux (m^2), représentant le nombre de visite des positions (sans unité)

Précision des actions De plus, nous définissons arbitrairement la Précision de chaque action d'intérêt a_m (soit chaque objet pertinent) : définie pour l'activité A telle que $P(A | a_m)$; *e.g.* la probabilité de préparer un repas chaud en ouvrant le réfrigérateur. La Précision des actions d'intérêt est indiquée en tableau 5.1.

Actions	a_1 (Placard A)	a_2 (Placard B)	a_3 (Placard C)	a_4 (Placard D)
Précision	0,10	0,40	0,80	0,25
Actions	a_5 (Réfrigérateur)	a_6 (Plaques)	a_7 (Évier)	
Précision	0,35	0,99	0,20	

TABLE 5.1 – Précision des actions d'intérêt

Nous dénotons dans ce tableau une utilisation dédiée **forte** –par la personne– du placard C du salé (lié à a_3) et des plaques chauffantes (lié à a_6) ; une utilisation dédiée **moyenne** du placard B du sucré (lié à a_2) et du réfrigérateur (lié à a_5) ; une utilisation dédié **faible** du placard A des ustensiles non-classiques¹¹ (lié à a_1), du placard D des ustensiles classiques (lié à a_4) et de l'évier (lié à a_7).

Catalogue de capteurs Dans notre scénario, nous considérons les capteurs d'interaction suivants : 1) un capteur intelligent de consommation électrique pour les plaques chauffantes ; 2) un capteur intelligent de consommation hydraulique pour le robinet ; 3) des capteurs de contact pour les portes du frigo et des placards. Leur probabilités de détection sont respectivement : 93,82% [Gup⁺10], 97,9% [Fro⁺09] and 100%.

Nous considérons les capteurs de présence suivant : un capteur de mouvement ayant une région de couverture de forme circulaire, et une probabilité de détection de 100% ; illustrée en figure 3.1.

5.3.1.3 Problème d'optimisation

Définition Nous considérons utiliser $K = 5$ capteurs de présence¹² et $L = 2$ capteurs d'interaction¹² afin de veiller aux actions, négligeant tout aspect financier dans notre problème. Nous utilisons soit un unique capteur d'interaction u_m lié à l'action a_m , soit un ensemble de capteurs de présence \mathbf{p} . Ainsi, notre problème d'optimisation Pareto multi-objectifs (PMO) général est le suivant :

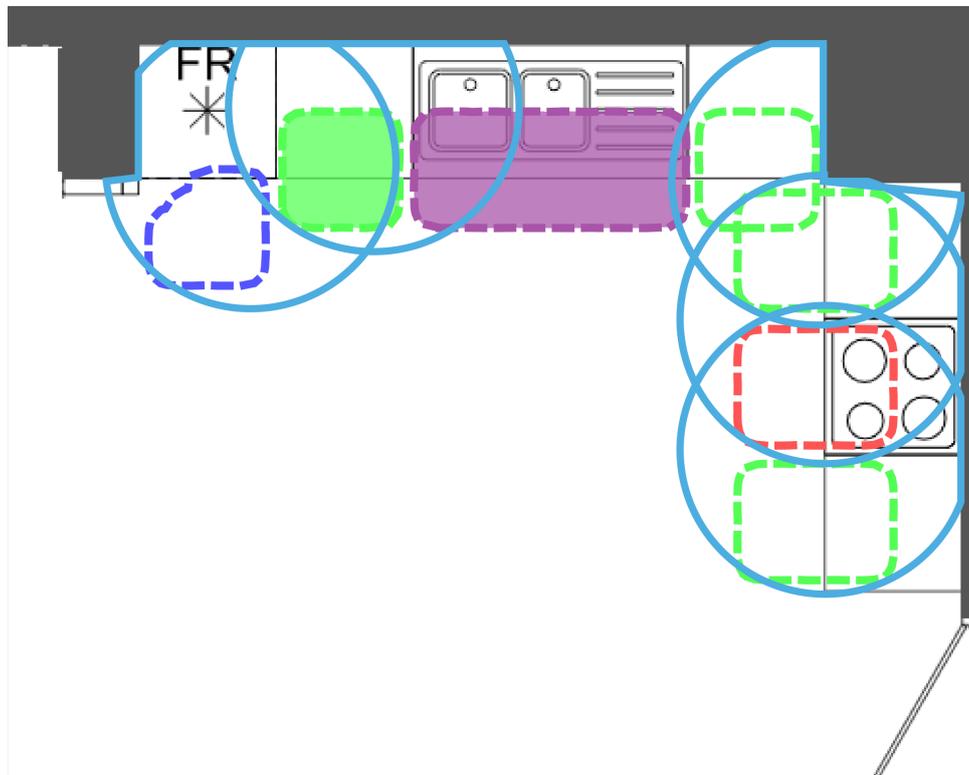
$$\begin{aligned}
 \text{(PMO)} \quad & \max_{\mathbf{u}, \mathbf{p}} [f_1(\mathbf{u}, \mathbf{p}), \dots, f_M(\mathbf{u}, \mathbf{p})] \\
 & \text{sachant } u_l \in \mathcal{T}_u = \{u_1, \dots, u_M\} \\
 & \quad p_k \in t_p \subset \mathcal{T}_p, \quad | p_k = (x_k, y_k) \\
 & \text{où } f_m(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = \max(F_{\beta=1}(a_m, \mathbf{u}), F_{\beta=1}(a_m, \mathbf{p})) \\
 & \quad \mathbf{u} = [u_1, \dots, u_L] \\
 & \quad \mathbf{p} = [p_1, \dots, p_K]
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

où t_p est l'ensemble des positions réalisables/autorisées.

Placement de référence Pour ce problème, nous illustrons un placement arbitraire de ces capteurs réalisé manuellement par un expert en figure 5.5 et reportons son évaluation en

¹² réattribuant la notation K et L dans ce chapitre pour *resp.* le cardinal des capteurs de présence et d'interaction

tableau 5.2. Nous analyserons en détails ce placement et décrirons la logique intellectuelle utilisée, lors de la comparaison avec notre algorithme de conception.



(a) Placement de capteurs de l'expert



(b) Légende

FIGURE 5.5 – Illustration du placement de capteurs de l'expert

Actions	a_1 (Placard A)	a_2 (Placard B)	a_3 (Placard C)	a_4 (Placard D)
$F_{\beta=1}$	0,1818	0,1290	0,4283	0,1274
Actions	a_5 (Réfrigérateur)	a_6 (Plaques)	a_7 (Évier)	
$F_{\beta=1}$	0,1937	0,3986	0,3321	

TABLE 5.2 – F-mesures de chaque action d'intérêt, issues du placement de l'expert en figure 5.5

5.3.2 Implémentation

5.3.2.1 Discrétisation

Nous implémentons notre modèle des régions afin de travailler avec des positions 2D. Pour ce faire, nous discrétisons notre environnement par une grille en 2D. À travers un pas de précision, nous considérons et encadrons les incertitudes de positions du mobilier (lors des mesures) et des capteurs (lors des installations). Nous posons notre pas de précision à $\epsilon_p = 5\text{cm}$.

5.3.2.2 Capteurs

Pour les capteurs de présence, nous mettons en exergue que le bâti peut générer des occlusions modifiant par conséquent leur régions de couverture selon la visibilité directe¹³. Nous considérons ici que nos capteurs de présence peuvent être installés uniquement au plafond, et nous négligeons les occlusions issues des luminaires et du mobilier (notamment en hauteur). De plus, nos capteurs peuvent être placés au mieux selon la précision de la grille. Par ailleurs, nous définissons une région de conception représentant le positionnement possible des capteurs afin d'assurer que les positions solutions ne soient pas interdites ou impossibles. Cette région notée t_p est appelée *ensemble des positions réalisables* ; liée aux lieux, et incluse dans la région de travail de lieux $\mathcal{T}_p \supset t_p$.

Pour les capteurs d'interaction, nous émettons l'hypothèse que pour chaque région d'intérêt nous ne pouvons installer qu'un unique capteur pour y veiller¹⁴ ; *i.e.* la couvrir. Contrairement aux capteurs de présence, les informations de confusion de ces capteurs sont simples à calculer, étant pré-déterminées en amont selon la technologie employée : *i.e.* un classificateur pour l'identification de l'usage électrique [Gup⁺10] ou hydraulique [Fro⁺09].

5.3.2.3 Algorithme

Nous utilisons une implémentation de NSGA-II [Gru⁺] sous *Mathematica* [Wol15]. Nous limitons notre optimisation à $i_{max} = 100$ itérations. Nous considérons une population de $N_i = 100$ individus et utilisons des valeurs standards pour les paramètres : une probabilité de mutation de 20% et une probabilité de croisement de 80%.

5.3.3 Résultats et analyse

Notre algorithme détermine un front de Pareto de ~ 1000 solutions à travers chaque génération.

5.3.3.1 Choix d'un placement de capteurs approprié

En classant par Pareto-dominance, notre algorithme de conception NSGA-II ne garantit pas que peu de solutions appropriées seront déterminées ; nous avons 1 solution au mieux et $N_i \cdot i_{max} = 10000$ solutions au pire.

Afin de classer les solutions appropriées, nous préférons utiliser la *moyenne harmonique* fournissant la vraie moyenne de valeurs ; définie en équation 5.5. La moyenne harmonique convient particulièrement lorsque que la moyenne de plusieurs taux est désirée.

$$\text{Moyenne harmonique} = M \cdot \left(\sum_{m=1}^M x_m^{-1} \right)^{-1} \quad (5.5)$$

En effet, nous souhaitons couvrir toutes les régions d'intérêt au mieux sans sacrifier la couverture d'autres actions. Nous illustrons le placement maximisant la moyenne harmonique parmi l'ensemble des solutions Pareto-optimales en figure 5.6 et reportons son évaluation en tableau 5.3.

¹³ *angl.* line-of-sight principle ¹⁴ *angl.* monitor

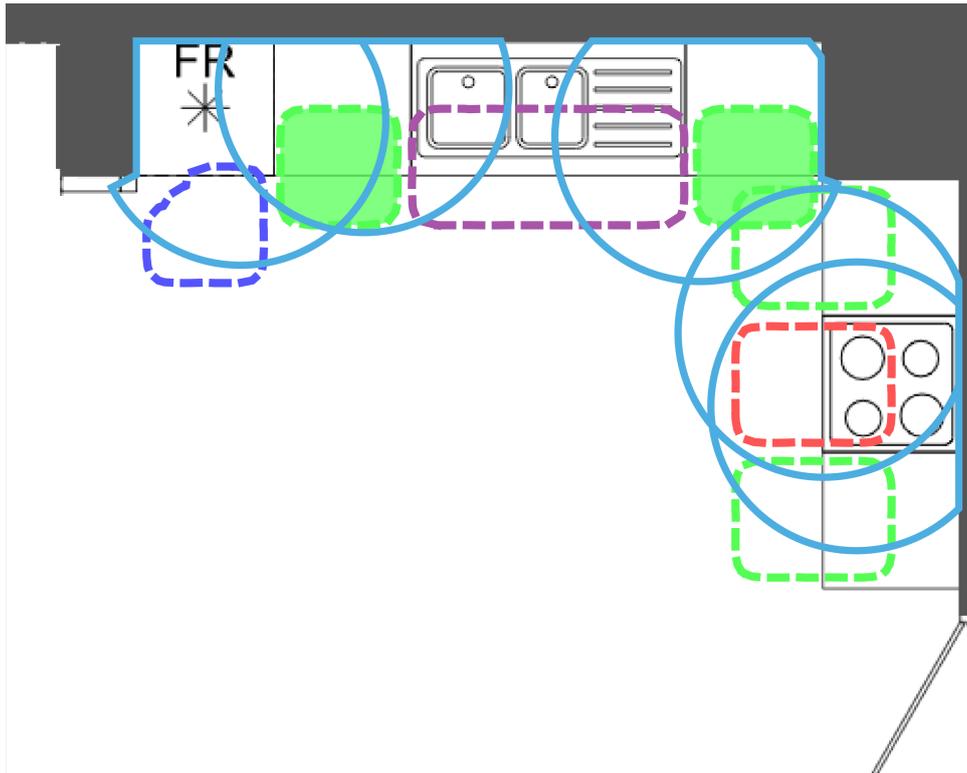


FIGURE 5.6 – Illustration du placement de capteurs optimal maximisant la moyenne harmonique des fiabilités

Actions	a_1 (Placard A)	a_2 (Placard B)	a_3 (Placard C)	a_4 (Placard D)
$F_{\beta=1}$	0,1818	0,5714	0,3908	0,1871
Actions	a_5 (Réfrigérateur)	a_6 (Plaques)	a_7 (Évier)	
$F_{\beta=1}$	0,2351	0,3101	0,1105	

TABLE 5.3 – Fiabilités de chaque action d'intérêt, issues du placement optimal (figure 5.6)

5.3.3.2 Analyse

Notre solution manuelle d'expert en figure 5.5 maximise la moyenne harmonique des F-mesures à 0,2052, tandis que notre meilleure solution en figure 5.6 la maximise à 0,2209.

Nous dénotons que, concernant l'utilisation des capteurs de présence, l'expert favorise : d'abord de couvrir entièrement les régions d'intérêt (Sensibilité maximisée) ; et enfin d'isoler chaque région d'intérêt par des sous-régions de couverture distinctes (garantissant l'identification entre régions d'intérêt). Au contraire, notre solution optimale offre de meilleures Précisions et F-mesures (soit une meilleure performance d'identification) au prix d'une baisse de la Couverture pour le placard D et le réfrigérateur ; cf. figure 5.7. Un tel équilibre entre Précision et Sensibilité fut décrit dans la F-mesure et son coefficient β . Étant donné que la Précision est difficile à évaluer, les conceptions manuelles priorisent principalement la Sensibilité alors que Sensibilité et Précision sont d'importance égale ; ayant $\beta = 1$. De plus, lorsque la Précision doit être priorisée (*i.e.* $\beta < 1$), les réseaux de capteurs sont enclins à être plus difficiles et longs à concevoir manuellement.

Cette étude reste cependant simple étant donné que nous avons peu d'interactions entre les actions (*i.e.* peu d'enchevêtrement de régions) ainsi que peu d'actions à veiller, et nous avons

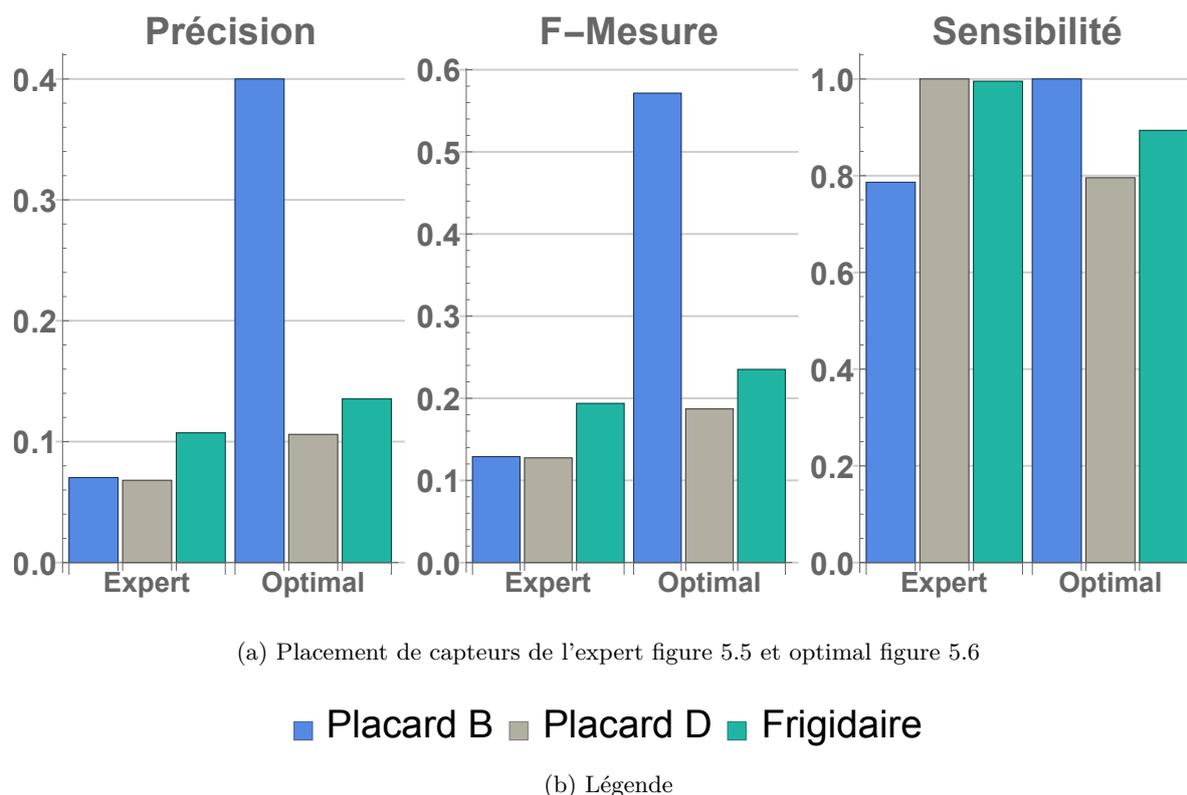


FIGURE 5.7 – Précision, F-mesure et Sensibilité des placements de capteurs

défini pour chaque action ses caractéristiques d'interaction et de lieu (*i.e.* pouvant ne pas être toujours possible). La performance de l'expert –ou le faible écart de performances– à proposer un placement de capteurs aussi proche de notre solution optimale, est due notamment à la faible complexité de notre problème ; décrit en section 5.3.1.

Ainsi, nous avons illustré au travers d'une étude de cas notre méthodologie par l'exemple. Le présent travail est une introduction au placement de capteurs, tentant d'apporter un début de solution pour la conception d'environnement instrumenté pour la veille à la personne. Bien des défis sont à révéler et de nombreux problèmes subsistent. À présent, nous discutons de notre méthodologie de conception illustrée dans cette étude de cas. Nous abordons et réfléchissons à des problématiques, interrogations et attentes soulevées par notre méthodologie et notre algorithme de conception.

5.4 Aspects techniques du placement

Du placement de capteurs ci-proposé à partir du modèle des activités et des régions, de nombreuses interrogations subsistent concernant sa qualité, son écologisme et son exactitude au quotidien. Nous discutons de certains aspects techniques du placement de capteurs : la définition et résolution du problème, les objectifs et contraintes supplémentaires, ainsi que les occlusions des régions de couverture.

5.4.1 Problème du placement de capteurs

Dans ce chapitre, nous avons formalisé le problème du placement de capteurs et choisi un algorithme d'optimisation afin de résoudre informatiquement la conception d'environnement instrumenté pour la veille à la personne. Nous y abordons simplement le problème de placement et l'algorithme par Pareto-optimisation, nous intéressant à dessein d'illustration et d'étude de notre méthodologie de conception ; *i.e.* le modèle des activités et des régions, ainsi qu'à l'évaluation de la fiabilité. Nous discutons de notre utilisation de la caractérisation des actions au sein du problème de conception, ainsi que l'algorithme de conception retenu NSGA-II. En outre, d'autres objectifs et contraintes peuvent être utilisés pour la conception.

5.4.1.1 Caractéristiques de l'action

Notre modèle des régions est générique aux caractéristiques d'actions : il permet de représenter facilement n'importe quelle caractéristique dans une région de travail dédiée ; *cf.* section 3.1.1 et discussion 3.4.2.

Or, l'enjeu majeur est de permettre de fusionner les informations acquises par les capteurs entre les différentes caractéristiques. Dans notre méthodologie –et notre exemple en section 5.3.1.3–, nous traitons séparément chaque caractéristique et ses informations et déterminons quelle caractéristique (*i.e.* type de capteurs) offre la meilleure fiabilité F_β ; *cf.* équation 5.4. Intuitivement, les informations de caractéristiques différentes peuvent potentiellement se compléter et permettre d'améliorer les performances de la mesure de l'action et de la reconnaissance d'activité ; *e.g.* pour l'action *S'asseoir à table*, la temporalité permet de discerner l'activité *Prendre son petit-déjeuner* de l'activité *Jouer à un jeu de société*. Afin de considérer la complémentarité des caractéristiques, il est nécessaire de disposer des Précisions des actions sur toutes les relations logiques possibles des différents caractéristiques (*i.e.* un diagramme de Venn). Similairement au principe d'inclusion-exclusion évoqué en section 3.3.2.3 pour calculer précisément la Détectabilité de sous-régions de couverture s'intersectant, la difficulté est de déterminer les Précisions croisées entre chaque caractéristique ; *i.e.* nulle dans nos considérations, correspondant à des précisions indépendantes.

En nous astreignant de la caractéristique temporalité dans notre méthodologie de conception –principalement car nos capteurs sont statistiques–, nous déchargeons les éventuelles optimisations possibles entre lieux (ou interaction) et temporalité au module de reconnaissance d'activité en aval.

5.4.1.2 Algorithme de conception

L'algorithme de conception est essentiel pour la conception d'environnement instrumenté : il exploite le modèle des régions et les diverses évaluations (objectifs ou contraintes) possibles afin de résoudre notre problème d'instrumentation.

Due à la difficulté de statuer de l'importance des divers objectifs entre eux, nous préférons proposer des placements-solutions divers et variés aux décideurs en utilisant la Pareto-optimalité. Le fait de disposer d'une large palette de solutions est double. D'une part, il permet de laisser le choix aux cliniciens et à la personne pour les impliquer et leur permettre d'être acteur de la décision finale. D'autre part, il permet de compenser l'oubli de contraintes ou de préférences permettant d'ajuster particulièrement le placement au domicile et à la personne.

Par conséquent, nous utilisons un algorithme d'optimisation Pareto multi-objectifs standard afin de déterminer des solutions Pareto-optimales, nommément NSGA-II. Cet algorithme

génétique n'est pas le plus adapté ou le plus performant pour une exploration judicieuse de l'espace des conceptions. Il existe d'autres algorithmes plus prometteurs tels que l'optimisation par essais particuliers¹⁵ (PSO) [Ken11] ou NSGA-III [Deb⁺14; Jai⁺14]. Cependant, nous gardons à l'esprit que l'algorithme utilisé influe principalement sur les performances de l'exploration (*i.e.* temps). Bien que l'algorithme de conception est important, la précision de la modélisation et la qualité de la méthodologie l'est d'autant plus. De ces faits, nous avons choisi de nous intéresser en priorité au développement de l'aspect modélisation et évaluation de notre méthodologie de conception.

5.4.1.3 Objectifs d'évaluation supplémentaires

À travers la notion de fiabilité, nous nous sommes focalisé à qualifier la *couverture* du réseau de capteurs par la F-mesure F_β à partir des régions d'information de confusion. Or en placement de capteurs, d'autres critères d'évaluation sont utilisés et nécessaires pour certaines applications afin de concevoir un réseau de capteurs. Nous nous intéressons ainsi à la k-couverture, la résolution et l'observabilité.

k-Couverture consiste à s'assurer de disposer dans la région d'intérêt au moins k capteurs couvrant chacun de ses éléments. Par exemple pour assurer sa connectivité, un réseau de capteurs sans-fil nécessite une k-connectivité pour transmettre les informations [Zhu⁺12]. Pour répondre à la k-couverture, nous pouvons aisément calculer le cardinal de capteurs associés à chaque élément $\text{Card}(S \mid e \in \mathcal{I})$ et imposer en contrainte de notre problème de placement qu'elle respecte cette exigence de couverture.

Résolution consiste à s'assurer de disposer dans la région d'intérêt de sous-régions de mesure aux dimensions précises maximales ; *cf.* [Bet⁺14]. Par exemple, pour une reconnaissance de forme à partir d'une caméra, l'algorithme d'extraction nécessite une résolution minimale en pixel par centimètre carré (px cm^{-2}) pour analyser l'environnement. Pour ce faire, nous pouvons déterminer sur l'étendue de la région d'intérêt les dimensions de chaque sous-région de mesure afin de déterminer la dimension maximale (à 100 %) ou la dimension médiane (à 50%), voire la dimension à 90% des valeurs de mesures¹⁶.

Observabilité consiste à s'assurer de minimiser dans la région d'intérêt l'incertitude de mesure de ces éléments. Par exemple, la localisation (*e.g.* la triangulation d'une position) nécessite une disposition inter-capteurs limitant l'incertitude de la position ; estimée à partir des mesures. Pour ce faire, évaluer l'observabilité d'une conception permet de déterminer le placement optimal pour les capteurs pour réaliser de bonnes mesures et réaliser une localisation fiable. L'observabilité reflète l'incertitude de mesure d'un élément cible donné et permet de comparer plusieurs dispositions.

Or, nous dénotons que notre résolution –calculée à partir de notre modèle des régions– évalue l'incertitude de mesure, alors que l'observabilité ne la reflète voire l'approxime grossièrement. Ainsi, dans certains cas, notre modèle des régions permet de calculer l'observabilité précisément étant la résolution des sous-régions de mesure d'une région donnée. Cependant, de par la nature des régions de mesure, le calcul est plus coûteux en temps que celui de l'observabilité ou d'un *moindre carré par intervalle* [San13].

¹⁵ *angl.* particle swarm optimization (PSO) ¹⁶ soit les quantiles

Ainsi, à partir de notre modèle des régions nous pouvons calculer les indices classiques utilisés en placement de capteurs. Selon les impératifs de la conception, nous pouvons intégrer ces évaluations afin de les optimiser ou de contraindre notre recherche de placements-solutions

5.4.1.4 Coût d'achat, d'installation, de fonctionnement, voire de maintenance

Dans notre étude de cas, nous nous sommes concentré principalement sur l'optimisation des fiabilités F_β de chaque action. Cependant, l'intégration de capteurs dans l'environnement génère divers coûts : d'achat, d'installation, de fonctionnement, voire de maintenance.

La conception d'un environnement instrumenté requiert de prendre en considération ces coûts qui varient selon les capteurs utilisés : leur type, leur nombre, leur positionnement, leur forme physique et leur consommation. Ces coûts sont de plus en plus difficile à évaluer. Le coût d'achat d'un capteur (à l'unité ou en gros) est une donnée simple. Leur coût d'installation dépend du type de capteur, de la complexité de la position et de la nature de l'environnement où il sera intégré. Leur coût de fonctionnement dépend de la qualité de l'alimentation, de leur état et des appareils nécessaires à leur bon fonctionnement (*e.g.* routeur). Enfin, le coût de maintenance dépend de la probabilité de panne des capteurs, voire des ajustements nécessaires à effectuer (*e.g.* repositionnement, changement d'alimentation ou de capteurs). Par ailleurs, ces coûts peuvent constituer des contraintes ou des objectifs à optimiser. L'implémentation légitime des coûts dans l'optimisation doit être réalisée en gardant à l'esprit que certaines performances attendues ne peuvent, dans certains cas, ne pas être atteintes à cause d'un budget trop faible ou un catalogue de capteurs trop faible et peu diversifié.

Quoiqu'il en soit, ces objectifs et contraintes supplémentaires doivent pouvoir être intégrés au sein de l'algorithme de conception. Dans cette thèse, nous avons développé une méthodologie de modélisation générique à dessein de conception écologique et fiable. Nous avons négligé de nous pencher sur le problème et l'algorithme de conception, formalisant et déterminant les placements-solutions adéquats, et d'y intégrer une notion de coût.

5.4.2 Occlusions des régions de couverture

Explicitement, nous avons omis d'aborder la question de l'occlusion des régions de couverture des capteurs. Or, le bâti (*i.e.* les murs et portes) et le mobilier peuvent générer des occlusions modifiant par conséquent les régions d'acquisition selon la visibilité directe ; *cf.* section 5.3.2. Nous considérons dans notre implémentation que nos capteurs de présence peuvent être installés uniquement au plafond et nous avons négligé les occlusions issues des luminaires et du mobilier. En réalité, nous pouvons distinguer plusieurs aspects à l'occlusion attrayant à l'élément perturbateur à l'origine de l'occlusion, s'agissant d'un mur, d'une porte ou d'un meuble. La propriété prépondérante des éléments perturbateurs est leur **mobilité**.

5.4.2.1 Occlusion des éléments immobiles

Outre les murs immobiles par nature, certains meubles sont rarement déplacés pouvant ainsi être considérés immobiles ; *e.g.* réfrigérateur, cuisine équipée, (meuble de) télévision.

Pour les éléments immobiles de l'environnement domiciliaire, nous pouvons aisément appliquer le principe de visibilité directe¹⁷ pour calculer la région de couverture du capteur selon

¹⁷ *angl.* line-of-sight principle

sa configuration dans l'environnement. Pour déterminer l'ensemble des éléments visibles par le capteur, ce principe considère que le capteur mesure son environnement via un objectif de vue (similairement à l'objectif d'un appareil photo) et ne peut acquérir que les éléments étant en vision directe ; non-obstrués ou cachés derrière d'autres. Il est ainsi nécessaire de procéder à un *lancer de rayons*¹⁸ multiples afin de calculer cet espace avec précision, explorant judicieusement l'ensemble des mesures possibles de la région de couverture pour la redéfinir ; contrairement à la cartographie et localisation simultanées (SLAM) se contentant de traiter les mesures advenantes. Cette technique est largement utilisée notamment dans les logiciels de modélisation lors du rendu d'un environnement virtuel, à destination de films, de jeux ou de réalité virtuelle.

5.4.2.2 Occlusion des éléments amovibles

Contrairement aux éléments précédents, les occlusions dues aux éléments amovibles (mobiles ou déplacés) sont plus complexes à intégrer et à anticiper. Nous identifions deux niveaux de complexités différents : les portes et meubles.

Porte permet de séparer des pièces si elle est fermée (*i.e.* occlusion totale), d'offrir une visibilité sur la pièce voisine si elle est (entre-)ouverte (*i.e.* occlusion partielle à nulle). Similairement, nous pouvons appliquer ce raisonnement pour certains meubles. Ainsi, nous pouvons déterminer par un paramètre o de valeur bornée l'état d'ouverture de la porte ; étant un angle θ pour une porte classique, ou une distance ρ pour une porte coulissante. En normalisant ce paramètre par l'intervalle $\mathbf{o} \in [0 ; 1]$, nous pouvons exprimer l'état d'ouverture complète de la porte $\bar{o} = 1$ ou de fermeture complète $\underline{o} = 0$, et toutes les ouvertures partielles intermédiaires.

Nous supposons que nous pouvons connaître une distribution de probabilité $P(o)$ de ce paramètre exprimant de manière générale (sans à priori) la probabilité de chaque état d'ouverture de la porte ; les différents états d'ouverture peuvent être discrétisés. Dans le cadre où nous ne poserons pas de capteur pour connaître l'état d'ouverture de la porte –utile uniquement pour le système d'assistance à l'autonomie à domicile et le module de reconnaissance d'activité en aval–, nous pouvons intégrer ces probabilités dans notre calcul des Fiabilités F_β en modifiant l'apport aux informations de confusion de chaque élément présent par delà une porte et appartenant à la région de couverture du capteur. Il s'agit ainsi d'estimer précisément l'état de visibilité par le capteur de chaque élément selon les habitudes de vie de la personne (*i.e.* habitude d'ouverture des portes). Si un élément est visible, il peut soit contribuer aux vrais positifs, soit aux faux positifs ; inversement, étant invisible, il peut soit contribuer aux vrais négatifs soit aux faux négatifs.

Dans un cas simple, nous pouvons considérer que la porte est généralement entièrement ouverte ou fermée, nous permettant de négliger ainsi les états intermédiaires ; *e.g.* $P(o = 1) + P(o = 0) \approx 1$. Sous cette hypothèse de travail, nous pouvons ainsi modifier plus aisément les formules de calculs des informations de confusion ; *cf.* section 4.2. Nous devons décorrélérer du calcul des régions d'information de confusion équation 4.7 et des informations de confusion équation 4.11 les éléments des régions de couverture litigieux (pouvant être occultés par une porte). Par la simplicité de notre cas, nous pouvons scinder chaque région de couverture en deux régions disjointes : une première contenant tous les éléments litigieux $\tilde{\mathcal{C}}$, et une dernière tous les autres \mathcal{C} ; pouvant appliquer par extension le même raisonnement pour les sous-régions de couverture \tilde{c} et c , ou sous-régions de mesure \tilde{m} et m . Il est nécessaire de définir chaque région d'information de confusion \mathcal{IC} étant l'union d'une région non-litigieuse (sa formulation classique) et de régions litigieuses, afin de faciliter l'intégration des litiges dans le calcul des informations

18 *angl.* ray casting

de confusion IC .

Nous posons ainsi une piste pour résoudre le cas de l'occlusion des portes dans le cas simple, qu'il serait direct et intéressant de poursuivre.

Meubles amovibles peuvent être déplacés plus librement que le cas précédent dans le domicile. Vlasenko et al. [Vla⁺15] proposent dans leur méthodologie d'analyse du domicile de définir (au sol) une région de déplacement de ceux-ci ; littéralement l'ensemble des positions potentielles des obstacles mobiles¹⁹. Cette région permet de définir et de borner les configurations possibles des meubles, afin d'aspirer à l'anticipation de leur occlusions potentielles ; nous dénotons \mathcal{D} cette région de déplacement, étant incluse dans la région de travail de lieux \mathcal{T}_p .

Nous pouvons définir que la configuration possible d'un meuble dans sa mobilité dépend au minimum de deux paramètres ; $\text{Dim}(o) \geq 2 \mid o \implies p \in \mathcal{T}_p$. Généralement, il s'agit de sa position p au sol dans un plan en 2D, avec $p_i \in \mathcal{D}_i \subset \mathcal{T}_p$. Dans le cadre de configurations de paramètres si libres (contrairement au cas des portes), nous pouvons difficilement définir une densité de probabilité au sein de la région de déplacement \mathcal{D} afin d'anticiper les performances générales du réseau de capteurs.

Or nous pouvons, au lieu de chercher à anticiper les occlusions, nous focaliser à éviter que les régions de couverture des capteurs soient perturbées par ces occlusions. Il s'agit de générer connaissant la région de déplacement \mathcal{D} du meuble concerné, la région des éléments pouvant appartenir au meuble déplaçable, soit la région d'existence du meuble, notée \mathcal{E} étant définie par l'union sur chaque élément –de la région de déplacement– de l'enveloppe du meuble²⁰. Dans ce cadre, notre objectif est d'éviter que les régions de couverture n'intersectent cette région \mathcal{E} particulière si la région d'intérêt n'est pas en visibilité directe du capteur. Par exemple, si un capteur est positionné sur un mur en hauteur, celui-ci sera moins perturbé par le déplacement d'une chaise dans sa région de couverture ; naturellement les configurations en hauteur sont favorisées pour éviter les occlusions.

Par ailleurs, les sous-régions de couverture, les régions de mesure et les sous-régions de mesure ne sont pas concernées par l'occlusion si les éléments litigieux ne sont pas des éléments d'intérêt²¹ ou si les régions choisies²² n'intersectent pas la région d'existence \mathcal{E} du meuble.

Ainsi, afin de calculer précisément durant la conception les vraies régions de couverture il est nécessaire en amont de répertorier les éléments immobiles du domicile ; obtenu notamment à partir du plan du domicile (*i.e.* murs). Obligatoirement, cette étape nécessitera un temps de modélisation du domicile afin d'obtenir un environnement virtuel exploitable sur lequel l'algorithme de conception travaillera. Cependant, des outils techniques et logiciels peuvent-être développés afin de faciliter cette étape (temps et réalisation) ; d'autant plus si de multiples domiciles doivent être instrumentés, l'opérateur s'adaptera aux outils et pourra gagner en performances (*i.e.* vitesse et qualité de l'installation) sur le long terme. De plus, l'utilisation de capteurs non-binaires ou la combinaison judicieuse des régions de couverture des capteurs binaires peuvent suffire à éviter des problèmes de performances dues aux occlusions.

Par conséquent, le défi de l'occlusion se révèle être plus technique que théorique nécessitant l'emploi de bibliothèques adaptées et véloces pour calculer efficacement les occlusions à chaque nouveau placement-solution à évaluer.

¹⁹ *angl.* « all positions that can be potentially occupied by the movable obstacles » [Vla⁺15]

²⁰ *i.e.* une somme de Minkowsky, *cf.* (section 3.4.3.1) ²¹ *i.e.* éléments appartenant à une région d'intérêt

²² par maximisation de la Fiabilité F_β

5.4.3 Incertitudes du mobilier amovible

Le domicile d'une personne est vivant, il évolue au gré de la vie quotidienne. La personne peut décider de réaménager son espace, de changer de mobilier (au pire) voire de déplacer légèrement les éléments de l'environnement consciemment ou inconsciemment (au minimum) ; *e.g.* installer une rallonge de table, décaler la table pour faciliter le passage. Nous faisons écho ici à la section 5.4.2.2 où nous avons introduit le cas du mobilier amovible.

En réalité, il est difficile d'anticiper lors de la conception ces déplacements du mobilier issus du quotidien et des aléas de vie de la personne. Par conséquent, nous ne pouvons que considérer adapter la région d'intérêt à des incertitudes de placement du mobilier, voire de prendre en considération l'incertitude de placement de la région d'intérêt (par sa position et orientation) dans nos calculs d'évaluation.

5.4.3.1 Quadrillage ou repositionnement des capteurs

Si nous souhaitons être le plus robuste à ces changements, une solution évidente est de *quadriller* avec des capteurs l'environnement. Il s'agit de partitionner la région de travail en petite sous-régions de lieux. Ainsi, malgré le déplacement du mobilier dans sa région de déplacement donnée, le module de reconnaissance d'activité pourra être modifié en conséquence selon la nouvelle configuration de l'élément, sans devoir ajuster ou modifier le placement des capteurs. Par exemple, une telle solution nécessite d'utiliser au minimum un capteur d'angle et distance figure 3.7 voire une caméra figure 3.8. Or, ce dernier capteur pose des problèmes de vie privée [Cai⁺05][Din⁺11].

Une autre solution est d'utiliser des capteurs "repositionnables". Pour une installation fixe, nous pouvons à posteriori modifier la configuration²³ de ces capteurs pour s'adapter aux changements de positions du mobilier. Lors de la conception, nous pouvons anticiper selon l'incertitude de placement de la région d'intérêt (par sa position et orientation) la configuration de capteurs repositionnables.

5.4.3.2 Actualisation humaine ou automatique

Quelque soit la solution retenue, nous devons actualiser les informations de configuration voire de forme du mobilier afin de mettre à jour les expressions logiques ; *cf.* section 3.1.3.3. Cette mise à jour du placement des régions d'intérêt nécessite ainsi d'informer soit manuellement le module de reconnaissance d'activité par intervention humaine, soit automatiquement par un dispositif supplémentaire dédié.

L'actualisation manuelle nécessite idéalement d'utiliser un outil dédié et facilitant la mesure, pouvant s'appuyer sur les dispositifs déjà installés : soit en utilisant simplement les capteurs installés pour la veille, soit en intégrant le matériel de mesure nécessaire et dédié uniquement au positionnement du mobilier. Similairement, l'actualisation automatique nécessite d'intégrer au mobilier un dispositif de positionnement dont la mesure est réalisée et mise à jour à la discrétion du module en aval de notre conception ; soit par les capteurs pour la veille, soit par un matériel de mesure dédié.

Ainsi, il est nécessaire d'intervenir, soit sur le réseau de capteurs soit sur le module de reconnaissance d'activité installés, pour s'adapter aux incertitudes de placements du mobilier

²³ vraisemblablement leur orientation

dues aux changements de l'environnement domiciliaire.

Dans ce chapitre, nous présentons notre algorithme de conception du réseau de capteurs fondé sur la Pareto-optimalité : NSGA-II. Cet algorithme permet de proposer une large palette de solutions diverses et variées aux décideurs, offrant des placements moyens pour plusieurs fiabilités ou qui excelleront dans certaines. Nous détaillons nos implémentations de notre méthodologie de conception de manière formelle et discrète aux avantages et inconvénients renversés, fondées respectivement sur une librairie de Géométrie Algorithmique et de manipulation de liste. Ces implémentations sont à rapprocher du Traitement d'Images vectorielles et matricielles, où la représentation informatique des régions implique d'utiliser des outils techniques différents mais partageant le même cadre théorique. Dans notre étude de cas, nous illustrons le placement de capteurs : le modèle des activités et des régions appliqués à la veille, l'évaluation de la fiabilité et l'algorithme de conception du réseau, ainsi que les implémentations développées. En chapitre suivant, nous nous intéressons à une autre évaluation du réseau de capteurs fondée sur l'utilisation des techniques de planification optimale des expériences mais appliqué au placement de capteurs à domicile : l'observabilité.

Chapitre 6

Modèle analytique pour une planification optimale

Sommaire

6.1 Planification optimales des expériences : brève introduction en contexte	100
6.1.1 Modèle analytique	100
6.1.2 Planification des observations	101
6.1.3 Matrice d'information	101
6.1.4 Indices d'Observabilité : des critères d'Optimalité du réseau de capteurs .	102
6.2 Analyse de l'incertitude	104
6.2.1 Dynamique de l'incertitude	104
6.2.2 Matrice d'incertitude	105
6.2.3 Application à des capteurs usuels	106
6.3 Études de cas au salon	111
6.3.1 Énoncé des problèmes	111
6.3.2 Cas Simple	114
6.3.3 Cas Réel	127
6.4 Application à la conception d'environnement instrumenté	131
6.4.1 Capteurs binaires	131
6.4.2 Optimisation multi-objectifs	132
6.4.3 Analyse par intervalles	133

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à une méthodologie alternative pour représenter et évaluer le réseaux de capteurs, décorrélée du modèle des activités et du modèle des régions. Nous modélisons les capteurs et l'action par un *modèle analytique* fondé sur une représentation d'état et sur les outils développés en planification optimale des expériences. Une telle approche est utilisée à priori ou lors d'expériences afin de guider la prise de mesure pour identifier les paramètres d'un modèle, où ces paramètres sont une caractéristique de l'action à capter. Il s'agit ainsi de sélectionner les mesures et leurs configurations capteurs associés permettant de réduire l'incertitude sur cette caractéristique estimée. Pour ce faire, nous utilisons des critères d'optimalité nommés indices d'**Observabilité**, issus de la Théorie des Conceptions Convexes et utilisés pour la calibration en Robotique. Nous adaptons ces méthodes pour une conception sans expérience en considérant une distribution centrée de l'incertitude non obligatoirement connue. Nous évaluons le placement des capteurs selon ces mêmes critères d'Optimalité.

Chronologiquement, nous avons développé cette méthodologie alternative au préalable des modèles des actions et des régions. En perspective, notre évaluation de la fiabilité F_β s'intéresse

à la –région de– couverture de la caractéristique d’action (*i.e.* un ensemble de valeur de cette caractéristique), alors que l’observabilité s’intéresse à la fiabilité de l’estimation d’une –région de– mesure (*i.e.* une valeur particulière de cette caractéristique). Où notre première évaluation permet de qualifier globalement la fiabilité de l’action au regard de sa région d’intérêt caractérisée¹, l’évaluation de l’Observabilité permet de qualifier particulièrement la fiabilité d’un élément de cette même région d’intérêt ; ayant autant d’objectifs que d’éléments inclus dans la région d’intérêt. Afin d’homogénéiser cette thèse, nous reportons en annexe B l’introduction détaillée de la planification optimale des expériences mettant en exergue notre contribution technique. La planification est fondée sur l’Identification de Paramètres², et contribue à améliorer et à rendre robuste aux incertitudes de mesures l’estimation des paramètres en situation³. Formellement, chaque capteur dispose d’une configuration⁴ –dénommée commandes u – et réalise des mesures –dénommées sorties y – afin d’estimer une caractéristique d’intérêt –dénommée paramètres x – ; *e.g.* une position de la personne. Le modèle analytique liant formellement ces trois catégories de variables, nous pouvons estimer la caractéristique d’intérêt par connaissance des configurations et mesures des capteurs. En terme de conception, nous agissons directement sur la configuration des capteurs afin d’influer indirectement sur ses mesures, qui fournissent des informations sur la caractéristique d’intérêt. La qualité de ces informations est déterminée à partir du modèle analytique, elle est représentée sous la forme d’une matrice intitulée *matrice d’information*.

Nous appliquons la planification optimale des expériences à notre contexte de veille à la personne. Pour ce faire, nous développons une nouvelle matrice d’information pour rendre robuste le placement de capteurs aux diverses incertitudes, étant intitulée *matrice d’incertitude*. Au travers d’une étude de cas, nous illustrons ensuite cette méthodologie alternative de conception en la comparant au modèle des régions. Nous introduisons au préalable brièvement en contexte le modèle analytique et les critères d’optimalité pour le placement des capteurs.

6.1 Planification optimale des expériences : brève introduction en contexte

La planification optimale des expériences⁵ consiste à concevoir une expérience contrôlée concernant la collecte de données sujettes aux incertitudes. Ces données captées détiennent des informations précieuses permettant d’estimer les paramètres d’un modèle analytique : *e.g.* une caractéristique particulière⁶ d’action. La collecte réalisée est ainsi optimale selon un critère statistique synthétisant toutes les informations en une unique valeur. Par conséquent, nous réalisons une analyse de l’incertitude des différentes variables –étant sources incertitudes du modèle analytique– afin d’identifier leur dynamique de propagation et de réduire leur effets sur la caractéristique particulière⁷ d’action.

6.1.1 Modèle analytique

Le modèle analytique représente le phénomène physique à l’œuvre pour capter la caractéristique d’action. Nous définissons que ce phénomène est décrit par un modèle aux erreurs homogènes fondé sur une représentation d’état⁸, dépendant d’un ensemble de variables : la *caractéristique* d’action x à estimer, les *configurations* des capteurs u à sélectionner, les *mesures*

1 *e.g.* une région de lieux, d’interactions 2 *angl.* parameter identification

3 lors d’expériences, avec des données capteurs réelles 4 *i.e.* position ou orientation

5 *angl.* optimal design of experiments 6 une valeur donnée de cette caractéristique à estimer

7 étant un élément particulier d’une région d’intérêt 8 *angl.* time-invariant state-space model

y captées. Chaque observation k satisfait idéalement l'équation suivante :

$$f(u_k, x, y_k) = 0 \quad (6.1)$$

Chacune des variables de ce modèle parfait en équation 6.1 est sujette à l'incertitude, étant caractérisée –*e.g.* x – par sa vraie valeur x^* et son incertitude δx telle que $x = x^* - \delta x$. Ainsi pour la k -ième observation, notre *modèle analytique* est le suivant :

$$f(u_k^*, x^*, y_k^*) = f(u_k + \delta u_k, x^*, y_k + \delta y_k) = 0 \quad (6.2)$$

Estimer la caractéristique d'action nécessite une grande quantité de données réelles : il s'agit de réaliser des expériences afin de recueillir ces données par capteurs.

6.1.2 Planification des observations

Chaque donnée potentielle n'apporte pas la même qualité informationnelle : certaines données vont permettre une meilleure estimation améliorant sa précision, en étant plus efficace et rapide. Nous planifions judicieusement la collecte des données en sélectionnant les données à la qualité informationnelle riche, permettant ainsi d'atteindre (en fonctionnement) son estimation précise. Cette collecte est effective une fois le réseau de capteurs installé et en fonctionnement, intitulée *expérience*, afin de disposer de données réelles pour une caractéristique d'action à estimer. En réalité, l'estimation de la caractéristique est meilleure si celle-ci est invariante afin de régresser une large quantité de données convergentes ; *e.g.* une personne à position fixe.

Pour chaque expérience, nous avons un ensemble de N observations étant chaque configuration u_k et chaque mesure y_k des capteurs. Nous définissons la *conception d'expérience* notée ξ_N étant l'ensemble contenant toutes les configurations des capteurs u_k à appliquer lors de l'expérience, et le nombre de reproduction⁹ r_k des mesures par capteur S_k pour en obtenir plusieurs pour chaque configuration u_k ; *cf.* équation 6.3 [Fed⁺13]. Nous dénotons qu'une conception d'expérience ξ_N appliquée conduit à différentes réalisations, et à différents résultats d'expérience compte-tenu de la nature aléatoire de l'incertitude. Par nature, la conception d'expérience ξ_N est une collection indépendante de toutes réalisations.

$$\xi_N = \left\{ \begin{array}{l} u_1, \dots, u_K \\ r_1, \dots, r_K \end{array} \right\} = \{u_k, r_k\}_1^K \quad | \quad N = \sum_{k=1}^K r_k \quad (6.3)$$

La conception d'expérience et le modèle analytique influencent en aval le processus d'identification et la qualité de l'estimation : le critère statistique qualifiant le réseau de capteurs est fondé sur le modèle analytique et sur les mesures captées. En étudiant le modèle analytique, nous pouvons qualifier c'est-à-dire quantifier les informations à disposition de l'estimateur afin que la caractéristique à estimer soit **proche** et **non-dispersée** de sa valeur réelle et inconnue. Il s'agit d'approximer l'incertitude multi-dimensionnelle sur la caractéristique x , notée δx . Traditionnellement, ces informations sont synthétisées sous forme matricielle au sein de la *matrice d'information*, correspondant à l'inverse de la *matrice de dispersion* et qualifiant "*l'incertitude*" de l'estimation.

⁹ conditionnant la durée de l'expérience, soit la durée où la caractéristique (*e.g.* la personne) doit-être immobile pour être estimée

6.1.3 Matrice d'information

La *matrice d'information*¹⁰ de la conception ξ_N est une matrice rassemblant toutes les informations nécessaires sur la précision des données de la conception d'expérience ξ_N , notée $\mathbf{M}(\xi_N)$. Cette matrice est symétrique définie positive et additive : elle est définie étant la somme des matrices d'informations de chaque observation k . Ainsi, chaque observation indépendante supplémentaire (ajoutée) augmente la matrice de nouvelles informations (quantité). La matrice d'information est déterminée par la conception ξ_N , elle ne dépend pas des mesures captées mais des configurations connues précisément (éventuellement à capter).

Pour les modèles linéaires, la matrice d'information ne dépend pas de la caractéristique x . Par définition, elle est l'inverse de la *matrice de dispersion*¹¹, notée $\mathbf{D}(\xi_N)$. Cette matrice \mathbf{D} rassemble l'incertitude soit la variance –notée σ_{x_l} – associée à chaque *sous-caractéristique* x_l tel que $x_l \in x = [x_1 \dots x_L]$. L'existence de la matrice de dispersion implique que la conception ξ_N est *suffisante* pour l'estimation de la caractéristique x [Fed⁺13].

Sous sa forme classique exprimée pour l'estimateur des moindres carrés, nous définissons la matrice d'information ainsi [Fed⁺13] :

$$\mathbf{M}(\xi_N, x) = \sigma^{-2} \cdot \sum_{k=1}^K r_k \frac{\partial g(u_k, x)}{\partial x} \frac{\partial g(u_k, x)}{\partial x}^T \quad (6.4)$$

$$\text{Var}[x_N] = \mathbf{D}(\xi_N, x) \cong \mathbf{M}(\xi_N, x)^{-1} \quad (6.5)$$

où x est assez proche de x^* , et $g(u, x) = f(u, x, y) - y$ est une forme particulière de notre modèle analytique où y peut-être exprimée décorrélée des autres variables u et x .

À partir du modèle analytique et des observations, nous pouvons définir la matrice d'information $\mathbf{M}(\xi_N)$ par le produit matriciel suivant [Tor84] :

$$\mathbf{M}(\xi_N, x) = \mathbf{G}_x \Sigma^{-1} \mathbf{G}_x^T \quad (6.6)$$

où \mathbf{G}_x est la matrice jacobienne de la caractéristique x calculée pour la fonction $g(u, x) = y$, au voisinage de x^* en l'estimée¹² notée \hat{x} . Sans reproduction des mesures pour $r_k = 1 \forall k$, nous avons ainsi :

$$\mathbf{G}_x : \mathbf{G}_x[\hat{x}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial g(u_1, x)}{\partial x_1} \Big|_{x=\hat{x}} & \cdots & \frac{\partial g(u_1, x)}{\partial x_L} \Big|_{x=\hat{x}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g(u_N, x)}{\partial x_1} \Big|_{x=\hat{x}} & \cdots & \frac{\partial g(u_N, x)}{\partial x_L} \Big|_{x=\hat{x}} \end{bmatrix}^T \quad (6.7)$$

où, Σ est la matrice de variance de l'erreur d'observation ϵ :

$$\Sigma = \text{Var}[\epsilon] = \mathbf{E} \left[(\epsilon - \mathbf{E}[\epsilon]) (\epsilon - \mathbf{E}[\epsilon])^T \right] \quad (6.8)$$

soit pour nos erreurs non-corrélées et identiques, cf. équation B.5 :

$$\Sigma = \sigma^2 \cdot I_L \quad (6.9)$$

¹⁰ angl. information matrix ¹¹ angl. dispersion matrix

¹² en planification optimale des expériences la caractéristique n'est pas connue car elle doit être identifiée cf. B

6.1.4 Indices d'Observabilité : des critères d'Optimalité du réseau de capteurs

Idéalement à dessein de planification optimale, nous souhaitons déterminer la conception ξ_N minimisant l'incertitude sur la caractéristique : soit déterminer la conception ξ_N en “*maximisant*” la matrice d'information \mathbf{M} , soit en “*minimisant*” la matrice de dispersion \mathbf{D} contenant L variances. La planification optimale des expériences est un problème multi-objectifs (MO), où chaque variance σ_{x_l} –associée à la *sous-caractéristique* x_l – est une fonction objectif à optimiser. La solution à ce problème optimisation n'existe pas simplement, même pour des modèles simples linéaires [Fed⁺13]. Ainsi, des objectifs d'optimisation plus modestes sont utilisés en considérant le problème d'optimisation suivant [Fed⁺13] :

$$\widehat{\xi}_N = \underset{\xi_N}{\text{ArgMax}} \Psi [\mathbf{M} (\xi_N)] = \underset{\xi_N}{\text{ArgMin}} \Psi [\mathbf{D} (\xi_N)] \quad (6.10)$$

où Ψ est une fonction scalaire appelée critère d'Optimalité.

Ce critère statistique d'optimalité Ψ synthétise toutes les informations captées en une unique valeur, en combinant judicieusement les informations sur chaque variance σ_{x_l} . Ainsi, la qualité informationnelle des observations est exprimée au travers d'un critère statistique d'Optimalité Ψ , déterminé numériquement à partir de la matrice d'information. Dans la littérature, ces critères Ψ sont largement étudiés en Statistique pour la planification optimale des expériences appelés *critères d'Optimalité*, et en Robotique pour la calibration appelés *indices d'Observabilité*. La plupart de ces critères sont équivalents, étant simplement définis selon des approches différentes.

En planification d'expériences, la qualité informationnelle de l'expérience est quantifiée en étudiant la matrice de dispersion \mathbf{D} –ou son équivalent inverse, la matrice d'information \mathbf{M} – [Fed⁺13]. Les critères d'Optimalité sont définissables à partir des valeurs propres λ_l de la matrice de dispersion \mathbf{D} [Fed⁺13]. En Robotique, la qualité informationnelle de la calibration –*i.e.* la conception– est quantifiée en étudiant la matrice de régression notée \mathbf{A} [Hol⁺08][Sic⁺16], où en non-linéaire $\mathbf{A} = \mathbf{G}_r$. Les indices d'Observabilité notés O sont définis à partir des valeurs singulières μ_l issues de la décomposition en valeur singulière¹³ (SVD) de la matrice \mathbf{A} [Hol⁺08][Sic⁺16]. Un avantage de ces indices est de pouvoir les calculer numériquement de manière précise et rapide directement à partir de la matrice \mathbf{A} , se passant du calcul de $\mathbf{A}\mathbf{A}^T$. En Robotique, le problème d'optimisation considéré est ainsi le suivant :

$$\widehat{\xi}_N = \underset{\xi_N}{\text{ArgMax}} O [\mathbf{A} (\xi_N)] \quad (6.11)$$

Nous dénotons un fort attrait dans les domaines pour le *D-critère* en planification optimale des expériences, et l'indice O_1 son équivalent en Robotique ; *cf.* équation 6.12. Sun et Hollerbach [Sun⁺08] affirment que l'indice O_1 –ou D-critère– est le meilleur critère pour minimiser la variance de tous les paramètres et estimer les paramètres d'un modèle non-proportionné¹⁴ ou mal-proportionné, voire un modèle dont l'approche de mise-à-l'échelle¹⁵ n'est pas convaincante. Fedorov et Leonov [Fed⁺13] déclarent que les conceptions D-optimales – O_1 – sont les plus populaires au sein des recherches théoriques et pratiques en planification optimale des expériences : de telles conceptions sont invariantes respectivement aux transformations sur les paramètres (*i.e.* mise-à-l'échelle) et sont attractives en pratique grâce à leurs bonnes performances, en comparaison des autres critères d'Optimalité. De plus, Joubair et al. [Jou⁺16] démontrent, en comparant les cinq principaux indices d'Observabilité pour quatre différents modèles de robots, que l'indice O_1 est le plus approprié pour la calibration améliorant le plus efficacement la précision des modèles

¹³ *angl.* singular value decomposition (SVD) ¹⁴ *angl.* unscaled model ¹⁵ *angl.* scaling approach

robotiques (*i.e.* δy).

$$\text{D-critère} = \text{Det}(\mathbf{D}) = \text{Det}(\mathbf{M})^{-1} \iff O_1(\mathbf{A})^2 \quad | \quad O_1(\mathbf{A}) = \prod_{l=1}^L \mu_l^{1/L} \quad (6.12)$$

Afin de proposer des placements de capteurs robustes, nous analysons l'incertitude présente dans le modèle analytique afin d'anticiper et de diminuer ces incertitudes. Nous proposons une méthodologie générique considérant les diverses sources d'incertitudes (*i.e.* mesures des capteurs, installation des capteurs, approximation du modèle) de manière simplifiée et rapide. Nous utilisons similairement les outils développés en planification optimale des expériences en appliquant directement les indices d'Observabilité sur notre nouvelle matrice d'information.

6.2 Analyse de l'incertitude

L'analyse de l'incertitude consiste à étudier le comportement de la conception ξ_N au voisinage de la solution exacte x^* en s'intéressant aux variations des variables sujettes à l'incertitude : la caractéristique d'action x , les configurations des capteurs u , et les mesures des capteurs y . L'incertitude de l'estimation δx est liée à l'incertitude des mesures δy et à l'incertitude des configurations δu des capteurs. Nous définissons la *matrice d'incertitude* exprimant une relation linéaire entre les incertitudes et contenant les informations nécessaires pour la planification optimale des expériences.

6.2.1 Dynamique de l'incertitude

Notre analyse de l'incertitude vise à comparer des placements-solutions au regard d'une caractéristique particulière¹⁶ x : nous ne nous intéressons pas à évaluer précisément son incertitude δx mais sa dynamique d'incertitude, en fonction des diverses sources influençant cette incertitude.

En réalité, cette incertitude de la caractéristique –notée– δx peut-être analysée en utilisant le développement limité de Taylor à l'ordre 1 au voisinage de la solution exacte, soit des variables réelles $\{u^*, x^*, y^*\}$. Il s'agit d'analyser le comportement du système f aux perturbations (en valeurs) de ses variables $\{\delta u, \delta x, \delta y\}$. Nous avons quel que soit l'ensemble des variables $\{u, x, y\}$:

$$\begin{aligned} f(u, x, y) &= f(u^* - \delta u, x^* - \delta x, y^* - \delta y) \\ &\approx f(u^*, x^*, y^*) - \frac{\partial f(u, x, y)}{\partial u} [u^*] \cdot \delta u - \frac{\partial f(u, x, y)}{\partial x} [x^*] \cdot \delta x - \frac{\partial f(u, x, y)}{\partial y} [y^*] \cdot \delta y \\ \delta f &= f(u, x, y) - f(u^*, x^*, y^*) \approx -J_u [u^*] \cdot \delta u - J_x [x^*] \cdot \delta x - J_y [y^*] \cdot \delta y \end{aligned} \quad (6.13)$$

obtenant, sous forme matricielle :

$$\delta \mathbf{f} \approx \mathbf{J}_u [u^*] \cdot \delta \mathbf{u} + \mathbf{J}_x [x^*] \cdot \delta x + \mathbf{J}_y [y^*] \cdot \delta \mathbf{y} \quad (6.14)$$

avec

$$\mathbf{J}_x : \mathbf{J}_x [\hat{x}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(u_1, x, y_1)}{\partial x_1} \Big|_{x=\hat{x}} & \cdots & \frac{\partial f(u_1, x, y_1)}{\partial x_L} \Big|_{x=\hat{x}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f(u_N, x, y_N)}{\partial x_1} \Big|_{x=\hat{x}} & \cdots & \frac{\partial f(u_N, x, y_N)}{\partial x_L} \Big|_{x=\hat{x}} \end{bmatrix}^T \quad (6.15)$$

¹⁶ étant un élément particulier d'une région d'intérêt

où $\delta \mathbf{f} = \left[f(u_1, x, y_1) - f(u_1^*, x^*, y_1^*) \quad \dots \quad f(u_K, x, y_K) - f(u_K^*, x^*, y_K^*) \right]^T$, $\delta \mathbf{u} = \left[\delta u_1 \quad \dots \quad \delta u_K \right]^T$, et $\delta \mathbf{y} = \left[\delta y_1 \quad \dots \quad \delta y_K \right]^T$.

Pour une planification optimale des expériences futures (*i.e.* l'identification future de la caractéristique particulière), nous devons considérer toutes les Jacobiennes afin d'assurer quelles que soient les incertitudes rencontrées lors de l'expérience, pour toutes les expériences possibles, que notre conception ξ_N est optimale. Nous optimisons la conception en considérant une nouvelle matrice synthétisant toutes les sources d'incertitudes actives et leur Jacobienne associée : la *matrice d'incertitude*.

6.2.2 Matrice d'incertitude

À partir du développement limité de Taylor à l'ordre 1, nous mettons en exergue la dynamique entre les diverses incertitudes : l'erreur résiduelle δf commise, les incertitudes sur la caractéristique δx , sur les configurations δu et les mesures δy des capteurs au voisinage des variables réelles $\{u^*, x^*, y^*\}$; *cf.* équation 6.13. Nous définissons ainsi l'incertitude la caractéristique δx étant une relation linéaire entre une matrice notée \mathbf{U} et les incertitudes du modèle δf , des configurations δu et des mesures δy des capteurs. Nous avons ainsi :

- pour chaque observation :

$$\delta x = -J_x^+[x^*] \cdot \begin{bmatrix} J_u[u^*] & J_y[y^*] & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta u \\ \delta y \\ \delta f \end{bmatrix} = -J_x^+[x^*] \cdot \mathbf{u}[u^*, y^*] \cdot \begin{bmatrix} \delta u \\ \delta y \\ \delta f \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

- pour la conception ξ_N :

$$\begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \vdots \\ \delta x_L \end{bmatrix} = -\mathbf{J}_x^+[x^*] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{u}_2 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \mathbf{u}_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta v_1 \\ \delta v_2 \\ \vdots \\ \delta v_N \end{bmatrix} = \mathbf{U}[u^*, x^*, y^*] \cdot \begin{bmatrix} \delta v_1 \\ \delta v_2 \\ \vdots \\ \delta v_N \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

$$\begin{bmatrix} \delta v_1 \\ \delta v_2 \\ \vdots \\ \delta v_N \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{u}_2 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \mathbf{u}_N \end{bmatrix}^+ \cdot \mathbf{J}_x[x^*] \cdot \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \vdots \\ \delta x_L \end{bmatrix} = \mathbf{U}^-[u^*, x^*, y^*] \cdot \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \vdots \\ \delta x_L \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

avec :

$$\mathbf{u}_k[u_k^*, y_k^*] = \begin{bmatrix} J_u[u_k^*] & J_y[y_k^*] & -1 \end{bmatrix} \quad \delta v_k = \begin{bmatrix} \delta u_k & \delta y_k & \delta f_k \end{bmatrix}^T \quad (6.19)$$

où \mathbf{U} est la matrice d'incertitude¹⁷, \mathbf{U}^- étant son "inverse"¹⁸ telle que $\mathbf{U}^{-T}\mathbf{U}^- = (\mathbf{U}\mathbf{U}^T)^{-1}$, \mathbf{J}_x^+ est la pseudo inverse de Moore-Penrose de la matrice \mathbf{J}_x , et J_a est un vecteur jacobien de la matrice Jacobienne \mathbf{J}_a tel que $\mathbf{J}_a = \begin{bmatrix} J_a[a_1] & \dots & J_a[a_N] \end{bmatrix}^T$.

L'équation 6.16 définit l'influence des sources d'incertitude $\{\delta u, \delta y, \delta f\}$ sur l'incertitude de la caractéristique δx . Dans l'éventualité où certaines incertitudes sont nulles *-i.e.* δf voire

¹⁷ calculée à gauche ¹⁸ calculée à droite

δu -, ne contribuant à l'incertitude sur la caractéristique, nous pouvons simplifier l'écriture de notre matrice d'incertitude \mathbf{U} en retirant ces éventuelles incertitudes de l'équation 6.14 initiale. Par conséquent, nous obtenons respectivement les vecteurs \mathbf{u}_k et δv_k suivant :

- pour une incertitude/approximation du modèle δf négligeable ou inexistante :

$$\mathbf{u}_k[u_k^*, y_k^*] = \begin{bmatrix} J_u[u_k^*] & J_y[y_k^*] \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \delta v_k = \begin{bmatrix} \delta u_k & \delta y_k \end{bmatrix}^T \quad (6.20)$$

- cumulée pour une incertitude des configurations δu négligeable ou inexistante –cas de la matrice d'information \mathbf{M} – :

$$\mathbf{u}_k[u_k^*, y_k^*] = J_y[y_k^*] \quad \text{et} \quad \delta v_k = \delta y_k \quad (6.21)$$

Contrairement à la matrice d'information \mathbf{M} définie en équation B.10, la matrice d'incertitude \mathbf{U} n'est pas définie étant dépendante de la variance de l'estimation ; imposant seulement que la loi de probabilité (inconnue) des variables aléatoires $\{u, x, y\}$ soit centrée. En effet, l'objectif de notre conception d'environnement instrumenté est de déterminer une configuration optimale ξ_N pour les capteurs à disposition, en proposant une méthodologie de conception simple et peu contraignante.

Nous affirmons qu'il est intéressant d'appliquer les critères d'optimalité à cette matrice $\mathbf{U}(\xi_N)$ lors de la conception ξ_N , telle que :

$$\begin{aligned} \hat{\xi}_N &= \underset{\xi_N}{\text{ArgMin}} \Psi \left[\mathbf{U}(\xi_N) \mathbf{U}^T(\xi_N) \right] = \underset{\xi_N}{\text{ArgMax}} \Psi \left[\mathbf{U}^{-T}(\xi_N) \mathbf{U}^{-}(\xi_N) \right] \\ &= \underset{\xi_N}{\text{ArgMin}} \text{O} \left[\mathbf{U}(\xi_N) \right] = \underset{\xi_N}{\text{ArgMax}} \text{O} \left[\mathbf{U}^{-}(\xi_N) \right] \end{aligned} \quad (6.22)$$

La matrice d'incertitude permet de guider la conception à être robuste aux incertitudes au **voisinage des variables réelles** $\{u^*, x^*, y^*\}$, considérant que u et y seront assez proches respectivement de u^* et y^* qu'ils en seront une approximation précise [Tor84] ; condition nécessaire pour la validité du développement limité de Taylor. Elle **représente la dynamique** des sources d'incertitudes. Par ailleurs, l'incertitude sur la caractéristique δx commise pour une expérience réalisée $\{u, y\}$ peut-être approximée/encadrée par des méthodes d'analyse par intervalles –*e.g.* moindres carrés par intervalle [Bla⁺13][San13], méthode de localisation ensembliste [Guy13]–, voire par les intervalles de crédibilité Bayésienne pour des densités de probabilité connues.

Ainsi, nous analysons et comparons la matrice d'incertitude à la matrice d'information en développant les expressions littérales du D-critère de cette première pour des capteurs usuels.

6.2.3 Application à des capteurs usuels

Nous développons les expressions littérales du D-critère pour des capteurs usuels et simples : *i.e.* capteur d'angle, et capteur de distance. Nous proposons de mettre en exergue les variables influençant l'incertitude sur la caractéristique et leur dynamique, ainsi que le lien entre la matrice d'information \mathbf{M} et celle d'incertitude \mathbf{U} .

6.2.3.1 Capteur d'angle

Nous définissons qu'un capteur d'angle mesure la direction entre le capteur et une cible : habituellement ces capteurs se basent sur la transmission et réception de signaux entre une cible et le capteur, en utilisant des antennes directionnelles ou de multiples antennes spécialement

configurées pour mesurer l'angle d'arrivée¹⁹ (AoA) du signal reçu de la source cible. La mesure d'angle d'un tel capteur est défini par :

$$\theta_k = \text{ArcTan2} \left(\frac{y_S - y_k}{x_S - x_k} \right) + \epsilon_k \quad (6.23)$$

où la position du capteur R_k constitue les configurations commandables $u_k = [x_k \ y_k]$, la position de la source S constitue la caractéristique particulière $x = [x_S \ y_S]$, et l'angle mesuré θ_k constitue la mesure $y_k = [\theta_k]$.

Matrice d'incertitude À chaque observation k , le produit scalaire entre un vecteur directeur de la droite $(S - R_k)$ et son vecteur normal N_k est nulle, soit $N_k^T \cdot (S - R_k) = 0$; où $N_k^T = [\sin(\theta_k) \ -\cos(\theta_k)]^T$ est le vecteur normal de la ligne (SR_k) , et $(S - R_k)$ est un vecteur directeur de la ligne (SR_k) . Nous définissons le système f suivant, quel que soit l'ensemble des variables $\{u, x, y\}$:

$$f(u, x, y) = [\sin(y) \ -\cos(y)]^T \cdot (x - u) = \epsilon \quad (6.24)$$

Ainsi, nous avons pour un ensemble quelconque des variables $\{u, x, y\}$:

$$J_u(x, y)[u] = \frac{\partial}{\partial u} \left([\sin(y) \ -\cos(y)]^T \cdot (x - u) \right) [u] = [\sin(y) \ -\cos(y)]^T \quad (6.25)$$

$$J_x(u, y)[x] = \frac{\partial}{\partial x} \left([\sin(y) \ -\cos(y)]^T \cdot (x - u) \right) [x] = [\sin(y) \ -\cos(y)]^T \quad (6.26)$$

$$\begin{aligned} J_y(u, x)[y] &= \frac{\partial}{\partial y} \left([\sin(y) \ -\cos(y)]^T \cdot (x - u) \right) [y] = [\cos(y) \ -\sin(y)]^T \cdot (x - u) \\ &= [\cos(y) \ -\sin(y)]^T \cdot [\rho[u, x] \cdot \cos(\phi[u, x]) \ \rho[u, x] \cdot \sin(\phi[u, x])]^T \\ &= \rho[u, x] \cdot \cos(\phi[u, x] - y) \\ &= \|x - u\| \quad \text{si et seulement si } u = u^*, \ x = x^* \text{ et } y = y^* = \phi[u^*, x^*] \end{aligned} \quad (6.27)$$

où $\rho[u, x] = \|x - u\|$ est la distance euclidienne entre le capteur et la source, et $\phi[u, x]$ est l'angle entre le capteur et la source. Nous dénotons que $J_y(u, x)[y] \rightarrow \rho[u^*, x^*]$ si et seulement si $u \rightarrow u^*$ et $x \rightarrow x^*$ et $y \rightarrow y^* \implies \rho[u, x] \rightarrow \rho[u^*, x^*]$ et $\phi[u, x] \rightarrow \phi[u^*, x^*]$. Dans notre cas, les Jacobiennes sont déterminées au voisinage de la solution exacte $\{u^*, x^*, y^*\}$ connue.

Pour ce capteur, notre modèle f représente parfaitement le modèle : nous négligeons ainsi son incertitude δf ; cf. équation 6.20. Nous définissons ainsi :

- pour une incertitude des configurations δu négligeable ou inexistante –cas de la matrice d'information \mathbf{M} , développement en annexe C.1.1– :

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_k = [\rho_k^*] &\implies \mathbf{U}^- = \begin{bmatrix} -\rho_1^{*-1} \sin \theta_1^* & \rho_1^{*-1} \cos \theta_1^* \\ \vdots & \vdots \\ -\rho_N^{*-1} \sin \theta_N^* & \rho_N^{*-1} \cos \theta_N^* \end{bmatrix} \\ &\implies (\mathbf{U}\mathbf{U}^T)^{-1} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2} \sin^2 \theta_k^* & \sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \\ \sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* & \sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2} \cos^2 \theta_k^* \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.28)$$

¹⁹ angl. angle of arrival (AoA)

- pour seulement notre modèle f parfait –développement en annexe C.1.2– :

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_k &= \begin{bmatrix} \sin \theta_k^* & -\cos \theta_k^* & \rho_k^* \end{bmatrix} \\ \Rightarrow \mathbf{U}\mathbf{U}^T &= \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \sin^2(\theta_l^* - \theta_k^*) \right)^{-2} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 & \mathbf{w}_3 \\ \mathbf{w}_3 & \mathbf{w}_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.29)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_1 &= \sum_{l=1}^N \left(\begin{array}{l} \left[\sin^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) + \sin \theta_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right]^2 \\ - \left[\cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) + \cos^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right]^2 \\ - \left[\rho_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) + \rho_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right]^2 \end{array} \right) \\ \mathbf{w}_3 &= \sum_{l=1}^N \left(\begin{array}{l} \left[\sin^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) + \sin \theta_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right] \\ \times \left[-\sin^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) - \sin \theta_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \right] \\ - \left[\cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) + \cos^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right] \\ \times \left[\cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) + \cos^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \right] \\ - \left[\rho_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) + \rho_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right] \\ \times \left[\rho_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) + \rho_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \right] \end{array} \right) \\ \mathbf{w}_2 &= \sum_{l=1}^N \left(\begin{array}{l} \left[-\sin^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) - \sin \theta_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \right]^2 \\ + \left[\cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) + \cos^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \right]^2 \\ + \left[\rho_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) + \rho_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \right]^2 \end{array} \right) \end{aligned}$$

avec les vraies valeurs des variables $\rho_k^* = \|x^* - u_k^*\|$ et $\theta_k^* = y_k^*$.

Dans le cas le plus simple en équation 6.28, notre matrice d'incertitude est proportionnelle à la matrice d'information \mathbf{M} , définie en équation B.8, telle que $(\mathbf{U}\mathbf{U}^T)^{-1} = \sigma^2 \mathbf{M}(\xi_N)$ pour des erreurs “normales” ; cf. [Doğ⁺08].

D-critère Nous pouvons ainsi calculer le D-critère correspondant au Déterminant du produit matriciel $\mathbf{U}^T\mathbf{U}$; l'indice $O_1(\mathbf{U})$ étant calculé à partir des valeurs singulières de \mathbf{U} , nommément $\text{SVD}(\mathbf{U})$. Directement, nous avons respectivement à partir des équations 6.29 et 6.28 :

- pour une incertitude des configurations δu négligeable ou inexistante –cas de la matrice d'information \mathbf{M} , cf. équation C.2 en annexe C.1.1– :

$$\text{Det}(\mathbf{U}\mathbf{U}^T)^{-1} = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \left(\rho_k^{*-1} \rho_l^{*-1} \sin(\theta_l^* - \theta_k^*) \right)^2 \quad (6.30)$$

- pour notre modèle f parfait :

$$\text{Det}(\mathbf{U}\mathbf{U}^T) = \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \sin^2(\theta_l^* - \theta_k^*) \right)^{-2} \cdot (\mathbf{w}_1 \cdot \mathbf{w}_2 - \mathbf{w}_3^2) \quad (6.31)$$

Notre déterminant en équation 6.30 correspond au D-critère de la matrice d'information (de Fisher) [Bis⁺10], modulo σ^{-4} . Ainsi nous pouvons utiliser directement l'indice O_1 sur notre matrice d'incertitude simplifiée \mathbf{U} , définie en équation 6.28.

La forme littérale du déterminant nous permet de visualiser la dynamique entre les diverses configurations ξ_N et les variables influençant les performances de la future estimation²⁰, étant les distances à la source ρ_k^* et les inter-angles $\theta_l^* - \theta_k^*$. Par ailleurs, nous pouvons déterminer pour une nouvelle mesure ajoutée une mise à jour du déterminant notée δDet mettant en exergue ces “influenceurs”, qui est pour le cas simple :

$$\delta \text{Det}^{-1}[\mathbf{U}\mathbf{U}^T]_{N+1} = \sum_{k=1}^N \left(\rho_k^{*-1} \rho_{N+1}^{*-1} \sin(\theta_{N+1}^* - \theta_k^*) \right)^2 \quad (6.32)$$

6.2.3.2 Capteur de distance

Nous définissons qu'un capteur de distance mesure la longueur euclidienne entre le capteur et une cible : habituellement ces capteurs se basent sur la transmission et réflexion de signaux entre une cible et le capteur, en utilisant une onde projetée *-e.g.* ultrason ou laser – spécialement configurée pour mesurer le temps d'arrivée²¹ (ToA) du signal réfléchi par la source cible. La mesure de distance d'un tel capteur est défini par :

$$\tau_k = \frac{\rho_k}{\nu} \approx \frac{\|S - R_k\|}{\nu} + \epsilon_k(\tau) \quad (6.33)$$

où la position du capteur R_k constitue les configurations commandables $u_k = [x_k \ y_k]$, la position de la source S constitue la caractéristique particulière $x = [x_S \ y_S]$, le temps mesuré τ_k constitue la mesure réelle du capteur, et la distance calculée ρ_k est une mesure délivrée mais reconstituée $y_k = [\rho_k] = [\tau_k \nu^{-1}]$.

Matrice d'incertitude À chaque observation k , la distance ρ_k est définie par la norme euclidienne suivante : $\rho_k = \|S - R_k\|$; où ρ_k est la longueur du segment $[SR_k]$. Nous définissons le système f suivant, quel que soit l'ensemble des variables erronées $\{u, x, y\}$:

$$f(u, x, y) = \rho_k^2 - (x - u) \cdot (x - u)^T = \epsilon \quad (6.34)$$

Ainsi, nous avons pour un ensemble quelconque des variables $\{u, x, y\}$:

$$\begin{aligned} J_u(x, y)[u] &= \frac{\partial}{\partial u} \left(y^2 - (x - u) \cdot (x - u)^T \right) [u] = 2(x - u) = 2 \begin{bmatrix} \delta x & \delta y \end{bmatrix}^T \\ &= 2 \rho[u, x] \begin{bmatrix} \cos \theta_k[u, x] & \sin \theta_k[u, x] \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (6.35)$$

$$\begin{aligned} J_x(u, y)[x] &= \frac{\partial}{\partial x} \left(y^2 - (x - u) \cdot (x - u)^T \right) [x] = -2(x - u) = -2 \begin{bmatrix} \delta x & \delta y \end{bmatrix}^T \\ &= -2 \rho[u, x] \begin{bmatrix} \cos \theta_k[u, x] & \sin \theta_k[u, x] \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (6.36)$$

$$\begin{aligned} J_y(u, x)[y] &= \frac{\partial}{\partial y} \left(y^2 - (x - u) \cdot (x - u)^T \right) [y] = 2y \\ &= 2 \|x - u\| \quad \text{si et seulement si } u = u^*, x = x^* \text{ et } y = y^* = \rho[u^*, x^*] \end{aligned} \quad (6.37)$$

où $\rho[u, x] = \|x - u\|$ est la distance euclidienne entre le capteur et la source, et $\theta[u, x]$ est l'angle entre le capteur et la source. Nous dénotons que $J_y(u, x)[y] \rightarrow 2 \|x - u\|$ si et seulement si $u \rightarrow u^*$ et $x \rightarrow x^*$ et $y \rightarrow y^* \implies y \rightarrow \rho^* = \|x^* - u^*\|$.

Pour ce capteur, notre modèle f représente parfaitement le modèle : nous négligeons ainsi son incertitude δf ; cf. équation 6.20. Nous définissons ainsi :

²⁰ *i.e.* l'étape en aval d'Identification de Paramètres, soit l'estimation de la caractéristique

²¹ *angl.* time of arrival (ToA)

- pour une incertitude des configurations δu négligeable ou inexistante –cas de la matrice d'information \mathbf{M} , développement en annexe C.2.1– :

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_k = [\rho_k^*] &\implies \mathbf{U}^{-1} = \begin{bmatrix} \rho_1^{*-1} \delta x_1^* & \rho_1^{*-1} \delta y_1^* \\ \vdots & \vdots \\ \rho_N^{*-1} \delta x_N^* & \rho_N^{*-1} \delta y_N^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1^* & \sin \theta_1^* \\ \vdots & \vdots \\ \cos \theta_N^* & \sin \theta_N^* \end{bmatrix} \\ &\implies (\mathbf{U}\mathbf{U}^T)^{-1} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* & \sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \\ \sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* & \sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.38)$$

- pour seulement notre modèle f parfait –développement en annexe C.2.2– :

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_k &= -[\delta x_k^* \quad \delta y_k^* \quad \rho_k^*] = -[\rho_k^* \cos \theta_k^* \quad \rho_k^* \sin \theta_k^* \quad \rho_k^*] \\ &\implies \mathbf{U}\mathbf{U}^T = \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N (\rho_k^* \rho_l^* \sin(\theta_l^* - \theta_k^*))^2 \right)^{-2} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 & \mathbf{w}_3 \\ \mathbf{w}_3 & \mathbf{w}_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.39)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_1 &= \sum_{l=1}^N \left(\begin{aligned} & \left[\rho_l^{*2} \cos^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \sin^2 \theta_k^* \right) - \rho_l^{*2} \cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right]^2 \\ & + \left[\rho_l^{*2} \cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \sin^2 \theta_k^* \right) - \rho_l^{*2} \sin^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right]^2 \\ & + \left[\rho_l^{*2} \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \sin^2 \theta_k^* \right) - \rho_l^{*2} \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right]^2 \end{aligned} \right) \\ \mathbf{w}_3 &= \sum_{l=1}^N \left(\begin{aligned} & - \left[\rho_l^{*2} \cos^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \sin^2 \theta_k^* \right) - \rho_l^{*2} \cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right] \\ & \times \left[\rho_l^{*2} \cos^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) - \rho_l^{*2} \cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \right) \right] \\ & - \left[\rho_l^{*2} \cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \sin^2 \theta_k^* \right) - \rho_l^{*2} \sin^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right] \\ & \times \left[\rho_l^{*2} \cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) - \rho_l^{*2} \sin^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \right) \right] \\ & - \left[\rho_l^{*2} \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \sin^2 \theta_k^* \right) - \rho_l^{*2} \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right] \\ & \times \left[\rho_l^{*2} \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) - \rho_l^{*2} \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \right) \right] \end{aligned} \right) \\ \mathbf{w}_2 &= \sum_{l=1}^N \left(\begin{aligned} & - \left[\rho_l^{*2} \cos^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) - \rho_l^{*2} \cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \right) \right]^2 \\ & - \left[\rho_l^{*2} \cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) - \rho_l^{*2} \sin^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \right) \right]^2 \\ & - \left[\rho_l^{*2} \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) - \rho_l^{*2} \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \right) \right]^2 \end{aligned} \right) \end{aligned}$$

avec les vraies valeurs des variables $\rho_k^* \cdot [\cos \theta_k^* \quad \sin \theta_k^*] = x^* - u_k^*$ et $\rho_k^* = y_k^*$.

Dans le cas le plus simple en équation 6.28, notre matrice d'incertitude est proportionnelle à la matrice d'information \mathbf{M} , définie en équation B.8, telle que $(\mathbf{U}\mathbf{U}^T)^{-1} = \sigma^2 \mathbf{M}(\xi_N)$; cf. [Mar⁺06].

D-critère Directement, nous avons respectivement à partir des équations 6.39 et 6.38 :

- pour une incertitude des configurations δu négligeable ou inexistante –cas de la matrice d'information \mathbf{M} , cf. équation C.6 en annexe C.2.1– :

$$\text{Det}(\mathbf{U}\mathbf{U}^T)^{-1} = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \sin^2(\theta_l^* - \theta_k^*) = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \left(\rho_k^{*-1} \rho_l^{*-1} (\delta x_k^* \delta y_l^* - \delta x_l^* \delta y_k^*) \right)^2 \quad (6.40)$$

- pour notre modèle f parfait :

$$\text{Det}(\mathbf{U}\mathbf{U}^T) = \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N (\rho_k^* \rho_l^* \sin(\theta_l^* - \theta_k^*))^2 \right)^{-2} \cdot (\mathbf{w}_1 \cdot \mathbf{w}_2 - \mathbf{w}_3^2) \quad (6.41)$$

Nous dénotons que notre déterminant en équation 6.40 correspond au D-critère de la matrice d'information (de Fisher) [Bis⁺10], modulo σ^{-4} . La forme littérale du déterminant nous permet de visualiser la dynamique entre les diverses configurations ξ_N et les variables influençant les performances de la future estimation²², étant les inter-angles $\theta_l^* - \theta_k^*$. Par ailleurs, nous pouvons déterminer pour une nouvelle mesure ajoutée une mise à jour du déterminant notée δDet mettant en exergue ces "influenceurs", qui est pour le cas simple :

$$\delta \text{Det}^{-1}[\mathbf{U}\mathbf{U}^T]_{N+1} = \sum_{k=1}^N \sin^2(\theta_{N+1}^* - \theta_k^*)^2 = \sum_{k=1}^N (\delta x_k^* \delta y_{N+1}^* - \delta x_{N+1}^* \delta y_k^*)^2 \quad (6.42)$$

Ainsi, à partir du D-critère, nous pouvons déterminer pour N capteurs les configurations de capteurs robustes aux incertitudes afin d'estimer ultérieurement la caractéristique d'action x ; *e.g.* la position invariante de la personne.

6.3 Études de cas au salon

À présent, nous présentons notre méthodologie alternative à travers des études de cas, illustrant la matrice d'incertitude proposé. Nous résolvons un problème de placement de capteurs grâce au D-critère appliqué sur la matrice d'incertitude $\mathbf{U}(\xi_N)$ développée pour des capteurs d'angle.

6.3.1 Énoncé des problèmes

Nous considérons concevoir un réseau de capteurs afin d'estimer avec précision la position x de la personne au moyen de K capteurs homogènes, étant des capteurs d'angle. Au sein du séjour, nous proposons de déterminer les configurations optimales u des capteurs en prenant en compte les erreurs de mesures δy de ces capteurs voire leurs erreurs d'installations δu . Nous limitons la région de conception \mathcal{U} –étant l'ensemble des configurations autorisées– en considérant que nos capteurs peuvent être uniquement placés sur des portions de murs ; où $\mathcal{U} \ni \forall u$, illustré en figure 6.1.

Nous nous intéressons à deux cas de conception : simple et réel.

6.3.1.1 Cas simple : estimation d'une unique position

Le cas simple et usuel concerne l'estimation d'une unique position x , en considérant le problème d'optimisation en équation 6.43 et illustré en figure 6.1.

$$\hat{\zeta}_K(x_m^*) = \underset{\zeta_K}{\text{ArgMin}} \text{O}_1[\mathbf{U}(\zeta_K, x_m^*)] = \underset{\zeta_K}{\text{ArgMax}} \text{O}_1[\mathbf{U}^-(\zeta_K, x_m^*)] \quad (6.43)$$

où $\zeta_K = \{u_1, \dots, u_K\}$ est un ensemble de K configurations commandables étant la conception simple, n'y figurant pas le nombre de réplication r_K des mesures

²² *i.e.* l'étape en aval d'Identification de Paramètres, soit l'estimation de la caractéristique

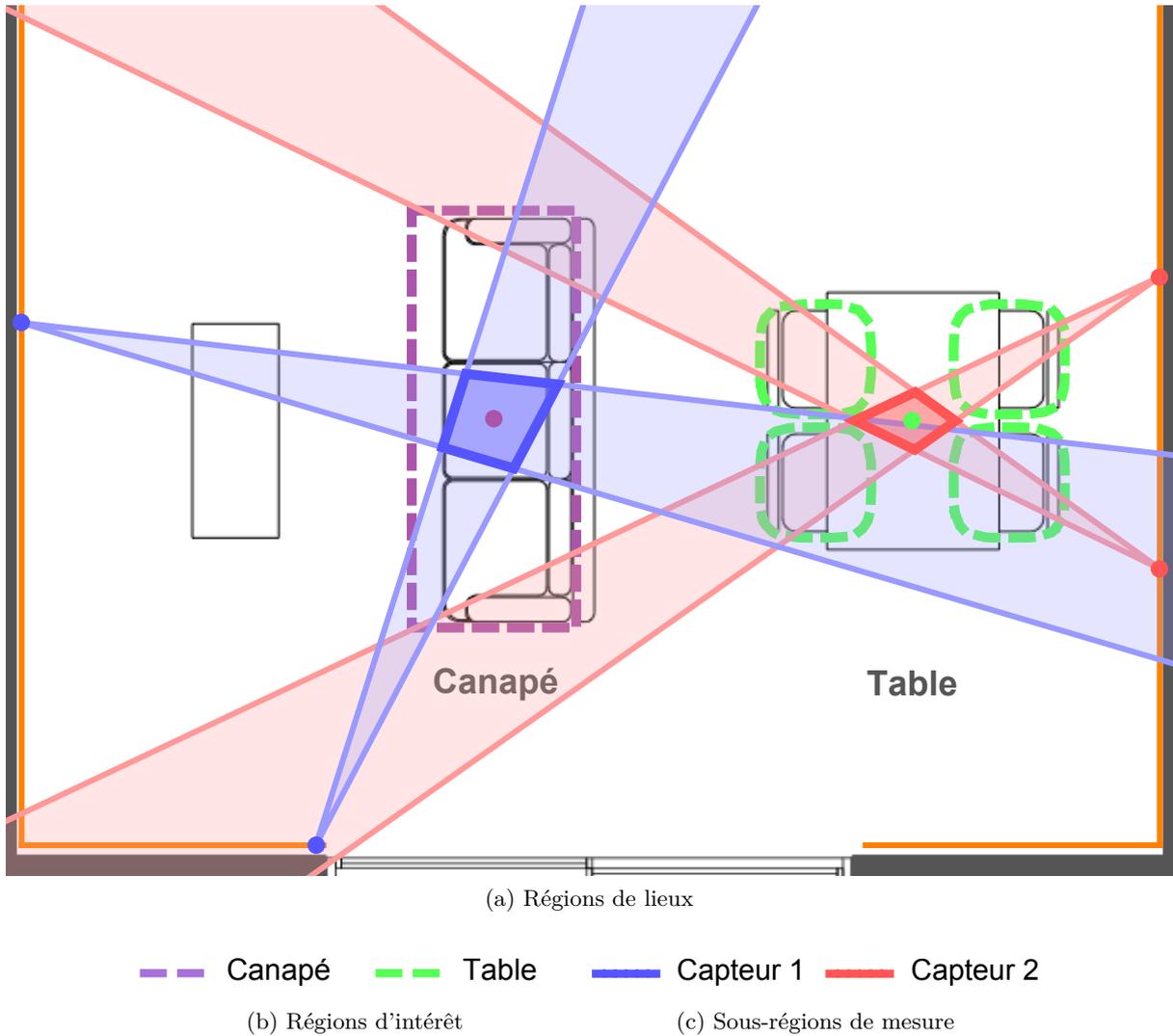


FIGURE 6.1 – Deux placements-solutions minimisant chacun l'incertitude de mesure d'une position, où chaque configuration de capteurs en **bleu** et en **rouge** correspond respectivement au centre des régions d'intérêt du canapé (en **violet**) et de la table (en **vert**) ; pour une région de conception \mathcal{U} (en **orange**)

Nous nous intéressons au placement de $K = L = 2$ et de $K = 3 \geq L$ capteurs pour différentes positions, ainsi qu'au placement incertain des capteurs $\delta u \mid \text{Abs}(\delta u) \leq \Delta u = 2 \cdot \epsilon_p = 10\text{cm}$. Les deux positions d'intérêt considérées sont les centres des deux régions d'intérêt en figure 6.1, avec ces positions nous considérons illustrer et simplifier le problème de placement en ramenant la région d'intérêt à un point. Au minimum, nous avons besoin de $K = 2$ capteurs afin d'estimer une position particulière. Nous pouvons aisément pour $K = 2$ capteurs déterminer pour chaque position x_m le placement optimal pour son estimation \hat{x}_m , soit les configurations optimales $\hat{\zeta}_K$ des capteurs. Dans notre cadre applicatif, l'intérêt majeur de la conception est de proposer un placement-solution ζ_K pour $K \in [L ; M * L]$ capteurs ; où $M = 2$ est le nombre de positions d'intérêt.

6.3.1.2 Cas réel : estimation d'un ensemble de positions

Le cas réel de veille à la personne concerne l'estimation des éléments d'une région d'intérêt \mathcal{I} soit une multitude de positions $x_i \in \mathcal{I} \mid i \in \{1, \dots, M(\mathcal{I})\}$, en considérant le problème d'optimisation en équation 6.44.

$$\hat{\zeta}_K(\mathcal{I}_m) = \underset{\zeta_K}{\text{ArgMin}} \sum_{x_{m,i}^* \in \mathcal{I}_m} w_{m,i} \cdot \text{O}_1[\mathbf{U}(\zeta_K, x_{m,i}^*)] = \underset{\zeta_K}{\text{ArgMax}} \sum_{x_{m,i}^* \in \mathcal{I}_m} w_{m,i} \cdot \text{O}_1[\mathbf{U}^-(\zeta_K, x_{m,i}^*)] \quad (6.44)$$

où $w_{m,i}$ est le poids associé à la position $x_{m,i}$, il dépend de l'Occurrence de l'action d'intérêt a_m pour cette position $x_{m,i}$ tel que $w_{m,i} = \text{Occ}(x_{m,i} \in \mathcal{I}_m \mid a_m)$.

Nous nous intéressons au placement de $K = L = 2$ capteurs pour différentes régions d'intérêt en figure 6.1 ; ayant besoin de $K = 2$ capteurs au minimum afin d'estimer la position. Dans notre cadre applicatif, l'intérêt majeur de la conception est de proposer un placement-solution favorisant prioritairement la précision de l'estimation selon la densité de l'occurrence, sachant une incertitude de mesure des capteurs.

6.3.1.3 Optimisation multi-objectifs

Les problèmes d'optimisation en équation 6.43 et 6.44 permettent de déterminer pour une position ou région d'intérêt son placement-solution $\hat{\zeta}_K$ idéal, offrant la meilleure évaluation. Dans le cadre de la conception d'environnement instrumenté, il est nécessaire d'optimiser le placement des capteurs pour une multitude d'actions et d'évaluations concurrentes. À dessein de simplicité, nous synthétisons ces objectifs en une unique valeur afin de déterminer le placement-solution $\hat{\zeta}_K(x_m^*)$ compromis : la moyenne géométrique des évaluations des M intérêts (*e.g.* position ou région) ; *cf.* équation 6.45. La moyenne géométrique convient particulièrement lorsque que la moyenne de plusieurs valeurs aux plages différentes voire disparates est désirée. Par nature, elle permet ainsi de favoriser en priorité l'incertitude la plus forte possible où nous souhaitons en conception aider cette incertitude à s'améliorer en priorité ; comportement à l'inverse de la F-mesure où nous avons utilisé la moyenne harmonique à dessein.

$$\text{Moyenne Géométrique} = \left(\prod_{m=1}^M x_m \right)^{1/M} \quad (6.45)$$

Nous définissons les problèmes d'optimisation en équations 6.46 et 6.47 pour respectivement le cas simple et le cas réel, définis en équations 6.43 et 6.44.

$$\hat{\zeta}_K(x_m^*) = \underset{\zeta_K}{\text{ArgMin}} M \cdot \left(\sum_{m=1}^M (\text{O}_1[\mathbf{U}(\zeta_K, x_m^*)])^{-1} \right)^{-1} \quad (6.46)$$

$$\hat{\zeta}_K(\mathcal{I}_m) = \underset{\zeta_K}{\text{ArgMax}} M^{-1} \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{x_{m,i}^* \in \mathcal{I}_m} (w_{m,i} \cdot \text{O}_1[\mathbf{U}(\zeta_K, x_{m,i}^*)])^{-1} \quad (6.47)$$

où x_m^* est le centre de la région d'intérêt \mathcal{I}_m , où $x_{m,i}^*$ est la i^{e} position de la région d'intérêt \mathcal{I}_m .

6.3.1.4 Aspects techniques et illustratifs

Pour les cas simples, nous mettons en exergue les différences de placements (*i.e.* conception ζ_K) et leur influence sur l'amélioration de l'incertitude de la caractéristique. En explorant

l'ensemble des conceptions possibles pour $K = 2$ capteurs, nous comparons les conceptions D-optimales par la matrice d'incertitude en équation 6.22 et les conceptions minimisant la région d'incertitude de la caractéristique ; *i.e.* sa sous-région de mesure notée $m(x_m^*)$. Similairement pour $K = 3$ capteurs, nous présentons et analysons les conceptions en explorant judicieusement l'ensemble des conceptions possibles.

Pour ces problèmes d'optimisation, l'espace des conceptions possibles est faible, nous permettant d'explorer entièrement toutes ces solutions au problème. Son cardinal est lié à la combinatoire des configurations distinctes possibles $M(\mathcal{U}) = 286$ et du nombre de capteurs K à installer à différentes configurations. Nous dénombrons²³ respectivement pour $K = 2$ et $K = 3$ capteurs 40 755 et 3 858 140 conceptions possibles. Or, selon la méthode d'évaluation utilisée et sa complexité combinatoire, l'exploration exhaustive des conceptions est en pratique longue et exigeante en terme de ressources ; notamment pour le cas réel en équation 6.47. En ayant recours à un algorithme d'optimisation stochastique itératif, nous pouvons converger raisonnablement vers la solution optimale. Nous utilisons ainsi, si nécessaire, l'algorithme NSGA-II pour résoudre les problèmes d'optimisation longs ; *cf.* section 5.1.

6.3.2 Cas simple

6.3.2.1 Pour $K = 2$ capteurs

Placements décorrélés En explorant entièrement l'ensemble des conceptions possibles, nous évaluons chaque conception au moyen du D-critère et déterminons les solutions D-optimales pour chaque position d'intérêt ; illustrée en figure 6.2b. Similairement, nous évaluons précisément la région d'incertitude $m(x_m^*, \zeta_K)$ de la caractéristique x_m^* (*i.e.* sa sous-région de mesure) et sa mesure $M(m(x_m^*, \zeta_K))$ pour chaque conception ζ_K afin de déterminer les solutions minimales ; illustrée en figure 6.2a.

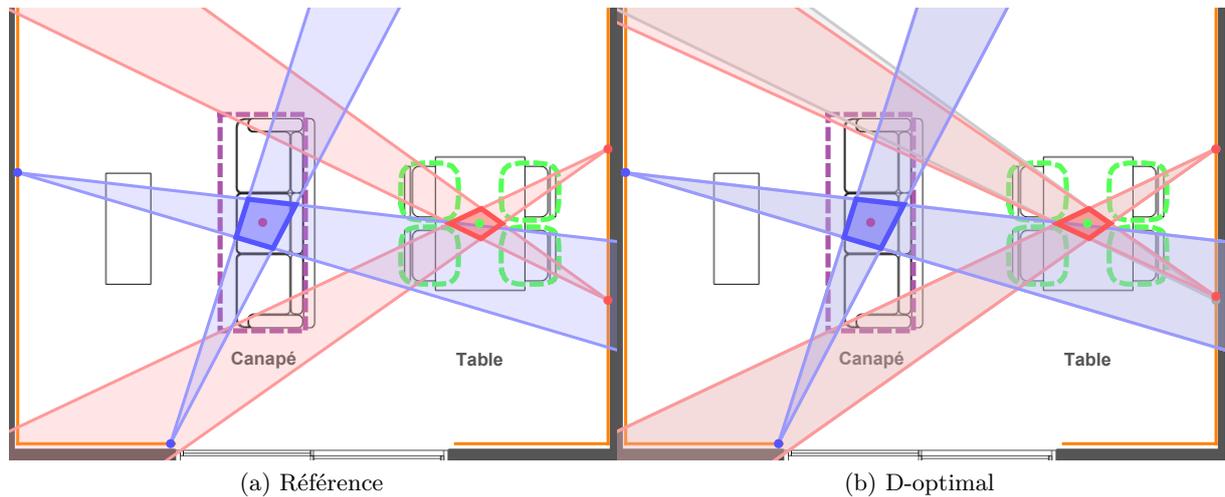


FIGURE 6.2 – Illustration des placements-solutions optimaux pour chaque position d'intérêt, du Canapé couvert en **bleu** et de la Table en **rouge**, avec $K = 2$ capteurs chacun ; en gris 6.2b figure le placement référence 6.2a à dessein de comparaison

Le placement solution en figure 6.2a est la conception optimale de référence, par calcul

²³ par analyse combinatoire simple de K éléments (*e.g.* capteurs) tous différents choisis parmi $M(\mathcal{U})$ objets (*e.g.* configurations) distincts : $C_{M(\mathcal{U})}^K = \frac{K!}{M(\mathcal{U})! \cdot (K - M(\mathcal{U}))!}$

exact des régions d'incertitude des mesures capteurs. Ce placement-solution diffère de celui déterminé par D-optimalité en figure 6.2b, mais ils sont très proches : le capteur au plus bas du mur à droite est décalé légèrement en ordonnée de $\epsilon_p = 5\text{cm}$; où ϵ_p est notre pas de précision. En s'intéressant aux performances brutes en terme d'incertitudes, nous avons des résultats très proches pour la meilleure solution de chaque méthode, étant de : $\{2926,74 \ 1220,64\} \text{cm}^2$ par référence et $\{2926,74 \ 1221,32\} \text{cm}^2$ par D-critère *-i.e. 3^e meilleure-* ; respectivement pour le Canapé et la Table.

Pour toutes les conceptions possibles, nous pouvons constituer un classement de référence attribuant, pour chaque placement-solution possible, un rang. Nous évaluons les performances de l'optimisation par D-critère en déterminant comment sont classées les solutions de référence : pour le classement par D-optimalité des solutions à quel rang de référence correspondent-elles. En figures 6.3, nous illustrons pour chaque position d'intérêt ces performances reportant leur classement en abscisse et leur mesure d'incertitude en ordonnée. En étudiant ces figures, nous pouvons visualiser la dispersion/variance dans l'optimisation par D-critère afin de jauger la qualité réelle des placements-solutions quasi-optimaux proposés. Nous remarquons une faible disparité de classements, où la solution optimale (rang 1) de référence pour la Table est classée en 3^e par D-optimalité ; inversement en 4^e place.

Placement compromis Pour la conception d'environnement instrumenté, nous devons déterminer un unique placement-solution de $K = 2$ capteurs offrant de bonnes performances en "moyenne" pour nos $M = 2$ positions d'intérêt. En figures 6.4a et 6.4b, nous illustrons respectivement le placement solution référence et celui du D-critère, obtenus par moyenne géométrique.

Les placements-solutions optimaux diffèrent légèrement, où le capteur du mur à droite est décalé en ordonnée de $\epsilon_p = 5\text{cm}$. En terme d'incertitudes, nous remarquons que leurs performances brutes sont assez proches étant de : $\{4634,63 \ 999,376\} \text{cm}^2$ par référence et $\{4682,22 \ 990,602\} \text{cm}^2$ par D-critère *-i.e. 3^e meilleure-*, pour respectivement une moyenne géométrique de 2996,65 et 2998,74 cm^2 . En terme de classement, nous remarquons similairement une faible disparité de performances de la D-optimalité illustrée en figure 6.5 : la solution optimale de référence est classée en 2^e par la D-optimalité ; inversement en 3^e place.

6.3.2.2 Pour $K = 2$ capteurs au placement incertain

À présent, nous nous intéressons au placement de $K = 2$ capteurs sujet à une incertitude d'installation, de l'ordre de $u_i \pm 2 \cdot \epsilon_p$.

Placements décorrélés Nous évaluons pour chaque conception la mesure de la région d'incertitude et le D-critère. En figures 6.6a et 6.6b, nous illustrons respectivement les solutions minimales et D-optimales.

Nous remarquons que ces placements-solutions sont proches de ceux déterminés précédemment en figures 6.2a et 6.2b, sans considérer l'incertitude de placement. La majorité des capteurs sont décalés légèrement en ordonnée au maximum de ϵ_p . En terme d'incertitudes, nous avons des résultats très proches pour la meilleure solution de chaque méthode, étant de : $\{4328,59 \ 1809,44\} \text{cm}^2$ par référence et $\{4330,72 \ 1816,88\} \text{cm}^2$ par D-critère ; respectivement pour le Canapé et la Table. Cependant en terme de classement, nous remarquons une dispersion plus prononcée de performance de la D-optimalité illustrée en figures 6.7 : la solution optimale de référence est classée par la D-optimalité en 3^e pour le Canapé et en 12^e pour la Table ; inversement en 3^e et 20^e places.

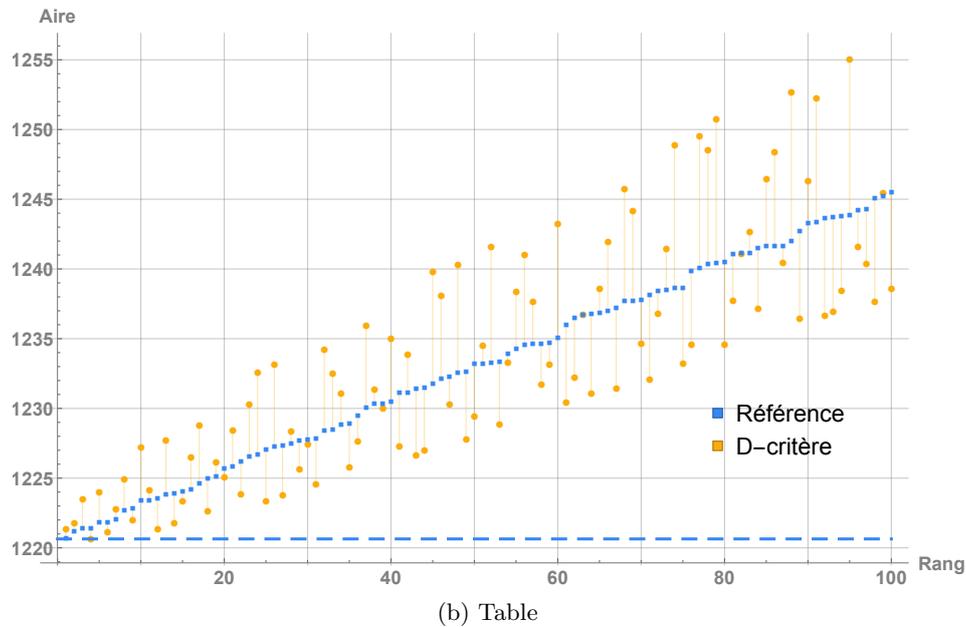
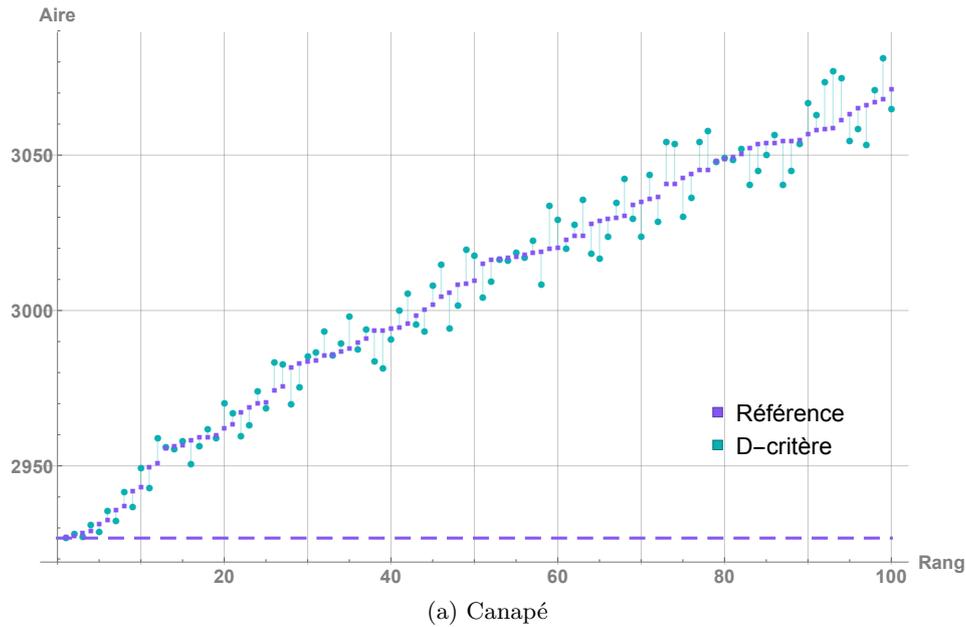


FIGURE 6.3 – Performances $M(m(x_m, \zeta_K))$ en cm^2 des 100 meilleurs placements-solutions pour chaque méthode avec $K = 2$ capteurs, illustrant la variance des solutions déterminées par D-critère ; ne classant pas les solutions similairement à la référence

Placement compromis En utilisant la moyenne géométrique, nous déterminons des placements similaires à ceux déterminés précédemment en figures 6.4a et 6.4b. Nous illustrons les placements optimaux prenant en compte l'incertitude de placement respectivement en figures 6.8a et 6.8b.

Les placements-solutions optimaux diffèrent légèrement, où le capteur du mur à droite est décalé en ordonnée de $\epsilon_p = 5\text{cm}$. En terme d'incertitudes, nous remarquons que leurs performances brutes sont proches étant de : $\{6949,35 \ 1509,17\} \text{cm}^2$ par référence et $\{7030,08 \ 1492,45\} \text{cm}^2$ par D-critère, pour respectivement une moyenne géométrique de $3238,48 \text{cm}^2$ et $3239,14 \text{cm}^2$. En terme de classement, nous remarquons une faible disparité de performances de la D-optimalité

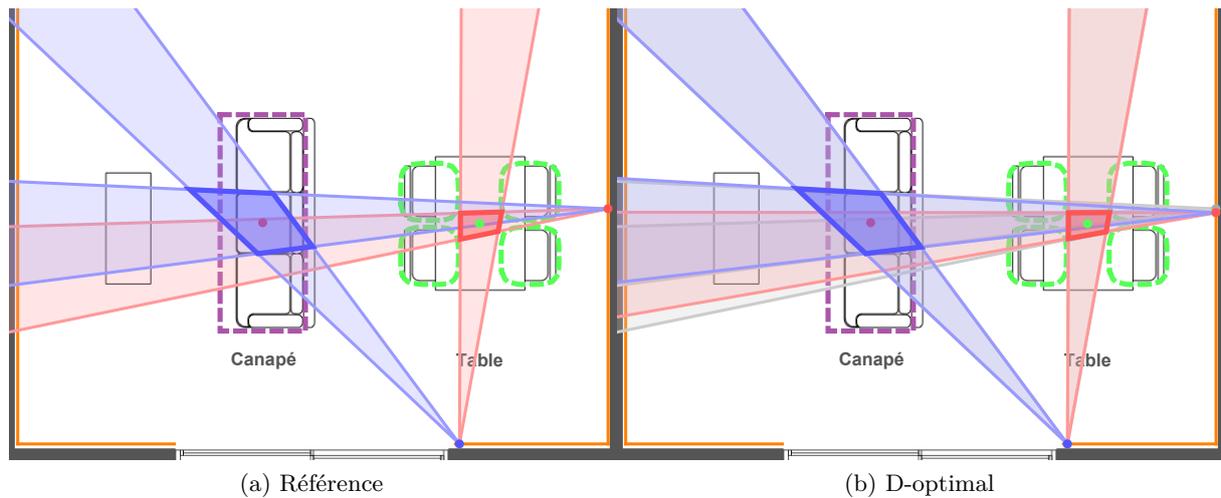


FIGURE 6.4 – Illustration des placements-solutions optimaux pour l'ensemble des positions d'intérêt, pour $K = 2$ capteurs

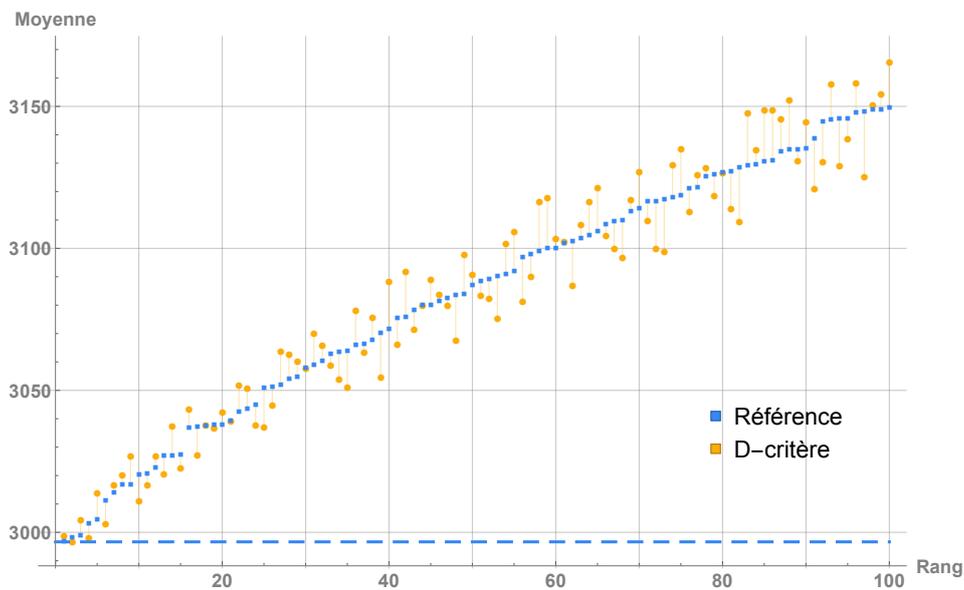


FIGURE 6.5 – Performances $M(m(x_m, \zeta_K))$ en cm^2 des 100 meilleurs placements-solutions par moyenne géométrique avec $K = 2$ capteurs, illustrant la variance des solutions déterminées par D-critère ; ne classant pas les solutions similairement à la référence

illustrée en figure 6.9 : la solution optimale de référence est classée en 3^e par la D-optimalité ; inversement en 2^e place.

Discussion pour $K = 2$ capteurs

Dans notre étude de cas, nos placements sont très limités et notre environnement est sans obstacle. Nous pouvons difficilement mettre à l'épreuve le D-critère appliqué sur notre matrice d'incertitude \mathbf{U} –prenant en compte les erreurs d'installation des capteurs– et la comparer efficacement à la matrice d'information \mathbf{M} classique. Par ailleurs, cette D-optimalité fonctionne uniquement pour un environnement dénué d'obstacles et ne saurait intégrer la notion d'occlusion ;

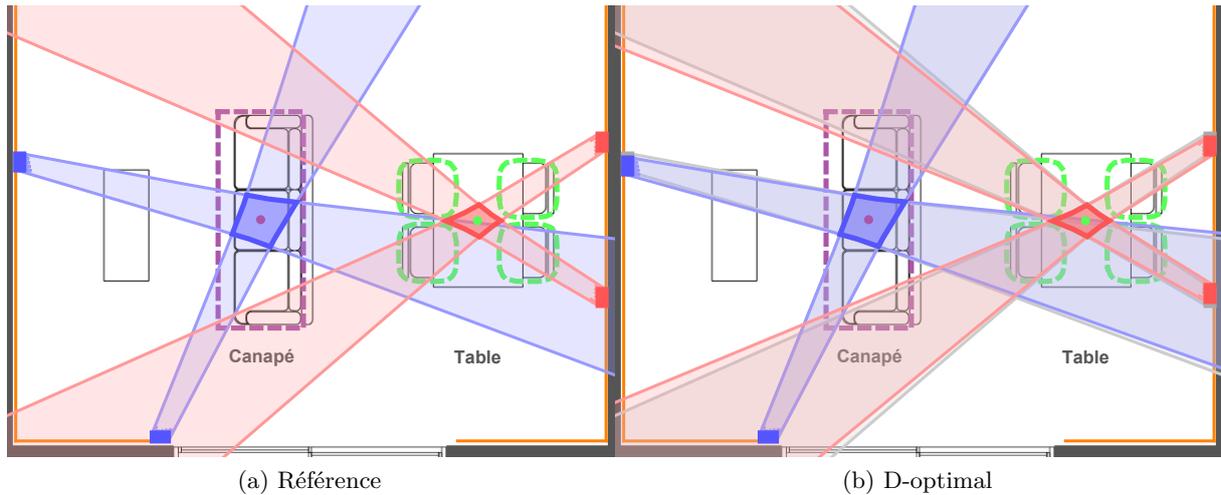


FIGURE 6.6 – Illustration des placements-solutions optimaux pour chaque position d'intérêt, avec $K = 2$ capteurs chacun au placement incertain

pouvant dans certains cas rendre impossible l'estimation, voire aggraver ou améliorer sa précision.

La proximité des placements-solutions déterminés avec une incertitude d'installation des capteurs avec les précédents est due à la particularité de notre environnement dénué d'obstacles. De plus, nous remarquons que la position d'intérêt de la Table génère plus de disparité que celle du Canapé. Nous émettons l'hypothèse que, compte-tenu de la région de conception \mathcal{U} où les configurations u des capteurs sont plus rapprochées pour cette dernière, l'absence de mise-à-l'échelle génère plus de dispersion soit d'erreur de classement. Une mise-à-l'échelle implique d'agir numériquement sur les Jacobiennes par multiplication matricielle afin d'avoir un bon conditionnement numérique des matrices pour l'identification de la caractéristique particulière [Sic⁺16]. Elle est nécessaire pour manipuler finement des informations de nature différentes (*e.g.* *positions* et *angles*) dans un même contexte matriciel²⁴, et pour manipuler des variables (*e.g.* x) de magnitudes grandement différentes²⁵. Dans notre exemple, nous souhaitons minimiser la mesure de la région d'incertitude $M(m(x_m, \zeta_K))$ sans la calculer, en passant par un système matriciel, où en mélangeant des angles et positions, nous minimiserons par D-critère une surface. Notre mise-à-l'échelle devrait ainsi agir sur nos positions et angles afin de s'assurer que la valeur du D-critère exprime une surface et afin d'obtenir le classement de référence exactement. En réalité, cette méthode est, par essence, une approximation de la réalité. Fedorov et Leonov [Fed⁺13] posent la question de l'utilité d'utiliser des techniques très précises, alors que, par essence, ces modèles ne sont qu'une autre approximation de la réalité ; *i.e.* le développement limité de Taylor. Par conséquent, développer et appliquer une mise-à-l'échelle complexe pour déterminer les résultats de référence serait situationnel et fastidieux, voire infructueux.

Ainsi la méthode d'évaluation fondée sur le D-critère de la matrice d'incertitude \mathbf{U} permet de déterminer des solutions **quasi-optimales**, où nous avons bon espoir que les premières meilleures solutions par D-optimalité se situent dans le haut du classement des meilleures solutions réelles. Ces solutions par D-optimalité sont combinatoirement plus pratiques et rapides à calculer, elles permettent ainsi d'explorer un plus grand nombre de conceptions. Il est envisageable de réduire par D-optimalité l'ensemble des conceptions possibles afin d'explorer entièrement cet ensemble réduit en déterminant la conception minimisant la mesure de la région d'incertitude $M(m(x_m, \zeta_K))$.

²⁴ angl. task variable scaling ²⁵ angl. parameter scaling

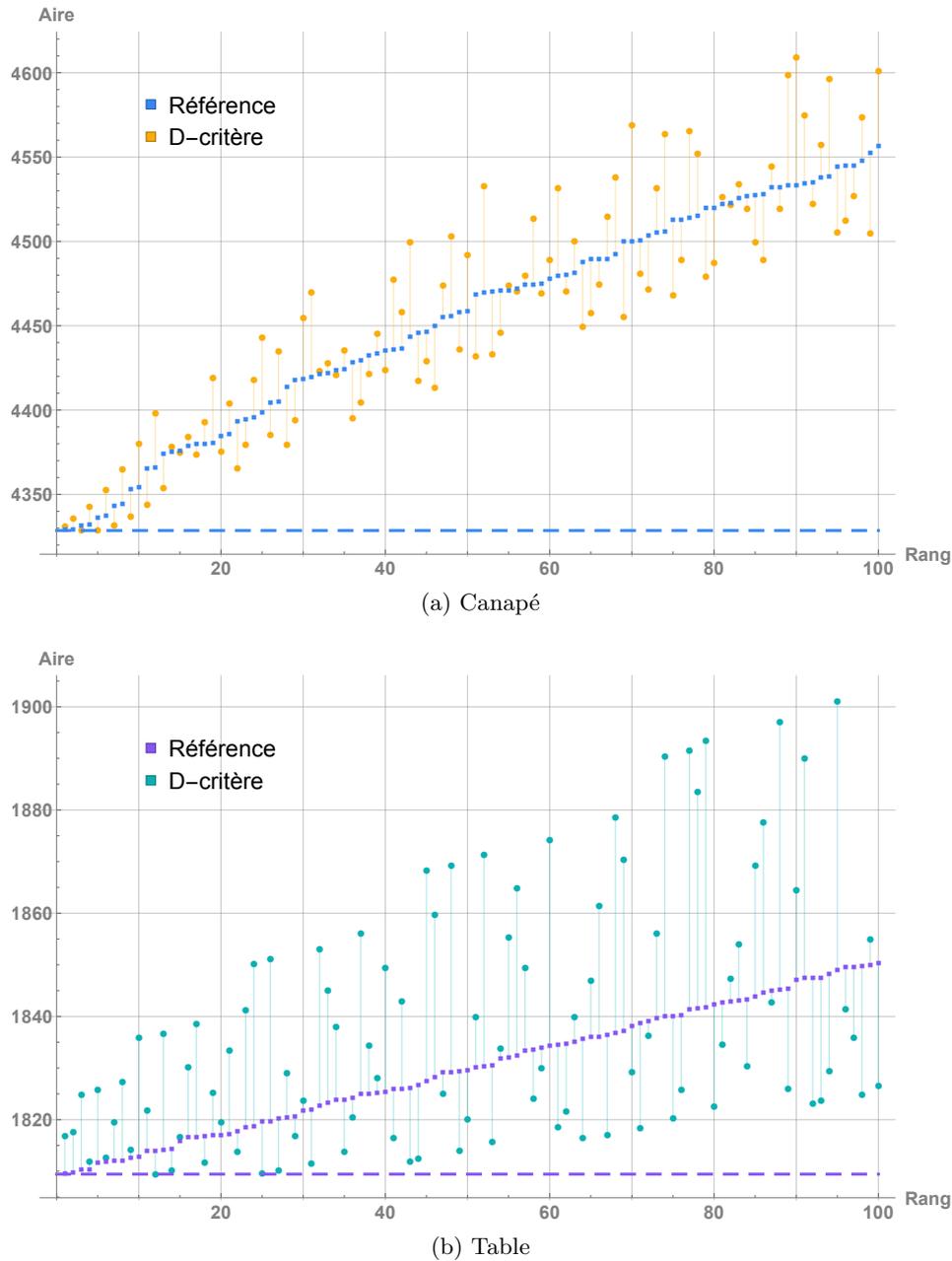


FIGURE 6.7 – Performances $M(m(x_m, \zeta_K))$ en cm^2 des 100 meilleurs placements-solutions pour chaque méthode avec $K = 2$ capteurs au placement incertain, illustrant la variance des solutions déterminées par D-critère ; ne classant pas les solutions similairement à la référence

6.3.2.3 Pour $K = 3$ capteurs

Nous ne pouvons raisonnablement explorer entièrement l'ensemble des conceptions possibles pour calculer chaque région d'incertitude (*i.e.* sous-région de mesure) et pour évaluer précisément sa mesure, nécessitant de traiter 3 858 140 conceptions. Nous utilisons ainsi l'algorithme stochastique itératif NSGA-II afin de déterminer un ensemble de solutions Pareto-optimales selon nos positions d'intérêts, en utilisant les mêmes paramètres que précédemment ; *cf.* section 5.3.2.3. En explorant judicieusement l'ensemble des conceptions possibles avec NSGA-II, nous obtenons ainsi 33 solutions de fait quasi Pareto-optimales.

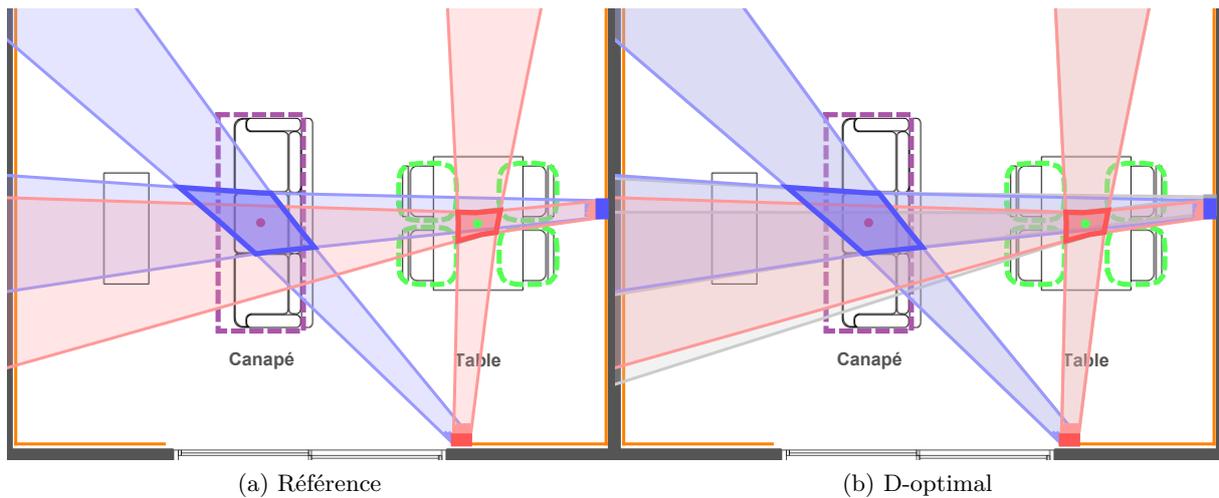


FIGURE 6.8 – Illustration des placements-solutions optimaux pour l'ensemble des positions d'intérêt, pour $K = 2$ capteurs au placement incertain

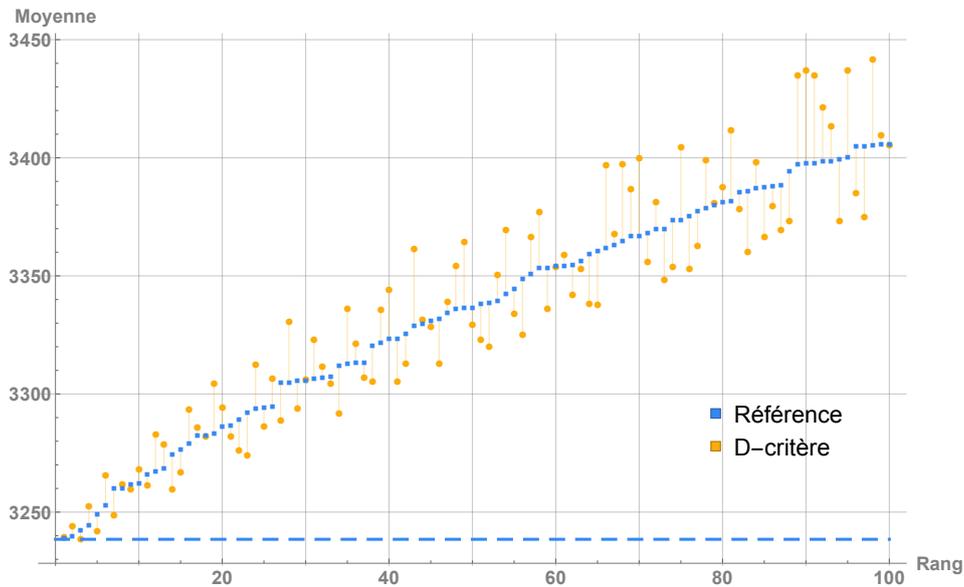


FIGURE 6.9 – Performances $M(m(x_m, \zeta_K))$ en cm^2 des 100 meilleurs placements-solutions par moyenne géométrique avec $K = 2$ capteurs au placement incertain, illustrant la variance des solutions déterminées par D-critère ; ne classant pas les solutions similairement à la référence

Nous proposons de réduire par D-optimalité l'ensemble des conceptions possibles (explorée entièrement par cette méthode) afin de déterminer la conception minimisant la mesure de la région d'incertitude sur les *-i.e.-* 3000 meilleures solutions D-optimales de chaque intérêt x_m et aux 4000 meilleures solutions en moyenne géométrique, soit un ensemble réduit de 10 000 conception solutions à évaluer. La dimension de cet ensemble réduit est choisi arbitrairement mais raisonnablement de telle sorte à l'explorer entièrement.

Placements décorrélés En figure 6.10a, nous illustrons la solution Pareto-optimale pour chaque position d'intérêt. Nous évaluons chaque conception au moyen du D-critère et illustrons en figure 6.10b les les solutions D-optimales. En figure 6.10c, nous illustrons les solutions minimales

calculées exactement à partir des conceptions de l'ensemble réduit.

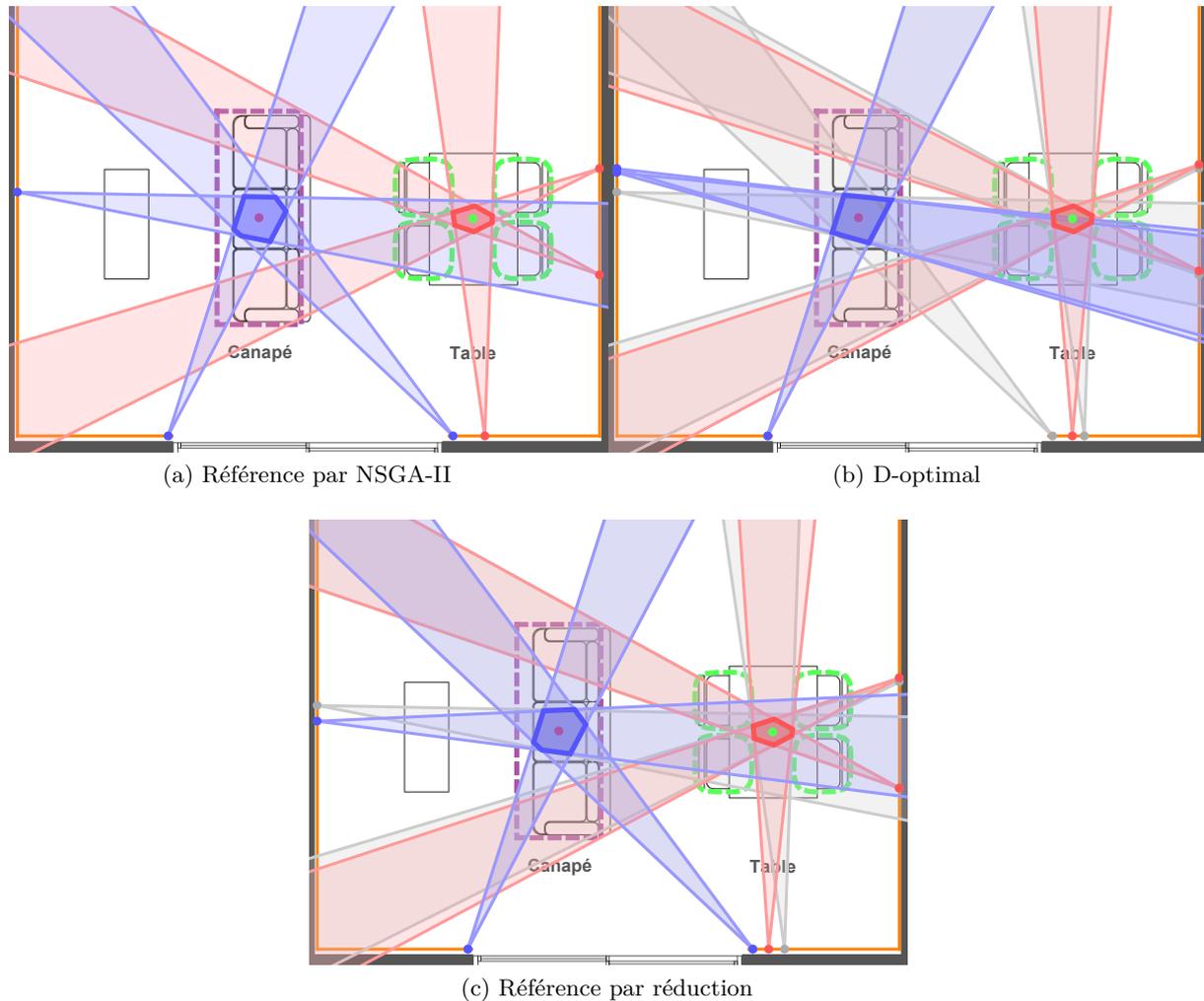


FIGURE 6.10 – Illustration des placements-solutions optimaux pour chaque position d'intérêt, pour $K = 3$ capteurs

Les placements-solutions concernant la Table²⁶ sont très proches, toutes solutions confondues. Par rapport à notre placement référence en figure 6.10a, les autres placements diffèrent légèrement de cette solution en ordonnée par seulement ϵ_p , en abscisse par $3 \cdot \epsilon_p$ et $4 \cdot \epsilon_p$ pour respectivement par D-optimalité et par réduction. Concernant le Canapé²⁶, nous remarquons que la solution D-optimale considère qu'un troisième capteur est inutile, tant ce dernier tend à se confondre avec le deuxième ; étant décalés en ordonnée de notre pas ϵ_p de positionnement des capteurs. Les deux autres solutions sont proches, étant légèrement décalées de $5 \cdot \epsilon_p$ en ordonnée pour le capteur sur le mur à gauche. Quoiqu'il en soit, certaines positions se révèlent très attractives pour les capteurs dans chaque placement d'intérêt ; spécifiquement pour la Table. En terme d'incertitudes, nous avons des résultats assez proches pour la meilleure solution de chaque méthode, étant de : $\{ 2722,92 \ 1097,36 \}$ cm² par référence NSGA-II, $\{ 2915,59 \ 1094,01 \}$ cm² par D-critère et $\{ 2714,66 \ 1093,83 \}$ cm² par référence réduite ; respectivement pour le Canapé et la Table.

En figures 6.11, nous illustrons les performances de classement du D-critère par rapport aux

²⁶ le centre de sa région d'intérêt associée

autres méthodes pour chaque position d'intérêt. N'étant pas en mesure d'évaluer raisonnablement toutes les conceptions possibles, nous évaluons la performance de classement du D-critère relativement aux 3000 solutions sélectionnées pour la réduction. Il est ainsi possible qu'il existe de meilleures solutions que celle évaluées classées sur l'ensemble réduit. Les solutions Pareto-optimales obtenues par NSGA-II sont tributaires de l'aléatoire de l'exploration, et ne sont pas intéressantes pour jauger la qualité de dispersion ; avec une population de 100 individus sur 100 générations NSGA-II permet d'évaluer au pire 10000 soit autant de conceptions que notre ensemble réduit. En figures 6.11a et 6.11b, nous remarquons une forte dispersion de performance de la D-optimalité pour le Canapé, étant au contraire faible pour la Table.

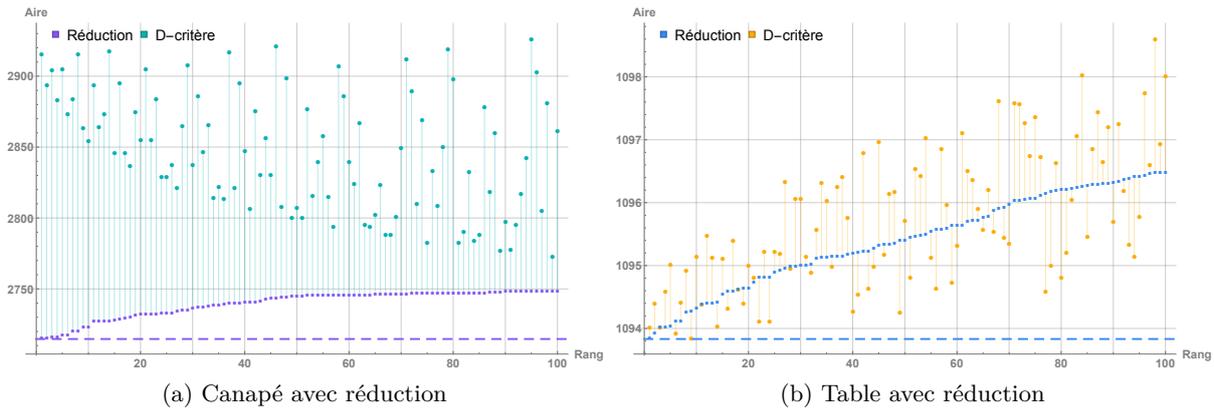


FIGURE 6.11 – Performances $M(m(x_m, \zeta_K))$ en cm^2 des 100 meilleurs placements-solutions avec $K = 3$ capteurs, illustrant la variance des solutions déterminées par D-critère ; ne classant pas les solutions similairement à la référence

Placement compromis Pour conception d'environnement instrumenté, nous déterminons un placement unique pour chaque méthode illustrée respectivement en figures 6.12a, 6.12b et 6.12c.

Le placement-solution optimal obtenu par NSGA-II diffère de ceux fondé sur le D-critère (D-optimalité et ensemble réduit), où le capteur du mur en bas à droite est déplacé sur le mur à droite modifiant la configuration de celui déjà présent. En terme d'incertitudes, nous remarquons que les résultats des méthodes sont assez proches étant de : $\{ 3452,04 \ 1353,51 \}$ cm^2 par référence, $\{ 3378,24 \ 1363,53 \}$ cm^2 par D-critère et $\{ 3373,87 \ 1357,97 \}$ cm^2 par référence réduite ; pour respectivement une moyenne géométrique de $2161,57\text{cm}^2$, $2146,24$ et $2140,47\text{cm}^2$. En terme de classement, nous illustrons en figures 6.13 la disparité de performances de la D-optimalité étant faible par réduction ; celle-ci est réalisée sur seulement 4000 placements-solutions.

6.3.2.4 Pour $K = 3$ capteurs au placement incertain

Enfin, nous nous intéressons au placement sujet à une incertitude d'installation de $K = 3$ capteurs. Par NSGA-II, nous explorons judicieusement l'espace et obtenons ainsi 26 solutions quasi Pareto-optimales.

Placements décorrélés En figure 6.14a, nous illustrons la solution Pareto-optimale pour chaque position d'intérêt. Nous évaluons chaque conception au moyen du D-critère et illustrons en figure 6.14b les solutions D-optimales. En figure 6.14c, nous illustrons les solutions minimales calculées exactement à partir des conceptions de l'ensemble réduit.

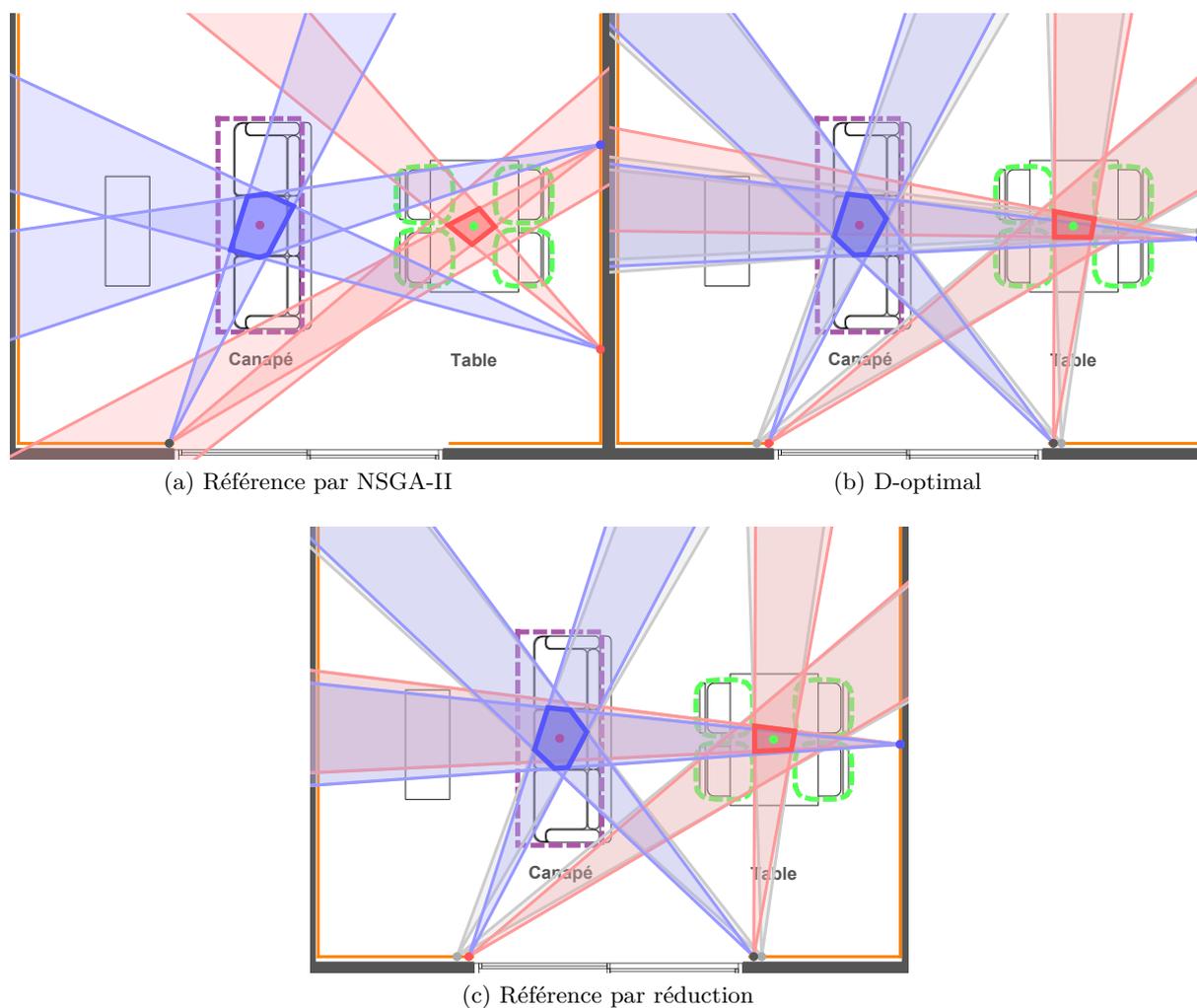


FIGURE 6.12 – Illustration des placements-solutions optimaux pour l'ensemble des positions d'intérêt, pour $K = 3$ capteurs

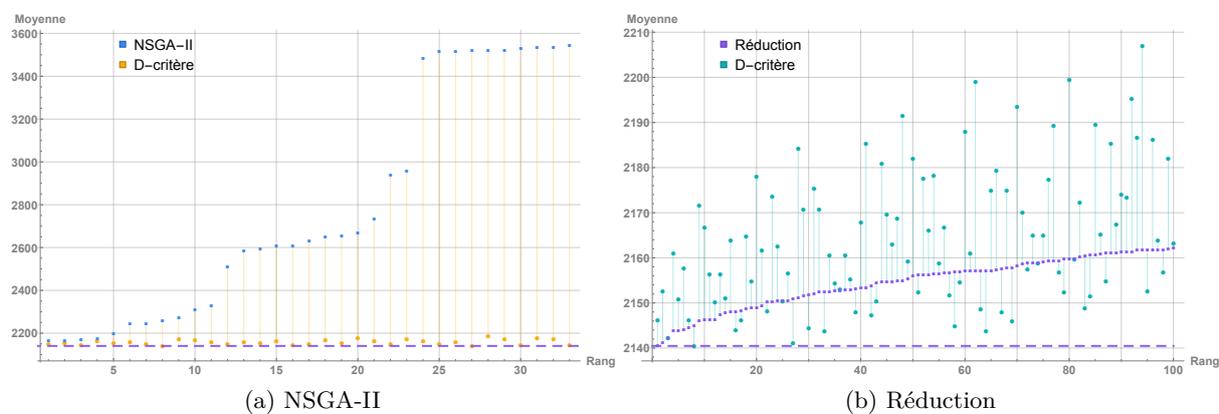


FIGURE 6.13 – Performances $M(m(x_m, \zeta_K))$ en cm^2 des meilleurs placements-solutions par moyenne géométrique avec $K = 3$ capteurs, illustrant la variance des solutions déterminées par D-critère comparativement aux autres méthodes

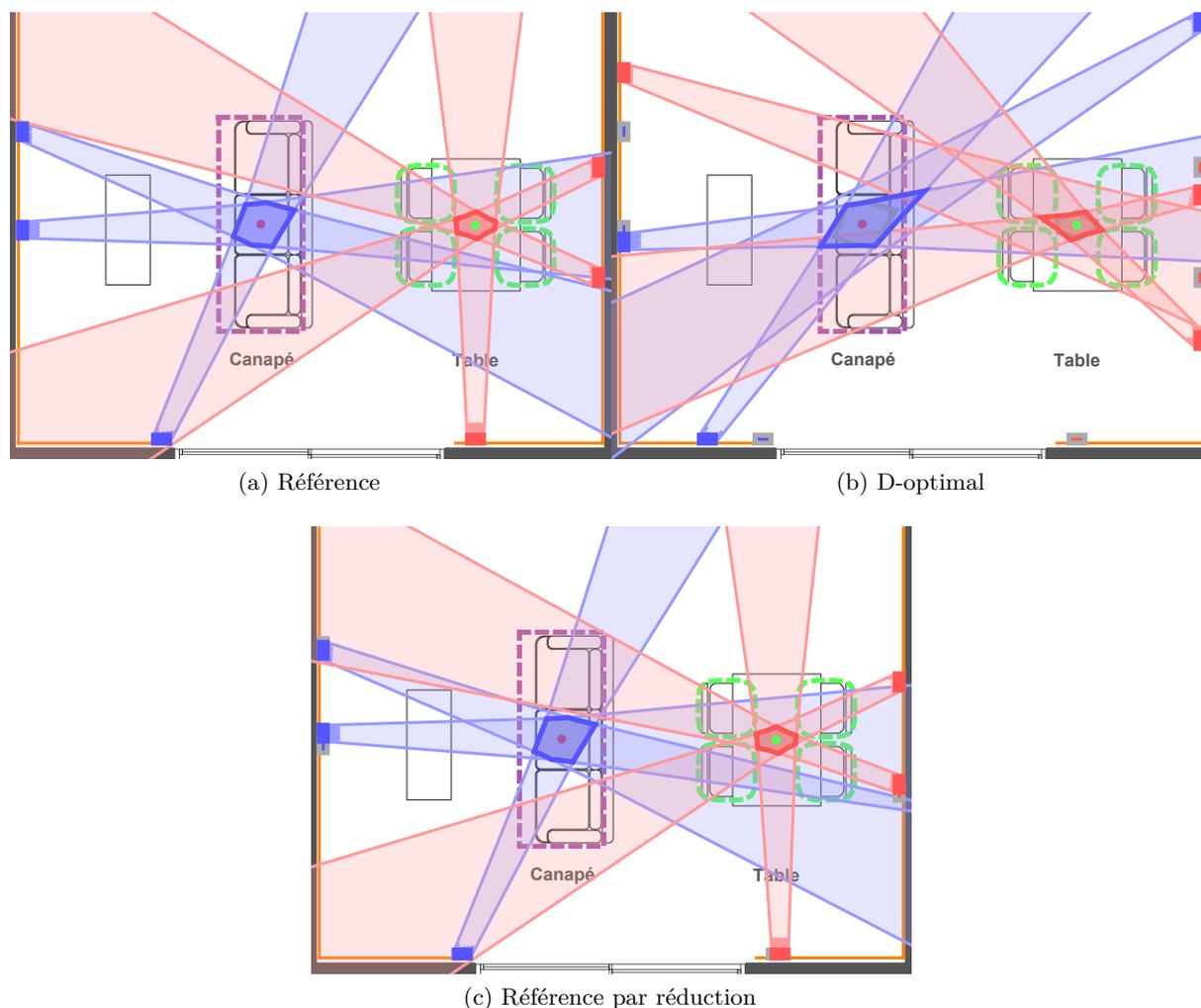


FIGURE 6.14 – Illustration des placements-solutions optimaux pour chaque position d'intérêt, pour $K = 3$ capteurs au placement incertain

Ces placements-solutions sont très différents de ceux déterminés précédemment, sans considérer l'incertitude de placement en figures 6.10a et 6.10b. Par D-optimalité en figure 6.14b, nous remarquons une certaine inutilité pour chaque intérêt du placement du 3^e capteurs, où celui-ci n'améliore en aucun cas la précision de la sous-région de mesure : ces placements fonctionnent à 2 capteurs. En s'intéressant aux performances en termes d'incertitudes, nous avons des résultats assez proches pour la meilleure solution de chaque méthode, étant de : $\{ 2891,91 \ 1140,87 \} \text{ cm}^2$ par référence, $\{ 4217,24 \ 1339,08 \} \text{ cm}^2$ par D-critère, et $\{ 2907,41 \ 1144,40 \} \text{ cm}^2$ par réduction ; respectivement pour le Canapé et la Table. En terme de classement, nous illustrons en figures 6.15 la disparité de performances de la D-optimalité ; calculée exactement sur seulement ses 3000 meilleurs placements-solutions. Nous remarquons une très forte dispersion de performance de la D-optimalité par rapport à la réduction, quelque soit la position d'intérêt.

Placement compromis En utilisant la moyenne géométrique, nous déterminons des placements similaires à ceux déterminés précédemment en figures 6.12a et 6.12c. Nous illustrons les placements optimaux prenant en compte l'incertitude de placement, par NSGA-II en figure 6.16a, par D-optimalité en figure 6.16b, et par réduction en figure 6.16c.

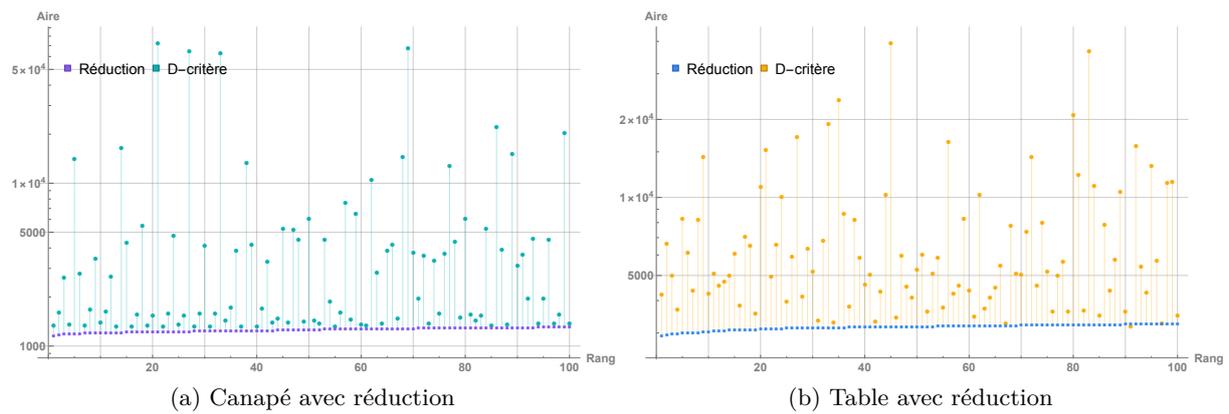


FIGURE 6.15 – Performances $M(m(x_m, \zeta_K))$ en cm^2 des meilleurs placements-solutions pour chaque méthode avec $K = 3$ capteurs au placement incertain, illustrant la variance des solutions déterminées par D-critère ; ne classant pas les solutions similairement à la référence

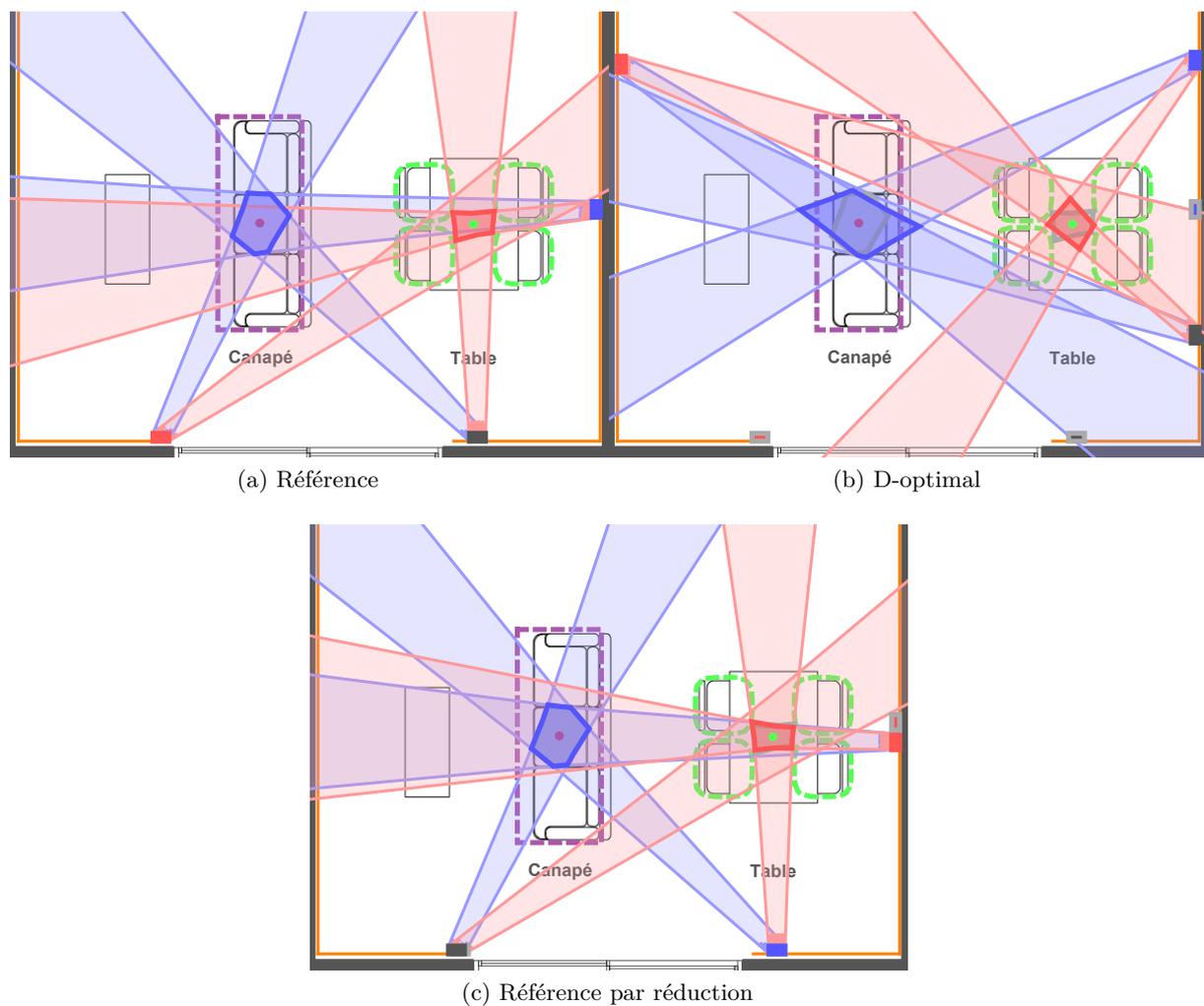


FIGURE 6.16 – Illustration des placements-solutions optimaux pour l'ensemble des positions d'intérêt, pour $K = 3$ capteurs au placement incertain

Pour la D-optimalité en figure 6.16b, nous remarquons similairement une certaine inutilité pour chaque intérêt du placement du 3^e capteurs, où celui-ci n'améliore en aucun cas la précision de la sous-région de mesure : ces placements fonctionnent à 2 capteurs. En terme d'incertitudes, nous remarquons que les résultats des méthodes sont assez proches par NSGA-II et réduction étant de : $\{3618,59 \ 1465,69\}$ cm² par référence, $\{6170,74 \ 1718,50\}$ cm² par D-critère, et $\{3639,35 \ 1456,35\}$ cm² par réduction ; pour respectivement une moyenne géométrique de 2302,99, de 3256,44, et 2302,21 cm². En terme de classement, nous illustrons en figures 6.13 la disparité de performances de la D-optimalité étant forte par réduction ; calculée exactement sur seulement ses 4000 meilleurs placements-solutions.

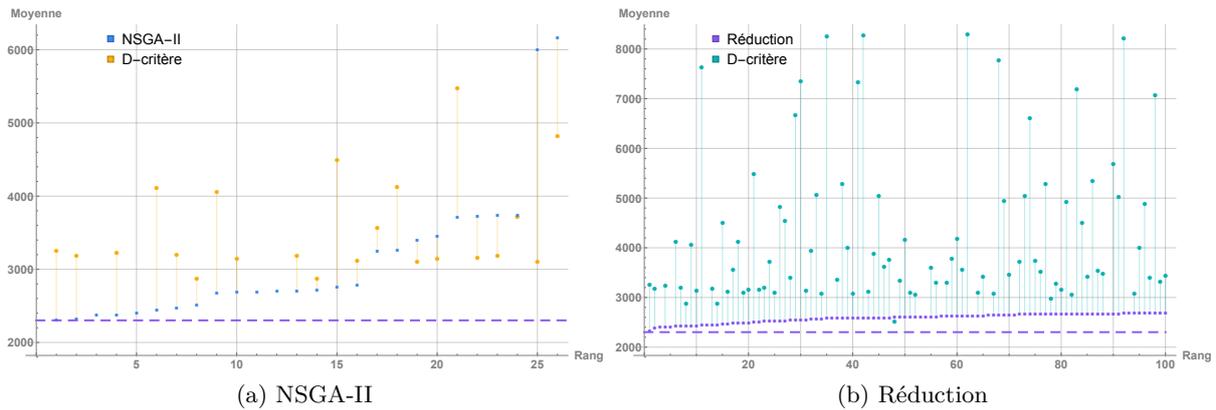


FIGURE 6.17 – Performances $M(m(x_m, \zeta_K))$ en cm² des meilleurs placements-solutions par moyenne géométrique avec $K = 3$ capteurs au placement incertain, illustrant la variance des solutions déterminées par D-critère comparativement aux autres méthodes

6.3.2.5 Discussion pour $K = 3$ capteurs

À ce stade, nous avons des placements divers dépendants des aléas de l'exploration (*i.e.* référence par NSGA-II) ou de la réduction de l'ensemble des conceptions (*i.e.* référence par réduction). La complexité combinatoire inhérente à la méthode d'évaluation et le nombre de conceptions possibles nous obligent à utiliser des algorithmes stochastiques afin d'explorer judicieusement l'ensemble des conceptions, et de déterminer dans un temps raisonnable un placement solution qui sera sous-optimal. Alternativement, nous pouvons choisir de dégrossir l'exploration avec une méthode d'approximation (D-critère sur la matrice d'incertitude) voire d'explorer avec cette approximation et de déterminer parmi une liste réduite de placements-solutions candidats, celui étant réellement le meilleur en terme d'incertitude. Quoiqu'il en soit, nous devons avoir connaissance du compromis à faire en précision (évaluation) et performance algorithmique (exploration). Nous devons nous interroger sur l'objectif réel de la conception d'environnement instrumenté –pour les système d'assistance à l'autonomie à domicile– étant vraisemblablement une optimisation brute (minimisation de l'incertitude) de prime abord mais une satisfaction à minima de contraintes en précision. Ainsi, l'utilisation du D-critère présenté dans cette section nécessite de calculer (à un certain moment) les vraies performances brutes du placement de capteurs afin de connaître la réalité de l'incertitude.

Nous remarquons la mauvaise performance du D-critère appliqué sur la matrice d'incertitude \mathbf{U} pour $K = 3 > M$ capteurs ; où l'incertitude de placement est prise en compte. De plus, nous dénotons l'impossibilité de spécifier lors de l'optimisation l'incertitude maximale de positionnement. Par conséquent, nous nous interrogeons sur l'utilisation de la matrice d'incertitude

et sa capacité à déterminer des placements quasi-optimaux. Le développement limité de Taylor à l'ordre 1 (matrices d'information \mathbf{M} et d'incertitude \mathbf{U}) permet de guider la conception vers un ensemble de placements-solutions intéressants et offrir une solution au problème de conception. Cependant, nous devons être lucide sur sa nature : une approximation limitée (en ordre) et rapide d'un problème complexe au voisinage d'un point de fonctionnement. La chimère recherchée en utilisant la matrice d'information \mathbf{M} ou d'incertitude \mathbf{U} est de disposer d'un outil rapide à calculer en lien direct avec la sous-région de mesure ; lié à un intervalle de crédibilité Bayésienne où la région d'incertitude est grossièrement modélisée par une ellipse. En explorant et évaluant tous les placements-solutions et en les classant, nous ne déterminons pas l'exact classement déterminé par évaluation précise des régions d'incertitude $m(x_m, \zeta_K)$. L'utilisation des outils de planification optimale des expériences fonctionne bien dans le cas simple d'incertitude de mesures uniquement. Si nous utilisons ces techniques en conception d'environnement instrumenté, nous devons nous contenter ainsi de placements ne prenant en compte les incertitudes de placements.

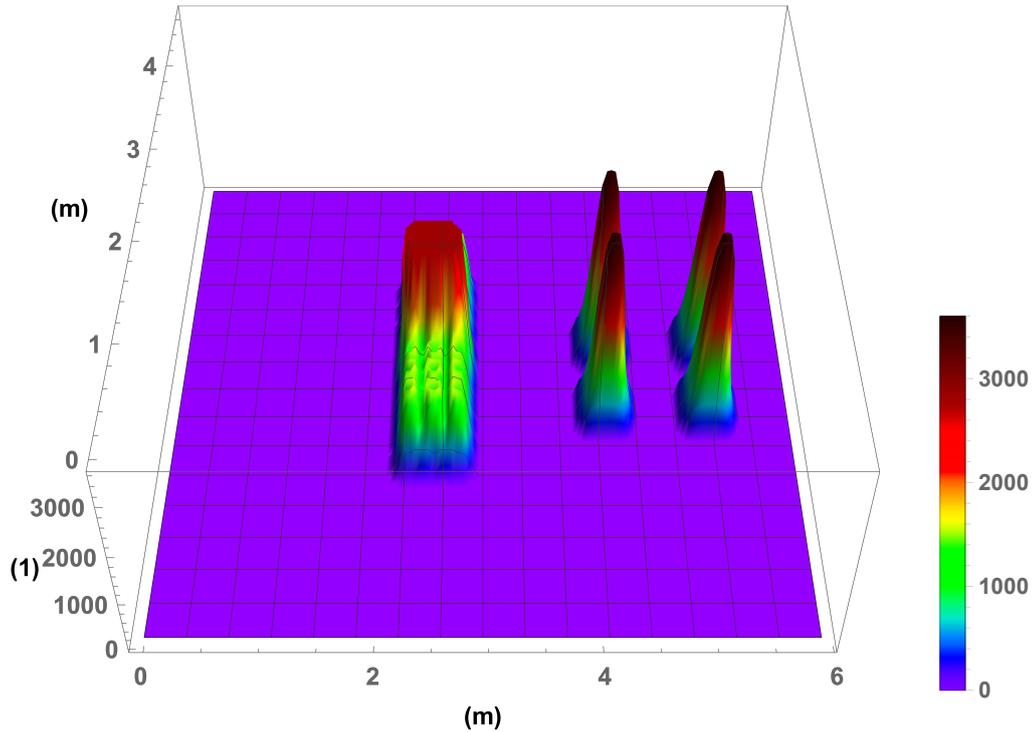
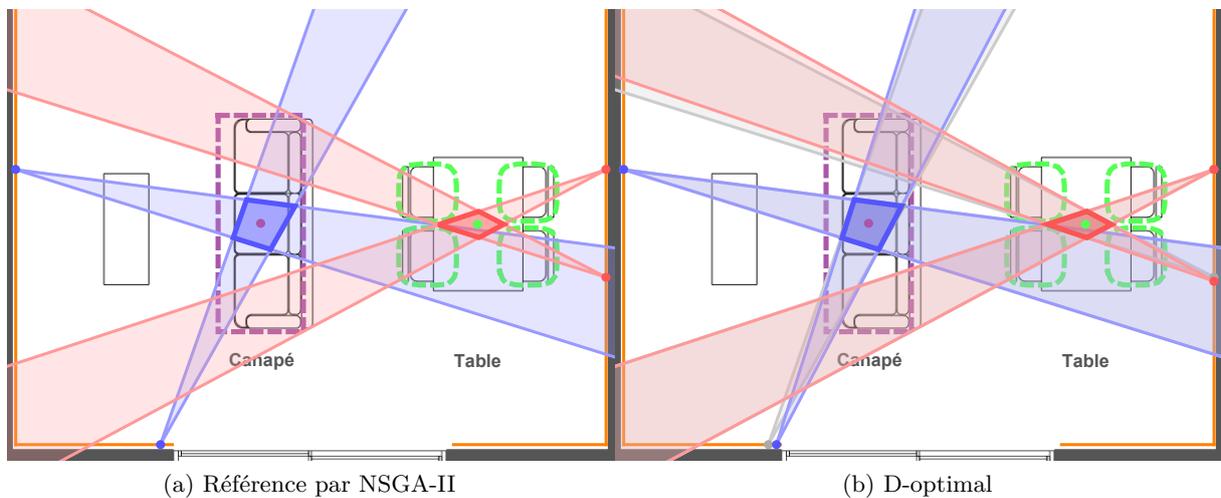
Dans notre étude de cas et ce problème particulier, la prise en compte de l'incertitude pour la conception se révèle être peu utile tant les placements-solutions déterminés sont proches (par NSGA-II et réduction) voire tant elle perturbe la D-optimalité. À l'avenir, nous pouvons dégrossir l'exploration en utilisant simplement la D-optimalité, ainsi que réduire les meilleurs placements en calculant précisément la mesure de la région d'incertitude $M(m(x_m, \zeta_K))$; *i.e.* la sous-région de mesure. Par ailleurs si nous ne pouvons explorer l'ensemble des conceptions par D-critère tant il serait vaste et complexe, alors nous pouvons directement utiliser un algorithme stochastique et itératif : l'intérêt de la D-optimalité est sa vélocité au prix de sa précision (disparité de classement).

Ainsi, nous pouvons par NSGA-II –en explorant judicieusement l'espace des conceptions possibles– déterminer des placements intéressants aux performances proches de ceux déterminés par D-optimalité, où nous avons exploré entièrement l'ensemble des conceptions. Nous remarquons qu'en réduisant l'ensemble des conceptions par D-optimalité, nous obtenons des placements meilleurs en terme d'incertitudes. Le placement en figure 6.10c bénéficie des avantages de chacun ; *cf.* figure 6.10a et 6.10b. Nous avons choisi la moyenne géométrique afin de sélectionner des placements-solutions offrant de bonnes performance pour l'ensemble des intérêts, et de ne pas se laisser emporter par des placements très performants pour certains intérêts faisant –*i.e.*– augmenter la moyenne classique. Cette moyenne est une fonction synthétisant toutes les informations et évaluant le placement selon les besoins spécifiques à notre application.

6.3.3 Cas réel

Dans le cas réel de la conception d'environnement instrumenté, nous proposons de combiner $K = 2$ capteurs homogènes afin de couvrir avec précision des régions d'intérêt. Similairement au cas précédent, nous devons utiliser un algorithme d'exploration stochastique et itératifs afin de déterminer les solutions minimales –notre référence–, obtenues par évaluation précise de la mesure de la région d'incertitude (*i.e.* sous-région de mesure) pour chaque position $x_{m,i}$ de chaque région d'intérêt \mathcal{I}_m . Nous utilisons NSGA-II en utilisant les mêmes paramètres que précédemment mais pour seulement 25 générations au vu du temps de calcul nécessaire ; *cf.* section 5.1. La figure 6.18 illustre l'Occurrence en général des actions dans le séjour, liée au Canapé et à la Table.

Placements décorrés En explorant l'ensemble des conceptions possibles avec NSGA-II, nous obtenons ainsi 64 solutions quasi Pareto-optimales. Nous illustrons les solutions optimales pour chaque position d'intérêt respectivement en figures 6.19a, 6.19b. Nous nous focalisons sur les centre des régions d'intérêt à dessein de comparaison avec les cas d'études précédents.

FIGURE 6.18 – Illustration de l'Occurrence générale de lieux (m^2)FIGURE 6.19 – Illustration des placements-solutions optimaux pour chaque région d'intérêt illustrés selon leur barycentre, pour $K = 2$ capteurs

Nous remarquons que ces placements-solutions diffèrent légèrement entre eux et sont assez proches de ceux déterminés précédemment en figures 6.2a et 6.2b, sans considération des régions d'intérêt et leur Occurrence. Par rapport à notre placement référence en figure 6.19a, les placements par D-optimalité diffèrent légèrement de leur solution respective en ordonnée par seulement ϵ_p ou en abscisse par $3 \cdot \epsilon_p$ pour le second capteur. Les positions d'intérêt illustratives correspondent respectivement au barycentre des régions d'intérêt et de leur Occurrence. Par nature, ces régions d'intérêt sont symétriques de part leur forme et leurs valeurs d'Occurrence. Bien qu'il soit intéressant, le placement décorréolé des capteurs –où nous focalisons nos $K = 2$

pour un seul intérêt– ne correspond pas au cas réel de la conception.

Placements compromis Nous illustrons en figures 6.20a et 6.20b un unique placement déterminé par optimisation de la moyenne géométrique des évaluations, respectivement par NSGA-II et par D-optimalité.

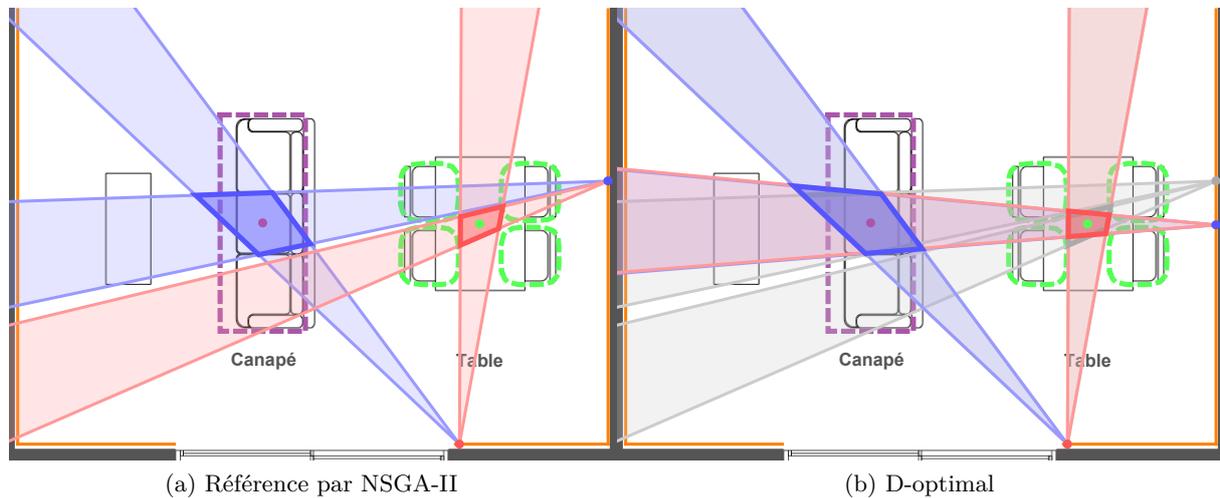


FIGURE 6.20 – Illustration des placements-solutions optimaux pour l'ensemble des régions d'intérêt présentées selon leur barycentre, pour $K = 2$ capteurs

Afin de visualiser les performances des placements au regard de l'Occurrence et région d'incertitude (*i.e.* sous-région de mesure) associées à chaque élément d'intérêt, nous évaluons le produit $M(m(x_{m,i}, \zeta_K)) \cdot \text{Occ}(m(x_{m,i}))$ dans la région de travail \mathcal{T}_p pour chaque position d'intérêt $x_{m,i}$. En figures 6.21a et 6.21c, nous illustrons ainsi respectivement les performances en terme d'incertitudes pondérées de chaque méthode. Nous remarquons que notre référence par NSGA-II offre de meilleures performances en terme d'incertitudes tant elle “minimise” toutes les incertitudes ; malgré le nombre faible d'itérations. Due à la configuration du second capteur, nous constatons une asymétrie des régions d'incertitude : le côté droit du Canapé est mieux “couvert” où les incertitudes sont bien moindres qu'à son opposé.

Dans notre étude de cas réel, nous remarquons que les placements-solutions sont proches de ceux déterminés en figures 6.4 et 6.8, correspondant respectivement au cas simple sans et avec incertitude de placement pour deux positions d'intérêt. Cette similitude de placement est intrigante mais intéressante. D'une part, nous avons défini une région de travail sans obstacle ni occlusion possible des positions ou régions d'intérêt où nos capteurs peuvent être configurés autour des intérêts ayant une ligne-de-vue dégagée. D'autre part, nous utilisons des capteurs homogènes en nombre suffisant ($K = L = 2$) où une mise-à-l'échelle n'est pas nécessaire pour manipuler des grandeurs différentes par nature ou par magnitude. Par ailleurs, nous avons défini nos régions d'intérêt et leur Occurrence symétriques et parallèles aux deux murs principaux d'installation des capteurs. Dans ce cas très particulier, nous pouvons ainsi utiliser le cas simple à $K = 2$ capteurs afin de déterminer des placements-solutions intéressants en terme d'incertitudes, de simplicité et de vélocité.

Ainsi, pour des cas réels, la D-Optimalité fondée sur la matrice d'incertitude permet de déterminer des placements quasi-optimaux plus rapidement –en explorant l'espace entièrement dans nos cas d'étude– étant des placements-solutions aux performances brutes satisfaisantes, au

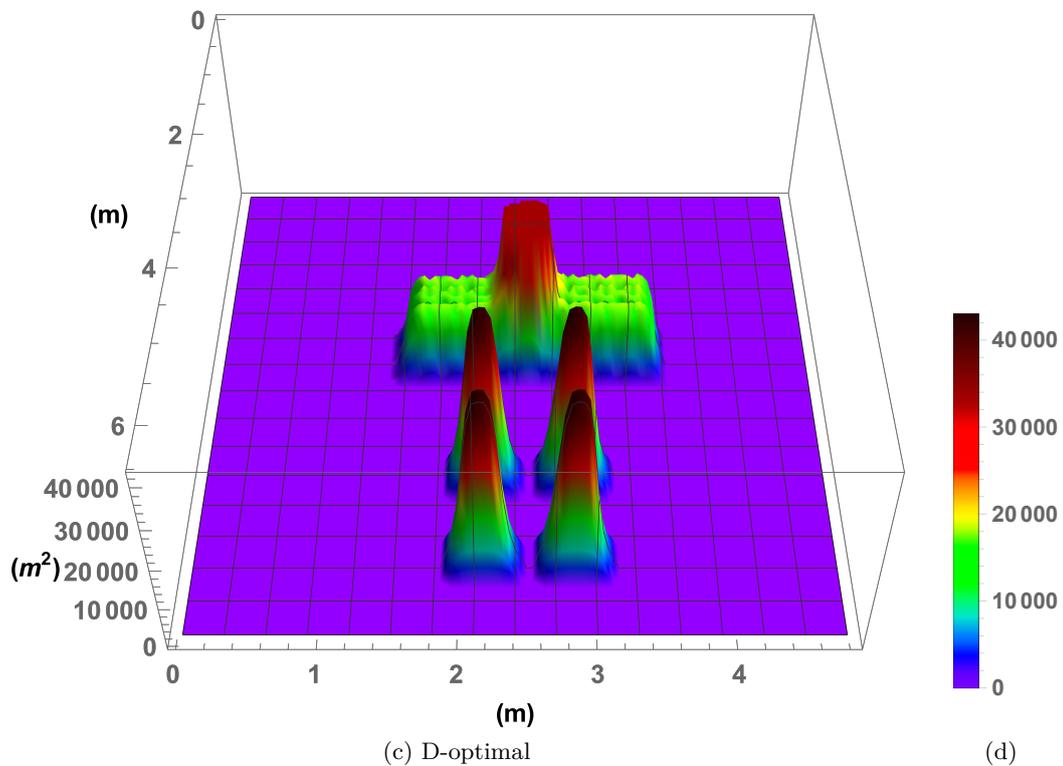
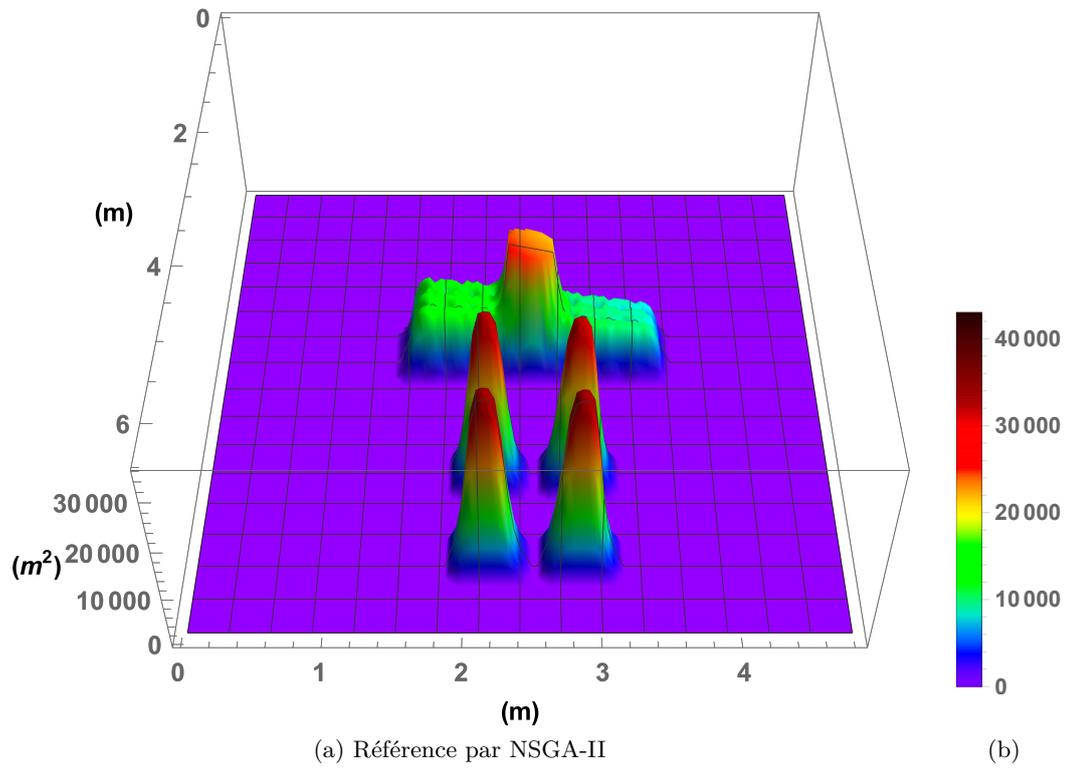


FIGURE 6.21 – Illustration des placements-solutions minimaux en terme d'incertitudes pondérées par l'Occurrence de chaque région d'intérêt en figure 6.18, pour $K = 2$ capteurs ; en une vue de côté

plus proche des meilleurs. La D-optimalité est une solution viable afin d'effectuer un placement de capteurs et de filtrer rapidement parmi un large ensemble de solutions les meilleures. Cependant, nous devons rester lucide sur la nature des placements-solutions proposés : ils sont sous-optimaux en terme d'incertitude $M(m)$, et ne concernent qu'un réseau de capteurs continus homogènes avec une visibilité parfaite. À présent, nous discutons en détail des limites de l'application de la D-optimalité à la conception d'environnement instrumenté.

6.4 Application à la conception d'environnement instrumenté

La conception d'environnement instrumenté pour la veille à la personne implique d'utiliser et de combiner capteurs hétérogènes et non-installés, d'anticiper les diverses incertitudes et surtout de permettre l'identification précise d'une région caractérisée²⁷. Elle doit ainsi considérer une grande variété de capteurs aux usages, aux fonctionnements physiques et aux mesures différentes. Or, la planification optimale des expériences nécessite un modèle analytique du capteur afin d'être utilisée. Bien qu'il soit possible de fusionner plusieurs capteurs hétérogènes [Pin⁺13], ces méthodologies de placement/sélection n'intègrent pas les capteurs binaires. Or, les capteurs binaires sont largement considérés pour les systèmes d'assistance à l'autonomie à domicile étant discrets, à faible coût et aisément acceptés par les personnes [Cha⁺08][Cha⁺09][Din⁺11].

De plus, contrairement aux cas théoriques concernant la détermination des configurations optimales où une unique caractéristique particulière est considérée [Bis⁺10], la conception d'environnement instrumenté concerne la détermination des configurations optimales pour une région d'intérêt \mathcal{I} dans un environnement encombré et contraignant par sa topologie (*e.g.* murs, mobilier) voire par des exigences éthiques ou personnelles (*e.g.* régions interdites à l'installation ou couverture des capteurs).

6.4.1 Capteurs binaires

L'intégration des capteurs binaires –dans l'approche statistique décrite dans ce chapitre– nécessite d'utiliser une distribution de Bernoulli²⁸ et de réaliser une régression logistique binomiale, où les mesures y ne peuvent prendre que deux valeurs ou types. Combiner un modèle continu (non-)linéaire équation B.1 et un modèle logistique binaire équation 6.48 nécessite de combiner des probabilités et des chances étant deux notions fondamentalement différentes. Une probabilité est le rapport entre le nombre d'évènements favorables à une issue d'intérêt et le nombre total d'évènements [Spe14] ; *e.g.* $P(a_k | \mathcal{I}) = \text{Occ}(\mathcal{I} | a_k) / \text{Occ}(\mathcal{I}) \in [0 ; 1]$. Une chance²⁹ est le rapport entre deux probabilités : la probabilité d'un évènement favorable à une issue d'intérêt et la probabilité d'un évènement contraire à cette issue [Spe14] ; *e.g.* $P(a_k | \mathcal{I}) / (1 - P(a_k | \mathcal{I})) \in [0 ; \infty[$. Nous pourrions contourner ce problème en discrétisant notre modèle continu et réaliser une régression logistique multi-nominale³⁰, *cf.* modèle en équation 6.48 [Pen⁺02].

$$\ln \left(\frac{\pi}{1 - \pi} \right) = \beta_0 + \beta \cdot x \quad | \quad \pi = \frac{e^{\beta_0 + \beta x}}{1 + e^{\beta_0 + \beta x}} \quad (6.48)$$

où x est le vecteur des paramètres, la variable β_0 et le vecteur β sont les coefficients de la régression, et π est la probabilité d'un évènement favorable à une issue d'intérêt. Si $\text{Dim}(x) = 1$, alors le modèle logistique est binominal ; *i.e.* cas du capteur de présence.

Or, nous avons choisi une solution plus simple en travaillant directement sur la notion

²⁷ un ensemble de valeurs de la caractéristique d'action ²⁸ un modèle binaire ²⁹ *angl.* odds

³⁰ *angl.* multinomial logistic regression

que représente les probabilités : des ensembles d'évènements et de possibilités ; *e.g.* $P(a_k | \mathcal{I}) = \text{Occ}(\mathcal{I} | a_k) / \text{Occ}(\mathcal{I})$ où \mathcal{I} est un ensemble et Occ une fonction de mesure/dénombrément. Nous pouvons considérer que notre modèle des régions, binaire par nature, détermine : 1) pour la valeur *vrai* une région d'incertitude *-i.e.* la région de couverture- autour d'une valeur de caractéristique *-i.e.* son centre- ; 2) pour la valeur *faux* une région d'incertitude *-i.e.* sa région de couverture complémentaire- autour de ces mêmes valeurs de caractéristique *-i.e.* le centre de sa région de couverture-. Cette dernière région d'incertitude est ainsi non-convexe, étant aussi étendue que l'univers *-possiblement infinie(ment grande)-*, mais la probabilité au sein de la région de couverture est nulle. Il s'agit d'une application du modèle binaire des capteurs binaire et continu décrit en section 3.2.1.1 ; le capteur binaire ne délivrant qu'une unique mesure tandis que celui continu *-ou discrétisé-* délivre une quasi infinité *-respectivement un grand nombre limité et dénombrable-* de mesures. Pour un capteur continu, nous avons similairement ces valeurs *vrai* et *faux* sachant que l'instrument acquiert une-des mesure(s) et leurs régions d'incertitudes associées. En travaillant directement avec les ensembles, nous pouvons gérer les capteurs binaires et continus de manière judicieuse, exacte et similaire aisément.

6.4.2 Optimisation multi-objectifs

D'autre part, la conception optimale pour un ensemble de valeurs *-noté-* \mathcal{I} d'une caractéristique nécessite de déterminer la configuration optimale des capteurs ξ_N pour **toutes** ces valeurs. Nous avons proposé d'intégrer sur cet ensemble \mathcal{I} les critères statistiques de chaque paramètre pour la configuration, en considérant le problème d'optimisation décrit en équation 6.49 pour une unique région d'intérêt. Un tel problème d'optimisation est extrêmement difficile tant du point de vue analytique que calculatoire. Les résultats théoriques sont connus uniquement pour des régions de conception symétriques (*e.g.* cube et sphère) et pour des fonctions de réponses polynomiales du premier ou second ordre [Fed⁺13].

En réalité, l'espace des conceptions possibles est si vaste voire infini *-étant lié à la combinatoire des configurations possibles, des capteurs à disposition et du nombre de capteurs maximal-* que nous ne pouvons pas déterminer raisonnablement des solutions analytiques au problème voire l'explorer entièrement. Nous devons avoir recours à une métaheuristique, soit des algorithmes d'optimisations stochastiques itératifs ; *e.g.* NSGA-II. La détermination d'une conception d'environnement instrumenté nécessite alors d'accepter une conception sous-optimale globalement voire optimale localement. Par conséquent, devons-nous avoir recours à une estimation de l'incertitude peu précise si nous ne pouvons pas facilement déterminer une solution théorique ; la conception étant purement théorique.

Nous préférons favoriser des méthodes d'approximation numériques plus précises, épousant plus finement la "forme" des régions d'incertitude des paramètres, qu'une méthode estimant l'incertitude grossièrement et asymptotiquement : où $N \gg L$, alors que, souvent, nous avons un nombre de capteurs très proche du nombre de paramètres $N \geq L$. Difficilement, nous pouvons déterminer ou assurer que, pour chaque capteur de configuration u_k , il est réalisé r_k observations où $N = \sum_{k=1}^K r_k$, avec K le nombre de capteurs ; où $N = K \implies \forall r_k : r_k = 1 \mid k \in \{1, \dots, K\}$ est un cas spécial. Une telle hypothèse de travail consiste à considérer que les paramètres sont constants pour une durée nécessaire $\Delta t_{nec} = \text{Max}_k(r_k \cdot T_{e,k}) \mid x(t_a) - x(t_a + \Delta t_{nec}) = 0_{1,L}$ dépendante des nombres de mesures r_k et des fréquences de la prise de mesure, où $T_{e,k}$ est la période d'échantillonnage du capteur k ; condition valable pour des capteurs échantillonnant en

parallèle.

$$\begin{aligned}
\widehat{\zeta}_K(\mathcal{I}_m) &= \underset{\zeta_K}{\text{ArgMax}} M^{-1} \cdot \sum_{m=1}^M \underset{x_{m,i}^* \in \mathcal{I}_m}{\text{Min}} (\text{O}_1[\mathbf{U}(\zeta_K, x_{m,i}^*)])^{-1} \\
&= \underset{\zeta_K}{\text{ArgMin}} M^{-1} \cdot \sum_{m=1}^M \underset{x_{m,i}^* \in \mathcal{I}_m}{\text{Max}} (\text{O}_1[\mathbf{U}^-(\zeta_K, x_{m,i}^*)])^{-1}
\end{aligned} \tag{6.49}$$

De plus, nous nous interrogeons sur la pertinence de l'objectif d'optimisation décrit en équation 6.44. Selon le module installé en aval (*i.e.* le système d'assistance à l'autonomie à domicile), ses algorithmes peuvent nécessiter –nous devant de leur assurer au préalable– une précision minimale nécessaire ou incertitude maximale connue au sein de la région d'intérêt \mathcal{I} , voire sa k -couverture. En réalité, la méthode de régression impose un nombre minimal L de capteurs nécessaires et une limite en précision δx constituant la précision maximale atteignable en fonctionnement par le module [Gay13]. L'optimisation de ces objectifs est d'autant plus complexe, qu'elle nécessite d'utiliser des méthodes de planification optimale sous contraintes, étant soluble en pratique pour une dimension de la région de conception \mathcal{U} et un nombre de contraintes faibles [Fed⁺13]; où l'ensemble des commandes admissibles \mathcal{U} est soumis aux exigences éthiques et personnelles. Par conséquent, en terme d'incertitude, nous devons nous concentrer à satisfaire une précision minimale nécessaire qu'une précision moyennée minimisée.

6.4.3 Analyse par intervalles

Les méthodes d'analyse par intervalles nous permettent d'approximer numériquement et rapidement à partir d'un modèle analytique un intervalle d'incertitude pour chaque *sous-caractéristique*, voire une région d'incertitude pour la caractéristique (construite par l'union de régions hyper-rectangulaires); *e.g.* un moindre carré par intervalle [Bla⁺13][San13], une localisation à l'aide de l'analyse par intervalles (IAL) [Guy13]. En effet avec des intervalles d'incertitude sur chaque variable (configurations et mesures des capteurs), nous pouvons approximer la région d'incertitude de la caractéristique particulière.

Grossièrement, l'intersection des régions d'incertitude de chaque mesure y_k –étant un triangle pour un capteur d'angle et un tore pour un capteur de distance [Kel03]– est une bonne approximation (au pire) de l'incertitude d'estimation. Nous pouvons aisément visualiser graphiquement l'incertitude des paramètres, ainsi qu'aisément calculer leur région d'incertitude en procédant à l'intersection de chaque région d'incertitude des mesures capteurs; *cf.* section précédente. Que cette région soit calculée par intersection de régions ou par analyse par intervalle, nous obtenons des régions similaires; celle-ci étant une sous-région de mesure *cf.* section 3.2.1.2. Où l'analyse par intervalles détermine une mosaïque de régions hyper-rectangulaires –ou L-rectangulaires–, l'intersection de régions détermine des régions plus libres et plus précises, convexes ou non-convexes, au prix d'une complexité combinatoire. Cette complexité algorithmique peut-être réduite en travaillant notamment sur des ensembles discrétisés –*e.g.*– par des L-polytopes, voire par des L-cubes; adoptant ainsi une granularité hyper-cubique similairement à l'analyse par intervalle. En pratique, nous choisissons la méthode la plus adéquate selon les algorithmes (et bibliothèques) de traitements disponibles pour calculer l'incertitude puis évaluer le placement; *e.g.* lancer de rayons³¹, opérations ensemblistes.

Ainsi, nous avons exploré l'approche statisticienne pour la conception d'environnement

31 *angl.* ray casting

instrumenté. Cette approche repose sur l'analyse du modèle analytique décrivant le système de capteurs afin d'en extraire des critères statistiques, liés à la variance de la cible à mesurer. Les méthodes de planification optimale des expériences aspirent à déterminer les placements optimaux (*i.e.* configurations capteurs) pour estimer une caractéristique d'action en fonction de l'incertitude des mesures capteurs. En nous fondant sur une analyse de l'incertitude, nous avons développé une méthodologie simple à calculer pour déterminer des placements (quasi-)optimaux en souhaitant prendre en compte toutes les sources d'incertitudes : de mesures, d'installation (*i.e.* configurations) et de modèle. Nous avons formalisé la *matrice d'incertitude* afin de lier toutes les sources d'incertitudes à l'incertitude résultante sur l'estimation de la caractéristique. De cette matrice, nous proposons d'appliquer les mêmes critères et indices utilisés respectivement en planification optimale des expériences et en calibration robotique. Nous avons démontré que dans le cadre d'incertitudes de mesures, notre matrice proposée correspond à la matrice d'information usuellement utilisée par ces domaines. Notre méthodologie permet ainsi d'étendre l'approche Statistique à toutes les sources d'incertitudes possibles du système de capteurs mais nécessitant une mise-à-l'échelle.

En étudiant et développant cette approche, nous avons constaté qu'elle est peu adaptée à notre application concrète de conception d'environnement instrumenté où il est nécessaire d'y intégrer les capteurs binaires et de manipuler des capteurs hétérogènes. Nous avons préféré privilégier l'approche développée dans les chapitres précédents, fondée sur les ensembles, étant plus informatique qu'analytique, afin d'intégrer aisément les capteurs binaires et de calculer précisément les régions d'incertitudes. Afin de réaliser une conception d'environnement instrumenté performante, il est nécessaire de satisfaire des contraintes de précision nécessaire et de couverture nécessaire définies par les exigences du module installé en aval. Nous sommes convaincu que pour concevoir des environnements instrumentés adéquats et performants, nous devons développer et utiliser une approche intégrant précision et couverture, afin de considérer simultanément les incertitudes et la pertinence du placement de capteurs, ainsi que les incertitudes et l'efficacité des mesures des capteurs.

Conclusion

Face au vieillissement démographique, maintenir et soutenir la qualité de vie des personnes à domicile est devenu un enjeu sociétal majeur. Pour ce faire, il est primordial de veiller aux activités du quotidien liées au bien-être de la personne qui, effectuées par habitude, définissent et régissent sa vie. L'évaluation de leurs réalisations permet de veiller sur l'état de santé de la personne, afin d'anticiper et d'identifier ses besoins en assistance. Automatiser la veille aux activités est primordial pour mettre en place une veille quotidienne, normalisée et efficace. L'automatisation nécessite d'instrumenter le domicile afin d'y installer des capteurs adaptés aux besoins de la veille, à l'environnement de la personne ainsi qu'à ses préférences et à ses habitudes de vie. Chaque conception d'environnement instrumenté est ainsi unique, essayant de répondre aux contraintes et objectifs spécifiques de chacun.

Dans cette thèse, nous avons étudié la conception de l'instrumentation du domicile : comment sélectionner et configurer divers capteurs afin de veiller aux activités d'intérêt. En chapitre 2, nous avons proposé une modélisation des activités –souvent trop complexes à représenter– en décomposant l'activité en actions : intitulé **modèle des activités**. Dans notre modèle, nous caractérisons l'action par un lieu, une interaction ou une temporalité. De plus, nous considérons qu'une action peut-être commune à plusieurs activités et contextes permettant la conception d'environnement instrumenté globalement pour différents services d'intelligence ambiante. Cette décomposition de l'activité permet de nous concentrer sur l'évaluation de l'identifiabilité du réseau de capteurs au regard des actions d'intérêt. Cette évaluation du réseau de capteurs par le biais de l'action permet de proposer une conception non-liée à une technologie de reconnaissance d'activité (*e.g.* axée connaissances ou données).

En chapitre 3, nous avons développé un modèle unifiant, unique et flexible permettant de représenter et comparer actions et capteurs. Ce modèle s'appuie sur la notion d'ensemble afin de combiner, de comparer et d'évaluer des capteurs hétérogènes aux informations communes binaires ou discrétisées, intitulé **modèle des régions**. Dans notre modèle, nous représentons les actions par une région d'intérêt par caractéristiques, et représentons les capteurs par une région de couverture pour son acquisition effective ainsi que des régions de mesure par mesures avec leurs incertitudes associées. En chapitre 4, nous avons développé une évaluation de l'identifiabilité des actions en considérant les intérêts prioritaires (Occurrence) et les capteurs incertains (Déteçtabilité). Cette évaluation est fondée sur les techniques utilisées en test d'hypothèse et en classification binaire afin de calculer la **F-mesure**. Par cette évaluation, nous qualifions le réseau de capteurs avec les notions de Précision (performance d'identification) et de Sensibilité (couverture des actions). En chapitre 5, nous proposons un algorithme de conception Pareto multi-objectifs adapté exploitant une implémentation de notre modèle des régions. Au sein d'un cas applicatif, nous illustrons et détaillons la conception d'environnement instrumenté pour la veille à la personne utilisant des capteurs de présence et choisissant optimalement la caractéristique à couvrir pour chaque action. Notre algorithme de conception permet de proposer une large palette de solutions diverses et variées aux décideurs, offrant des placements moyens pour plusieurs fiabilités ou qui excelleront dans certaines.

En chapitre 6, nous avons étudié une évaluation de l'identifiabilité d'une caractéristique d'action particulière pour son application à la conception d'environnement instrumenté : intitulée **Observabilité**. Nous avons développé une méthodologie de calcul simplifié pour déterminer la matrice d'information du modèle analytique d'un capteur continu, et pour en définir une nouvelle matrice prenant en compte toutes les sources d'incertitude –centrées mais bornées– influençant l'identification de la caractéristique : intitulée **matrice d'incertitude**. Notre nouvelle matrice est construite en effectuant une analyse de l'incertitude du modèle analytique, grâce au développement limité de Taylor en la solution exacte. Pour notre évaluation, nous appliquons directement les critères d'Optimalité ou indices d'Observabilité utilisés dans les domaines de la planification optimale des expériences et de la calibration robotique. Au sein d'une étude de cas, nous appliquons la matrice d'incertitude et l'Observabilité en contexte, que nous comparons à notre modèle des régions, utilisant des capteurs continus d'angle pour couvrir optimalement uniquement une caractéristique de lieu de l'action. Cette approche analytique par Observabilité permet de calculer rapidement des placements-solutions quasi-optimaux pour des capteurs continus homogènes. Or, elle est peu adaptée aux réseaux de capteurs hétérogènes – mélangeant des capteurs binaires, discrets et continus–, et n'intègre pas les notions de visibilité et d'occlusion.

À travers les chapitres 4 et 6, nous avons développé deux aspects d'évaluation des réseaux de capteurs : la couverture (F-mesure) des actions et l'incertitude (Observabilité) des mesures capteurs. Nous sommes convaincus qu'il est nécessaire de développer une méthodologie intégrant ces deux évaluations complémentaires afin de concevoir des environnements instrumentés performants. Pour son bon fonctionnement, nous devons assurer au module installé en aval une précision nécessaire sur chaque mesure capteur. Pour sa bonne identification, nous devons assurer une couverture de chaque action d'intérêt par les capteurs, ainsi que réduire les faux positifs et faux négatifs pour chaque action d'intérêt. Enfin, nous devons garder à l'esprit les objectifs et contraintes de la veille à la personne afin de concevoir un environnement instrumenté humain, adapté à la richesse et à la diversité des personnes.

Concevoir un environnement instrumenté humain

Dans notre contexte où la vie privée est aussi importante que l'incertitude, nous devons instaurer des mesures importantes de modélisation et d'installation afin d'être écologique et fiable pour représenter et appliquer le réseau de capteurs.

Une modélisation poussée

Une modélisation écologique du domicile nécessite de considérer : *e.g.* les plans du bâti, la disposition du mobilier et des objets pertinents. Une modélisation fiable de la veille nécessite de détailler : *e.g.* les corrélations entre actions, toutes les caractéristiques d'actions, les performances des capteurs. Cette modélisation “poussée” peut sembler être un frein à la conception du réseau de capteurs, au préalable de toute installation de capteurs. Un écueil de modélisation est de considérer abusivement de fortes incertitudes sur le placement du mobilier ou des régions de déplacement vastes pour chaque meuble amovible, par facilité. Ainsi la conception nécessiterait d'installer un réseau de capteurs important pour au final en délaisser certains [Kad⁺10]. La conception d'environnement instrumenté doit proposer un réseau de capteurs optimal en terme d'efficacité (*i.e.* fournir des mesures fiables et une identification fiable), en terme d'utilité (*i.e.* rendements des capteurs), ainsi qu'en terme de coût (*i.e.* achat, installation, fonctionnement, maintenance) **au préalable de l'installation**.

Nous devons combattre la paresse intellectuelle concernant l'effort de modélisation, car une modélisation précise et réaliste permet de concevoir des placements plus optimaux [Akb⁺13]. En

développant les bons outils pour aider les intervenants (cliniciens et installateurs), nous pouvons faciliter ce processus de modélisation à dessein d'obtenir une modélisation valide et fiable.

Une conception indépendante

La conception d'environnement instrumenté ne doit pas se reposer sur le système d'assistance à l'autonomie à domicile, installé en aval et s'occupant de reconnaître les activités. Dans l'éventualité d'un apprentissage personnalisé, une sur-instrumentation de prime-abord et des ajustements futurs seront nécessaires : engendrant des surcoûts et de nombreuses interventions dictées par un système fermé, dont nous ne comprenons pas aujourd'hui son fonctionnement et dont nous ne pouvons relier à des connaissances réelles ses variables internes [Kni17]. L'idée de déterminer *à posteriori de l'installation* l'ensemble optimal des capteurs utiles pour la veille est séduisante, mais elle entraîne un coût d'installation indécemment élevé pour une utilité et un rendement faible. En réalité, ce premier placement de capteurs à installer nécessite une conception dont la méthodologie doit être détaillée et normalisée ; non une conception manuelle par un *expert en placement* évaluant par "*pifomètre*". Pour concevoir ce premier placement, il est ainsi nécessaire de modéliser le domicile et la veille : autant nous efforcer à mieux modéliser et à utiliser une meilleure méthodologie de conception.

Nous ne pouvons nous permettre des ajustements incessants du réseau de capteurs dans le cadre d'une instrumentation réelle au domicile. Si nous souhaitons être fiables dans notre modélisation, alors nous devons accepter l'explosion des coûts du réseau de capteurs (achat, installation, fonctionnement et maintenance) voire l'utilisation de caméras posant des problèmes d'acceptation par les personnes.

Une capitalisation des installations

La conception nécessite une connaissance approfondie sur les activités, l'environnement et la personne afin d'effectuer un placement de capteurs judicieux. De nombreuses recherches récentes se concentrent sur des approches hybrides alliant connaissance et apprentissage afin d'exploiter les vastes connaissances sur l'activité et de s'adapter aux spécificités de la personne. Azkune et al. [Azk⁺15] proposent d'utiliser une approche axée données pour faire évoluer un modèle d'activité établi par une approche axée connaissances, s'adaptant au comportement de la personne. Dans leurs résultats initiaux, ils montrent que cette approche hybride permet d'apprendre des modèles d'activité complets et spécialisés et d'atteindre des taux de reconnaissance parfaits mais nécessitant d'apprendre quelques modèles de faux positifs. De plus, ils montrent qu'une telle approche fonctionne aisément avec un environnement expérimental réel : pour des données utilisateurs réelles, des séquences d'activité réalistes, et du bruit capteurs.

Par ailleurs, nous devons développer des outils dédiés en installation et en fonctionnement afin de permettre au système d'assistance à l'autonomie à domicile de s'adapter à la vie quotidienne de la personne (en constante évolution). La disponibilité de ses outils permet à la conception de capitaliser sur l'évolutivité de l'installation par l'utilisation de dispositifs évolutifs : *e.g.* une modification ou reconfiguration légère du réseau de capteurs, un apprentissage ou affinage automatique des actions et activités.

Ainsi, nous devons penser la conception d'environnement instrumenté étant décorrélée du module installé en aval mais en corrélation avec d'autres placements de capteurs installés. La conception nécessite une modélisation écologique du domicile et une modélisation fiable

de la veille : *e.g.* des connaissances approfondies sur les activités, le domicile et la personne. La conception exige de considérer des capteurs hétérogènes aux usages, aux fonctionnements physiques et aux mesures différentes mais possiblement connexes : *e.g.* un capteur de distance, de présence, de pression voire de chaleur acquièrent des informations de positions ; un capteur de consommation électrique/hydraulique, un contacteur, voire une caméra acquièrent des informations d'interactions.

En travaux futurs à cette thèse, nous devons intégrer les occlusions des éléments de l'environnement afin de considérer les influences dues au mobilier et luminaires sur notre évaluation. Nous devons nous intéresser aux algorithmes d'optimisation existant pour faciliter la recherche de placements-solutions, en explorant notamment plus judicieusement l'espace opératoire, ainsi que pour intégrer des contraintes à la conception. Nous avons soulevé et discuté de divers problèmes inhérents à la conception réelle, afin d'en proposer des solutions. Nous devons cependant éprouver notre méthodologie de conception (*i.e.* modèle des activités, modèle des régions, et évaluation par F_mesure) sur des conceptions réelles afin d'être confronté à leurs forces et faiblesses, de les analyser en profondeur et d'améliorer la méthodologie à dessein d'écologie et de fiabilité.

Annexe

Annexe A

Cadre conceptuel de pratique en Ergothérapie OTPF

Cette annexe présente des tables standardisées définies dans le cadre conceptuel de pratique en Ergothérapie OTPF [Rol⁺14] et référencée en chapitre 2.

A.1 Occupations de l'OTPF

TABLE 1. OCCUPATIONS

Occupations are various kinds of life activities in which individuals, groups, or populations engage, including activities of daily living, instrumental activities of daily living, rest and sleep, education, work, play, leisure, and social participation.

Category	Description
<p>■ ACTIVITIES OF DAILY LIVING (ADLs)—Activities oriented toward taking care of one's own body (adapted from Rogers & Holm, 1994). ADLs also are referred to as <i>basic activities of daily living (BADLs)</i> and <i>personal activities of daily living (PADLs)</i>. These activities are "fundamental to living in a social world; they enable basic survival and well-being" (Christiansen & Hammecker, 2001, p. 156).</p>	
Bathing, showering	Obtaining and using supplies; soaping, rinsing, and drying body parts; maintaining bathing position; and transferring to and from bathing positions
Toileting and toilet hygiene	Obtaining and using toileting supplies, managing clothing, maintaining toileting position, transferring to and from toileting position, cleaning body, and caring for menstrual and continence needs (including catheter, colostomy, and suppository management), as well as completing intentional control of bowel movements and urination and, if necessary, using equipment or agents for bladder control (Uniform Data System for Medical Rehabilitation, 1996, pp. III-20, III-24)
Dressing	Selecting clothing and accessories appropriate to time of day, weather, and occasion; obtaining clothing from storage area; dressing and undressing in a sequential fashion; fastening and adjusting clothing and shoes; and applying and removing personal devices, prosthetic devices, or splints
Swallowing/eating	Keeping and manipulating food or fluid in the mouth and swallowing it; <i>swallowing</i> is moving food from the mouth to the stomach
Feeding	Setting up, arranging, and bringing food [or fluid] from the plate or cup to the mouth; sometimes called <i>self-feeding</i>
Functional mobility	Moving from one position or place to another (during performance of everyday activities), such as in-bed mobility, wheelchair mobility, and transfers (e.g., wheelchair, bed, car, shower, tub, toilet, chair, floor). Includes functional ambulation and transportation of objects.
Personal device care	Using, cleaning, and maintaining personal care items, such as hearing aids, contact lenses, glasses, orthotics, prosthetics, adaptive equipment, glucometers, and contraceptive and sexual devices
Personal hygiene and grooming	Obtaining and using supplies; removing body hair (e.g., using razor, tweezers, lotion); applying and removing cosmetics; washing, drying, combing, styling, brushing, and trimming hair; caring for nails (hands and feet); caring for skin, ears, eyes, and nose; applying deodorant; cleaning mouth; brushing and flossing teeth; and removing, cleaning, and reinserting dental orthotics and prosthetics
Sexual activity	Engaging in activities that result in sexual satisfaction and/or meet relational or reproductive needs
<p>■ INSTRUMENTAL ACTIVITIES OF DAILY LIVING (IADLs)—Activities to support daily life within the home and community that often require more complex interactions than those used in ADLs.</p>	
Care of others (including selecting and supervising caregivers)	Arranging, supervising, or providing care for others
Care of pets	Arranging, supervising, or providing care for pets and service animals
Child rearing	Providing care and supervision to support the developmental needs of a child
Communication management	Sending, receiving, and interpreting information using a variety of systems and equipment, including writing tools, telephones (cell phones or smartphones), keyboards, audiovisual recorders, computers or tablets, communication boards, call lights, emergency systems, Braille writers, telecommunication devices for deaf people, augmentative communication systems, and personal digital assistants
Driving and community mobility	Planning and moving around in the community and using public or private transportation, such as driving, walking, bicycling, or accessing and riding in buses, taxi cabs, or other transportation systems
Financial management	Using fiscal resources, including alternate methods of financial transaction, and planning and using finances with long-term and short-term goals
Health management and maintenance	Developing, managing, and maintaining routines for health and wellness promotion, such as physical fitness, nutrition, decreased health risk behaviors, and medication routines
Home establishment and management	Obtaining and maintaining personal and household possessions and environment (e.g., home, yard, garden, appliances, vehicles), including maintaining and repairing personal possessions (e.g., clothing, household items) and knowing how to seek help or whom to contact

(a)

TABLE 1. OCCUPATIONS*(Continued)*

Category	Description
Meal preparation and cleanup	Planning, preparing, and serving well-balanced, nutritious meals and cleaning up food and utensils after meals
Religious and spiritual activities and expression	Participating in <i>religion</i> , "an organized system of beliefs, practices, rituals, and symbols designed to facilitate closeness to the sacred or transcendent" (Moreira-Almeida & Koenig, 2006, p. 844), and engaging in activities that allow a sense of connectedness to something larger than oneself or that are especially meaningful, such as taking time out to play with a child, engaging in activities in nature, and helping others in need (Spencer, Davidson, & White, 1997)
Safety and emergency maintenance	Knowing and performing preventive procedures to maintain a safe environment; recognizing sudden, unexpected hazardous situations; and initiating emergency action to reduce the threat to health and safety; examples include ensuring safety when entering and exiting the home, identifying emergency contact numbers, and replacing items such as batteries in smoke alarms and light bulbs
Shopping	Preparing shopping lists (grocery and other); selecting, purchasing, and transporting items; selecting method of payment; and completing money transactions; included are Internet shopping and related use of electronic devices such as computers, cell phones, and tablets
■ REST AND SLEEP —Activities related to obtaining restorative rest and sleep to support healthy, active engagement in other occupations.	
Rest	Engaging in quiet and effortless actions that interrupt physical and mental activity, resulting in a relaxed state (Nurit & Michal, 2003, p. 227); included are identifying the need to relax; reducing involvement in taxing physical, mental, or social activities; and engaging in relaxation or other endeavors that restore energy and calm and renew interest in engagement
Sleep preparation	(1) Engaging in routines that prepare the self for a comfortable rest, such as grooming and undressing, reading or listening to music to fall asleep, saying goodnight to others, and engaging in meditation or prayers; determining the time of day and length of time desired for sleeping and the time needed to wake; and establishing sleep patterns that support growth and health (patterns are often personally and culturally determined). (2) Preparing the physical environment for periods of unconsciousness, such as making the bed or space on which to sleep; ensuring warmth or coolness and protection; setting an alarm clock; securing the home, such as locking doors or closing windows or curtains; and turning off electronics or lights.
Sleep participation	Taking care of personal needs for sleep, such as ceasing activities to ensure onset of sleep, napping, and dreaming; sustaining a sleep state without disruption; and performing nighttime care of toileting needs and hydration; also includes negotiating the needs and requirements of and interacting with others within the social environment such as children or partners, including providing nighttime caregiving such as breastfeeding and monitoring the comfort and safety of others who are sleeping
■ EDUCATION —Activities needed for learning and participating in the educational environment.	
Formal educational participation	Participating in academic (e.g., math, reading, degree coursework), nonacademic (e.g., recess, lunchroom, hallway), extracurricular (e.g., sports, band, cheerleading, dances), and vocational (prevocational and vocational) educational activities
Informal personal educational needs or interests exploration (beyond formal education)	Identifying topics and methods for obtaining topic-related information or skills
Informal personal education participation	Participating in informal classes, programs, and activities that provide instruction or training in identified areas of interest
■ WORK —"Labor or exertion; to make, construct, manufacture, form, fashion, or shape objects; to organize, plan, or evaluate services or processes of living or governing; committed occupations that are performed with or without financial reward" (Christiansen & Townsend, 2010, p. 423).	
Employment interests and pursuits	Identifying and selecting work opportunities based on assets, limitations, likes, and dislikes relative to work (adapted from Mosey, 1996, p. 342)
Employment seeking and acquisition	Advocating for oneself; completing, submitting, and reviewing appropriate application materials; preparing for interviews; participating in interviews and following up afterward; discussing job benefits; and finalizing negotiations
Job performance	Performing the requirements of a job, including work skills and patterns; time management; relationships with coworkers, managers, and customers; leadership and supervision; creation, production, and distribution of products and services; initiation, sustainment, and completion of work; and compliance with work norms and procedures
Retirement preparation and adjustment	Determining aptitudes, developing interests and skills, selecting appropriate avocational pursuits, and adjusting lifestyle in the absence of the worker role

(b)

TABLE 1. OCCUPATIONS*(Continued)*

Category	Description
Volunteer exploration	Determining community causes, organizations, or opportunities for unpaid work in relationship to personal skills, interests, location, and time available
Volunteer participation	Performing unpaid work activities for the benefit of selected causes, organizations, or facilities
■ PLAY —“Any spontaneous or organized activity that provides enjoyment, entertainment, amusement, or diversion” (Parham & Fazio, 1997, p. 252).	
Play exploration	Identifying appropriate play activities, including exploration play, practice play, pretend play, games with rules, constructive play, and symbolic play (adapted from Bergen, 1988, pp. 64–65)
Play participation	Participating in play; maintaining a balance of play with other occupations; and obtaining, using, and maintaining toys, equipment, and supplies appropriately
■ LEISURE —“Nonobligatory activity that is intrinsically motivated and engaged in during discretionary time, that is, time not committed to obligatory occupations such as work, self-care, or sleep” (Parham & Fazio, 1997, p. 250).	
Leisure exploration	Identifying interests, skills, opportunities, and appropriate leisure activities
Leisure participation	Planning and participating in appropriate leisure activities; maintaining a balance of leisure activities with other occupations; and obtaining, using, and maintaining equipment and supplies as appropriate
■ SOCIAL PARTICIPATION —“The interweaving of occupations to support desired engagement in community and family activities as well as those involving peers and friends” (Gillen & Boyt Schell, 2014, p. 607); involvement in a subset of activities that involve social situations with others (Bedell, 2012) and that support social interdependence (Magasi & Hammel, 2004). Social participation can occur in person or through remote technologies such as telephone calls, computer interaction, and video conferencing.	
Community	Engaging in activities that result in successful interaction at the community level (e.g., neighborhood, organization, workplace, school, religious or spiritual group)
Family	Engaging in activities that result in “successful interaction in specific required and/or desired familial roles” (Mosey, 1996, p. 340)
Peer, friend	Engaging in activities at different levels of interaction and intimacy, including engaging in desired sexual activity

(c)

FIGURE A.1 – Occupations et leur activités de l’OTPF [Ro1+14]

A.2 Exigences des activités

TABLE 7. ACTIVITY AND OCCUPATIONAL DEMANDS

Activity and occupational demands are the components of activities and occupations that occupational therapy practitioners consider during the clinical reasoning process. Depending on the context and needs of the client, these demands can be deemed barriers to or supports for participation. Specific knowledge about the demands of activities and occupations assists practitioners in selecting activities for therapeutic purposes. Demands of the activity or occupation include the relevance and importance to the client, objects used and their properties, space demands, social demands, sequencing and timing, required actions and performance skills, and required underlying body functions and body structures.

Type of Demand	Description	Examples
Relevance and importance to client	Alignment with the client's goals, values, beliefs, and needs and perceived utility	<ul style="list-style-type: none"> Driving a car equates with independence. Preparing a holiday meal connects with family tradition. Voting is a rite of passage to adulthood.
Objects used and their properties	Tools, supplies, and equipment required in the process of carrying out the activity	<ul style="list-style-type: none"> Tools (e.g., scissors, dishes, shoes, volleyball) Supplies (e.g., paints, milk, lipstick) Equipment (e.g., workbench, stove, basketball hoop) Inherent properties (e.g., heavy, rough, sharp, colorful, loud, bitter tasting)
Space demands (related to the physical environment)	Physical environmental requirements of the activity (e.g., size, arrangement, surface, lighting, temperature, noise, humidity, ventilation)	<ul style="list-style-type: none"> Large, open space outdoors for a baseball game Bathroom door and stall width to accommodate wheelchair Noise, lighting, and temperature controls for a library
Social demands (related to the social environment and virtual and cultural contexts)	Elements of the social environment and virtual and cultural contexts that may be required by the activity	<ul style="list-style-type: none"> Rules of the game Expectations of other participants in the activity (e.g., sharing supplies, using language appropriate for the meeting, appropriate virtual decorum)
Sequencing and timing	Process required to carry out the activity (e.g., specific steps, sequence of steps, timing requirements)	<ul style="list-style-type: none"> <i>Steps to make tea:</i> Gather cup and tea bag, heat water, pour water into cup, let steep, add sugar. <i>Sequence:</i> Heat water before placing tea bag in water. <i>Timing:</i> Leave tea bag to steep for 2 minutes. <i>Steps to conduct a meeting:</i> Establish goals for meeting, arrange time and location, prepare agenda, call meeting to order. <i>Sequence:</i> Have people introduce themselves before beginning discussion of topic. <i>Timing:</i> Allot sufficient time for discussion of topic and determination of action items.
Required actions and performance skills	Actions (performance skills—motor, process, and social interaction) required by the client that are an inherent part of the activity	<ul style="list-style-type: none"> Feeling the heat of the stove Gripping a handlebar Choosing ceremonial clothes Determining how to move limbs to control the car Adjusting the tone of voice Answering a question
Required body functions	"Physiological functions of body systems (including psychological functions)" (WHO, 2001, p. 10) required to support the actions used to perform the activity	<ul style="list-style-type: none"> Mobility of joints Level of consciousness Cognitive level
Required body structures	"Anatomical parts of the body such as organs, limbs, and their components" that support body functions (WHO, 2001, p. 10) and are required to perform the activity	<ul style="list-style-type: none"> Number of hands or feet Olfactory or taste organs

FIGURE A.2 – Exigences des activités de l'OTPF [Rol⁺14]

A.3 Habilité de réalisation

TABLE 3. PERFORMANCE SKILLS

Performance skills are observable elements of action that have an implicit functional purpose; skills are considered a classification of actions, encompassing multiple capacities (body functions and body structures) and, when combined, underlie the ability to participate in desired occupations and activities. This list is not all inclusive and may not include all possible skills addressed during occupational therapy interventions.

Skill	Definition
<p>■ MOTOR SKILLS—“Occupational performance skills observed as the person interacts with and moves task objects and self around the task environment” (e.g., activity of daily living [ADL] motor skills, school motor skills; Boyt Schell, Gillen, & Scaffa, 2014a, p. 1237).</p>	
Aligns	Interacts with task objects without evidence of persistent propping or persistent leaning
Stabilizes	Moves through task environment and interacts with task objects without momentary propping or loss of balance
Positions	Positions self an effective distance from task objects and without evidence of awkward body positioning
Reaches	Effectively extends the arm and, when appropriate, bends the trunk to effectively grasp or place task objects that are out of reach
Bends	Flexes or rotates the trunk as appropriate to the task to grasp or place task objects out of reach or when sitting down
Grips	Effectively pinches or grasps task objects such that the objects do not slip (e.g., from the person's fingers, between teeth)
Manipulates	Uses dexterous finger movements, without evidence of fumbling, when manipulating task objects (e.g., manipulating buttons when buttoning)
Coordinates	Uses two or more body parts together to manipulate, hold, and/or stabilize task objects without evidence of fumbling task objects or slipping from one's grasp
Moves	Effectively pushes or pulls task objects along a supporting surface, pulls to open or pushes to close doors and drawers, or pushes on wheels to propel a wheelchair
Lifts	Effectively raises or lifts task objects without evidence of increased effort
Walks	During task performance, ambulates on level surfaces without shuffling the feet, becoming unstable, propping, or using assistive devices
Transports	Carries task objects from one place to another while walking or moving in a wheelchair
Calibrates	Uses movements of appropriate force, speed, or extent when interacting with task objects (e.g., not crushing objects, pushing a door with enough force that it closes)
Flows	Uses smooth and fluid arm and wrist movements when interacting with task objects
Endures	Persists and completes the task without showing obvious evidence of physical fatigue, pausing to rest, or stopping to catch one's breath
Paces	Maintains a consistent and effective rate or tempo of performance throughout the entire task
<p>■ PROCESS SKILLS—“Occupational performance skills [e.g., ADL process skills, school process skills] observed as a person (1) selects, interacts with, and uses task tools and materials; (2) carries out individual actions and steps; and (3) modifies performance when problems are encountered” (Boyt Schell et al., 2014a, p. 1239).</p>	
Paces	Maintains a consistent and effective rate or tempo of performance throughout the entire task
Attends	Does not look away from what he or she is doing, interrupting the ongoing task progression
Heeds	Carries out and completes the task originally agreed on or specified by another
Chooses	Selects necessary and appropriate type and number of tools and materials for the task, including the tools and materials that the person was directed to use or specified he or she would use
Uses	Applies tools and materials as they are intended (e.g., uses a pencil sharpener to sharpen a pencil but not to sharpen a crayon) and in a hygienic fashion
Handles	Supports or stabilizes tools and materials in an appropriate manner, protecting them from being damaged, slipping, moving, and falling
Inquires	(1) Seeks needed verbal or written information by asking questions or reading directions or labels and (2) does not ask for information when he or she was fully oriented to the task and environment and had immediate prior awareness of the answer
Initiates	Starts or begins the next action or step without hesitation
Continues	Performs single actions or steps without interruptions such that once an action or task is initiated, the person continues without pauses or delays until the action or step is completed
Sequences	Performs steps in an effective or logical order and with an absence of (1) randomness or lack of logic in the ordering and (2) inappropriate repetition of steps
Terminates	Brings to completion single actions or single steps without inappropriate persistence or premature cessation
Searches/locates	Looks for and locates tools and materials in a logical manner, both within and beyond the immediate environment
Gathers	Collects related tools and materials into the same work space and regathers tools or materials that have spilled, fallen, or been misplaced

(a)

TABLE 3. PERFORMANCE SKILLS*(Continued)*

Skill	Definition
Organizes	Logically positions or spatially arranges tools and materials in an orderly fashion within a single work space and between multiple appropriate work spaces such that the work space is not too spread out or too crowded
Restores	Puts away tools and materials in appropriate places and ensures that the immediate work space is restored to its original condition
Navigates	Moves the arm, body, or wheelchair without bumping into obstacles when moving in the task environment or interacting with task objects
Notices/responds	Responds appropriately to (1) nonverbal task-related cues (e.g., heat, movement), (2) the spatial arrangement and alignment of task objects to one another, and (3) cupboard doors and drawers that have been left open during task performance
Adjusts	Effectively (1) goes to new work spaces; (2) moves tools and materials out of the current work space; and (3) adjusts knobs, dials, or water taps to overcome problems with ongoing task performance
Accommodates	Prevents ineffective task performance
Benefits	Prevents problems with task performance from recurring or persisting
■ SOCIAL INTERACTION SKILLS —“Occupational performance skills observed during the ongoing stream of a social exchange” (Boyt Schell et al., 2014a, p. 1241).	
Approaches/starts	Approaches or initiates interaction with the social partner in a manner that is socially appropriate
Concludes/disengages	Effectively terminates the conversation or social interaction, brings to closure the topic under discussion, and disengages or says good-bye
Produces speech	Produces spoken, signed, or augmentative (i.e., computer-generated) messages that are audible and clearly articulated
Gesticulates	Uses socially appropriate gestures to communicate or support a message
Speaks fluently	Speaks in a fluent and continuous manner, with an even pace (not too fast, not too slow) and without pauses or delays during the message being sent
Turns toward	Actively positions or turns the body and face toward the social partner or person who is speaking
Looks	Makes eye contact with the social partner
Places self	Positions self at an appropriate distance from the social partner during the social interaction
Touches	Responds to and uses touch or bodily contact with the social partner in a manner that is socially appropriate
Regulates	Does not demonstrate irrelevant, repetitive, or impulsive behaviors that are not part of social interaction
Questions	Requests relevant facts and information and asks questions that support the intended purpose of the social interaction
Replies	Keeps conversation going by replying appropriately to question and comments
Discloses	Reveals opinions, feelings, and private information about self or others in a manner that is socially appropriate
Expresses emotion	Displays affect and emotions in a way that is socially appropriate
Disagrees	Expresses differences of opinion in a socially appropriate manner
Thanks	Uses appropriate words and gestures to acknowledge receipt of services, gifts, or compliments
Transitions	Handles transitions in the conversation smoothly or changes the topic without disrupting the ongoing conversation
Times response	Replies to social messages without delay or hesitation and without interrupting the social partner
Times duration	Speaks for reasonable periods given the complexity of the message sent
Takes turns	Takes his or her turn and gives the social partner the freedom to take his or her turn
Matches language	Uses a tone of voice, dialect, and level of language that are socially appropriate and matched to the social partner’s abilities and level of understanding
Clarifies	Responds to gestures or verbal messages signaling that the social partner does not comprehend or understand a message and ensures that the social partner is following the conversation
Acknowledges and encourages	Acknowledges receipt of messages, encourages the social partner to continue interaction, and encourages all social partners to participate in social interaction
Empathizes	Expresses a supportive attitude toward the social partner by agreeing with, empathizing with, or expressing understanding of the social partner’s feelings and experiences
Heeds	Uses goal-directed social interactions focused on carrying out and completing the intended purpose of the social interaction
Accommodates	Prevents ineffective or socially inappropriate social interaction
Benefits	Prevents problems with ineffective or socially inappropriate social interaction from recurring or persisting

(b)

FIGURE A.3 – Habilités de réalisation prescrites de l’OTPF [Rol⁺14]

Annexe B

Planification optimale des expériences pour l'identification des paramètres

Cette annexe introduit les divers concepts de l'identification des paramètres d'un système et de la planification optimale des expériences, reprenant des éléments formulés précédemment en section 6.1. Cette dernière est une étape préalable à l'identification des paramètres du système modélisé analytiquement : elle est conçue **spécifiquement** pour améliorer la qualité de leur estimation.

B.1 Identification de Paramètres

L'Identification de Paramètres¹ d'un système consiste à estimer les valeurs numériques des paramètres inconnus du modèle à partir des données sélectionnées et mesurées. L'objectif de la méthode d'estimation choisie est de déterminer la valeur des paramètres optimisant un critère d'équivalence qui exprime la concordance entre le modèle paramétré (par les valeurs ci-estimées) et le phénomène observé. Par exemple, nous avons l'estimateur des moindres carrés² utilisant le critère d'équivalence des moindres carrés : en terme d'optimisation, il s'agit d'obtenir les paramètres qui permettent de minimiser la somme des erreurs au carré. La méthode des moindres carrés est une méthode standard de régression –ou d'identification– pour estimer les valeurs numériques des paramètres inconnus d'un système invariant –selon nos considérations– et sur-déterminé : elle ne requiert uniquement que la distribution des erreurs de mesures soit centrée [Fed⁺13].

B.1.1 Modèle analytique pour l'identification des paramètres

Nous définissons que notre système, représentant un phénomène physique, est décrit par un modèle analytique aux erreurs homogènes fondé sur une représentation d'état³ ; cf. équation B.1. Par conséquent, le système est dépendant d'un ensemble de variables : les *paramètres* x à estimer, les *commandes* u éventuellement à mesurer, les *sorties* y à mesurer. Chaque observation k satisfait idéalement l'équation suivante :

$$f(u_k, x, y_k) = 0 \tag{B.1}$$

1 *angl.* parameter identification 2 *angl.* least square estimator (LSE) 3 *angl.* time-invariant state-space model

Nous avons choisi de représenter le système selon les notations utilisées en représentation d'état. Nous dénotons que les *sorties* y sont des observations résultantes d'une réponse du système suite à une stimulation des *commandes* u appliquées en entrée, étant contrôlées ou indépendantes, selon les paramètres d'état x du système.

Or, les variables du modèle parfait décrit en équation B.1 sont sujettes aux incertitudes. Ainsi, chaque variable –*e.g.*– x est caractérisée par sa vraie valeur x^* et son incertitude δx , étant :

$$x = x^* - \delta x \quad (\text{B.2})$$

Ainsi, pour la k -ième observation, notre *modèle de régression* est le suivant :

$$f(u_k^*, x^*, y_k^*) = f(u_k + \delta u_k, x^*, y_k + \delta y_k) = 0 \quad (\text{B.3})$$

B.1.2 Régression des moindres carrés

N'ayant accès aux vrais valeurs des variables, nous avons des erreurs résiduelles à chaque observation k :

$$f(u_k, x, y_k) = \epsilon_k \quad | \quad k \in \{1, \dots, K\} \quad (\text{B.4})$$

Nous définissons que chaque erreur résiduelle ϵ_k est un bruit aléatoire non-corrélé $E(\epsilon_k \epsilon_j) = 0 \quad | \quad k \neq j$, d'espérance mathématique nulle $E(\epsilon_k) = 0$, de variance identique et constante $E(\epsilon_k^2) = \sigma^2$ [Fed+13], étant :

$$E(\epsilon_k) = 0, \quad E(\epsilon_k^2) \equiv \sigma^2, \quad E(\epsilon_k \epsilon_j) = 0 \quad | \quad k \neq j \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (\text{B.5})$$

L'estimateur des moindres carrés impose uniquement une distribution centrée et non-corrélée des erreurs, pouvant nous être inconnue. Cependant, il est nécessaire d'acquérir N observations du système afin d'avoir plus d'informations $N = \sum_{k=1}^K r_k$ que de paramètres inconnus $\text{Dim}(x)$, étant : $N \geq K \geq L = \text{Dim}(x)$; où $r_k \in \mathbb{N}_1$ est le nombre $\text{Dim}(y_k)$ de reproduction des mesures par commande u_k . Le système résultant est usuellement largement sur-déterminé, étant nécessaire pour la qualité de la solution estimée.

L'estimateur des moindres carrés fournit une solution minimisant la somme des erreurs résiduelles au carré, étant :

$$\hat{x} = \underset{x}{\text{ArgMin}} \sum_{k=1}^K f(u_k, x, y_k)^T \cdot f(u_k, x, y_k) \quad (\text{B.6})$$

Quelle que soit la nature du système, l'identification des paramètres nécessite une grande quantité de données réelles afin d'estimer la valeur des paramètres \hat{x} : il s'agit de réaliser des expériences afin de recueillir ces données par mesures capteurs.

B.2 Planification optimale d'expériences

La planification optimale des expériences (ODOE)⁴ consiste à concevoir une expérience contrôlée adressant la collecte de données sujettes aux incertitudes. Ces données acquises détiennent des informations précieuses permettant d'identifier le système et ses paramètres. La collecte ainsi réalisée est optimale selon un critère statistique synthétisant toutes les informations acquises en une unique valeur.

⁴ *angl.* optimal design of experiments

B.2.1 Choix optimal des commandes pour une collecte de mesures riche en informations

Une expérience contrôlée optimalement signifie que nous stimulons le système en contrôlant les commandes appliquées en entrée afin d'optimiser le processus de collecte des données et la qualité des informations acquises. En réalité, chaque donnée au choix n'apporte pas la même qualité informationnelle : certaines données vont permettre une meilleure régression en améliorant sa précision, en étant plus efficace et rapide. Par conséquent, l'intérêt majeur de la planification optimale des expériences est double : améliorer la qualité et la rapidité de l'identification des paramètres. Nous guidons la collecte judicieusement en sélectionnant les données à la qualité informationnelle riche permettant ainsi d'atteindre voire de converger plus rapidement vers cette estimation précise.

Par expérience, nous dénotons l'ensemble des N observations, étant chaque commandes u_k et chaque sortie y_k . L'ensemble noté ξ_N est appelé *conception d'expérience* : il contient toutes les commandes à appliquer lors de l'expérience, nommément des points de la conception (*angl.* design points) u_k , et leur nombre de reproduction r_k ; *cf.* équation B.7 [Fed⁺13]. Nous dénotons qu'une conception d'expérience ξ_N appliquée conduit à différentes réalisations soit différents résultats d'expérience, compte-tenu de la nature aléatoire de l'incertitude. Par nature, la conception d'expérience ξ_N est une collection indépendante de toutes réalisations/observations.

$$\xi_N = \left\{ \begin{matrix} u_1, \dots, u_K \\ r_1, \dots, r_K \end{matrix} \right\} = \{ u_k, r_k \}_1^K \quad | \quad N = \sum_{k=1}^K r_k \quad (\text{B.7})$$

Étant donné que le processus de collecte influence en aval le processus d'identification et la qualité de l'estimation des paramètres, le critère statistique est fondé sur le modèle de régression et sur les observations. Concrètement, le modèle de régression décrit la relation entre les paramètres estimés et les informations contenues dans les paramètres réels, synthétisée sous une forme matricielle usuellement. En étudiant le modèle de régression –représentant l'estimateur–, nous souhaitons qualifier c'est-à-dire quantifier les informations à disposition de l'estimateur afin que les paramètres estimés soient **proches** et **non-dispersés** de leur valeurs réelles et inconnues, adressant l'approximation de l'incertitude des paramètres δx . Traditionnellement, les informations sur l'incertitude des paramètres sont synthétisées sous forme matricielle au sein d'une matrice dite d'information, correspondant à l'inverse de la matrice de dispersion qualifiant "*l'incertitude*" des paramètres estimés.

B.2.2 Matrice d'information et matrice de dispersion

La matrice d'information de la conception ξ_N est une matrice rassemblant toutes les informations nécessaires sur la précision des données de la conception d'expérience ξ_N , notée $\mathbf{M}(\xi_N)$. Cette matrice est symétrique définie positive et additive : elle est définie étant la somme des matrices d'informations de chaque observation k . Ainsi, chaque observation indépendante supplémentaire (ajoutée) augmente la matrice de nouvelles informations (quantité). La matrice d'information est déterminée par la conception ξ_N , mais elle ne dépend pas des sorties captées y . Par ailleurs, pour les modèles linéaires, la matrice d'information ne dépend pas des paramètres x . De plus, elle est définie étant l'inverse de la matrice de dispersion $\mathbf{D}(\xi_N)$: cette matrice \mathbf{D} rassemble l'incertitude soit la variance, notée σ_{x_l} , associée à chaque paramètre x_l . L'existence de la matrice de dispersion $\mathbf{D}(\xi_N)$ implique que la conception ξ_N est *suffisante* pour l'estimation des paramètres x [Fed⁺13].

Ainsi, nous avons [Fed⁺13] pour l'estimateur des moindres carrés :

$$\mathbf{M}(\xi_N, x) = \sigma^{-2} \cdot \sum_{k=1}^K r_k \frac{\partial g(u_k, x)}{\partial x} \frac{\partial g(u_k, x)}{\partial x}^T \quad (\text{B.8})$$

$$\text{Var}[x_N] = \mathbf{D}(\xi_N, x) \cong \mathbf{M}(\xi_N, x)^{-1} \quad (\text{B.9})$$

où x est assez proche de x^* , et $f(u, x, y) = y - g(u, x)$.

À partir du modèle de régression et des observations, nous pouvons définir la matrice d'information $\mathbf{M}(\xi_N)$ par le produit matriciel suivant [Tor84] :

$$\mathbf{M}(\xi_N, x) = \mathbf{G}_x \Sigma^{-1} \mathbf{G}_x^T \quad (\text{B.10})$$

où \mathbf{G}_x est la matrice Jacobienne des paramètres x calculée pour la fonction $g(u, x) = y$, calculée au voisinage de x^* en \hat{x} , étant pour $r_k = 1$:

$$\mathbf{G}_x : \mathbf{G}_x[\hat{x}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial g(u_1, x)}{\partial x_1} \Big|_{x=\hat{x}} & \cdots & \frac{\partial g(u_1, x)}{\partial x_L} \Big|_{x=\hat{x}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g(u_N, x)}{\partial x_1} \Big|_{x=\hat{x}} & \cdots & \frac{\partial g(u_N, x)}{\partial x_L} \Big|_{x=\hat{x}} \end{bmatrix}^T \quad (\text{B.11})$$

où, Σ est la matrice de variance de l'erreur de mesure/observation ϵ :

$$\Sigma = \text{Var}[\epsilon] = \mathbf{E} \left[(\epsilon - \mathbf{E}[\epsilon]) (\epsilon - \mathbf{E}[\epsilon])^T \right] \quad (\text{B.12})$$

soit pour nos erreurs non-corrélées et identiques, *cf.* équation B.5 :

$$\Sigma = \sigma^2 \cdot I_L \quad (\text{B.13})$$

B.3 Critères d'Optimalité et Indices d'Observabilité

Idéalement à dessein de conception optimale, nous souhaiterions déterminer la conception ξ_N minimisant l'incertitude des paramètres, soit déterminer la conception ξ_N en "maximisant" la matrice d'information \mathbf{M} soit en minimisant la matrice de dispersion \mathbf{D} contenant L variances. Il s'agit d'un problème multi-objectifs (MO), où chaque variance σ_{x_l} –associée au paramètre x_l – est une fonction objectif à optimiser. La solution à ce problème optimisation n'existe pas, même pour des modèles simples linéaires [Fed⁺13]. Ainsi, nous devons utiliser des objectifs d'optimisation plus modestes en considérant le problème d'optimisation suivant [Fed⁺13] :

$$\hat{\xi}_N = \underset{\xi_N}{\text{ArgMax}} \Psi[\mathbf{M}(\xi_N)] = \underset{\xi_N}{\text{ArgMin}} \Psi[\mathbf{D}(\xi_N)] \quad (\text{B.14})$$

où Ψ est une fonction scalaire appelée critère d'Optimalité.

Ce critère statistique d'Optimalité Ψ synthétise toutes les informations captées en une unique valeur, en combinant judicieusement les informations sur la variance des paramètres. Ainsi, la qualité informationnelle des observations est exprimée au travers d'un critère statistique d'Optimalité Ψ , déterminé numériquement à partir de la matrice d'information.

Dans la littérature, ces critères Ψ sont largement étudiés en Statistique pour la planification optimale des expériences –appelés critères d'Optimalité– et en Robotique pour la Calibration –appelés indices d'Observabilité–. La plupart de ces critères sont équivalents, étant simplement définis selon des approches différentes. En planification, la qualité informationnelle de l'expérience

est quantifiée en étudiant la matrice de dispersion \mathbf{D} –ou son équivalent inverse la matrice d'information \mathbf{M} – [Fed⁺13]. Les critères d'Optimalité sont définissables à partir des valeurs propres λ_l de la matrice de dispersion \mathbf{D} [Fed⁺13]. En Robotique, la qualité informationnelle de la calibration –*i.e.* la conception– est quantifiée en étudiant la matrice de régression notée \mathbf{A} [Hol⁺08], où en non-linéaire selon les écoles $\mathbf{A} = \mathbf{G}_x$ [Hol⁺08] ou $\mathbf{A} = \mathbf{J}_x$ [Gay13] tel que $\mathbf{J}_{x[k,l]} = \partial f(u_k, x) / \partial x_l$. Les indices d'Observabilité notés O sont définis à partir des valeurs singulières μ_l issues de la décomposition en valeur singulière (SVD) de la matrice \mathbf{A} [Hol⁺08]. Un avantage de ces indices est de pouvoir les calculer numériquement de manière précise et rapide directement à partir de la matrice \mathbf{A} , se passant du calcul de $\mathbf{A}\mathbf{A}^T$. En Robotique, le problème d'optimisation considéré est ainsi le suivant :

$$\hat{\xi}_N = \underset{\xi_N}{\text{ArgMax}} O[\mathbf{A}(\xi_N)] \quad (\text{B.15})$$

Nous dénotons un fort attrait dans les domaines pour le *D-critère*, et l'indice O_1 son équivalent en Robotique ; *cf.* équation 6.12. Sun et Hollerbach [Sun⁺08] affirment que l'indice O_1 –ou D-critère– est le meilleur critère pour minimiser la variance de tous les paramètres et estimer les paramètres d'un modèle non-proportionné⁵ ou mal-proportionné, voire un modèle dont l'approche de mise-à-l'échelle⁶ n'est pas convaincante. Fedorov et Leonov [Fed⁺13] déclarent que les conceptions D-optimales – O_1 – sont les plus populaires au sein des recherches théoriques et pratiques en planification optimale des expériences : de telles conceptions sont invariantes respectivement aux transformations sur les paramètres (*i.e.* mise-à-l'échelle) et sont attractives en pratique grâce à leur bonnes performances, en comparaison des autres critères d'optimalité. De plus, Joubair et al. [Jou⁺16] démontrent, en comparant les cinq principaux indices d'observabilité pour quatre différents modèles de robots, que l'indice O_1 est le plus approprié pour la calibration améliorant le plus efficacement la précision des modèles robotiques (*i.e.* δy).

Cependant, l'inconvénient de la matrice d'information \mathbf{M} en planification optimale des expériences est de devoir nécessairement formaliser le modèle sous une forme particulière (*i.e.* $y = g(u, x)$) étant difficilement malléable voire dérivable ; utilisée notamment par [Hol⁺08][Bis⁺10][Fed⁺13]. Alternativement, l'écueil d'utiliser la matrice de régression \mathbf{A} en Robotique est d'oublier que la Jacobienne d'identification \mathbf{G}_x n'est pas la Jacobienne des paramètres \mathbf{J}_x ; utilisée notamment par [Gay13]. De plus, ces méthodologies ne considèrent pas toutes les sources d'incertitudes du système, se cantonnant, au mieux, des incertitudes des paramètres et des observations (*i.e.* $\mathbf{G}_x \mid \mathbf{G}_x = \mathbf{J}_y^+ \cdot \mathbf{J}_x$), et, au pire, seulement des incertitudes des paramètres (*i.e.* \mathbf{J}_x).

5 *angl.* unscaled model 6 *angl.* scaling approach

Annexe C

Matrice d'incertitude

Cette annexe présente des développements analytiques des matrices d'incertitude \mathbf{U} voire leur déterminants $\text{Det}(\mathbf{U})$ des capteurs usuels considérés en section 6.2.3. Dans le cas de la matrice d'information \mathbf{M} où l'incertitude des commandes négligeables, ces développements permettent de démontrer que notre matrice d'incertitude équivaut à la matrice d'information.

C.1 Capteur d'angle

Pour nos développements, nous utilisons les équations 6.25, 6.26 et 6.27 des Jacobiennes en section 6.2.3.1.

C.1.1 Incertitude des commandes négligeables

$$\begin{aligned} \mathbf{U}\mathbf{U}^T &= \begin{bmatrix} -\rho_1^{*-1} \sin \theta_1^* & -\rho_2^{*-1} \sin \theta_2^* & \dots & -\rho_N^{*-1} \sin \theta_N^* \\ \rho_1^{*-1} \cos \theta_1^* & \rho_2^{*-1} \cos \theta_2^* & \dots & \rho_N^{*-1} \cos \theta_N^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\rho_1^{*-1} \sin \theta_1^* & \rho_1^{*-1} \cos \theta_1^* \\ -\rho_2^{*-1} \sin \theta_2^* & \rho_2^{*-1} \cos \theta_2^* \\ \vdots & \vdots \\ -\rho_N^{*-1} \sin \theta_N^* & \rho_N^{*-1} \cos \theta_N^* \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \rho_1^{*-2} \sin^2 \theta_1^* + \dots + \rho_N^{*-2} \sin^2 \theta_N^* & \rho_1^{*-2} \cos \theta_1^* \sin \theta_1^* + \dots + \rho_N^{*-2} \cos \theta_N^* \sin \theta_N^* \\ \rho_1^{*-2} \cos \theta_1^* \sin \theta_1^* + \dots + \rho_N^{*-2} \cos \theta_N^* \sin \theta_N^* & \rho_1^{*-2} \cos^2 \theta_1^* + \dots + \rho_N^{*-2} \cos^2 \theta_N^* \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2} \sin^2 \theta_k^* & \sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \\ \sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* & \sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2} \cos^2 \theta_k^* \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{C.1}$$

$$\begin{aligned}
\text{Det}(\mathbf{UU}^T) &= \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2} \sin^2 \theta_k^* \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2} \cos^2 \theta_k^* \right) - \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right)^2 \\
&= \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*-4} \cos^2 \theta_k^* \sin^2 \theta_k^* + \left(\sum_{(l=1)(l \neq k)}^N \rho_k^{*-2} \rho_l^{*-2} \cos^2 \theta_k^* \sin^2 \theta_l^* \right) \right) \\
&\quad - \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*-4} \cos^2 \theta_k^* \sin^2 \theta_k^* + \left(\sum_{(l=1)(l \neq k)}^N \rho_k^{*-2} \rho_l^{*-2} \cos \theta_k^* \cos \theta_l^* \sin \theta_k^* \sin \theta_l^* \right) \right) \\
&= \sum_{k=1}^N \sum_{(l=1)(l \neq k)}^N \rho_k^{*-2} \rho_l^{*-2} (\cos^2 \theta_k^* \sin^2 \theta_l^* - \cos \theta_k^* \cos \theta_l^* \sin \theta_k^* \sin \theta_l^*) \\
&= \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \rho_k^{*-2} \rho_l^{*-2} (\cos^2 \theta_l^* \sin^2 \theta_k^* - 2 \cdot \cos \theta_k^* \cos \theta_l^* \sin \theta_k^* \sin \theta_l^* + \cos^2 \theta_k^* \sin^2 \theta_l^*) \\
&= \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \left(\rho_k^{*-1} \rho_l^{*-1} (\cos \theta_k^* \sin \theta_l^* - \cos \theta_l^* \sin \theta_k^*) \right)^2 \\
&= \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \left(\rho_k^{*-1} \rho_l^{*-1} \sin (\theta_l^* - \theta_k^*) \right)^2
\end{aligned} \tag{C.2}$$

C.1.2 Modèle parfait

$$\begin{aligned}
J_x^T[x^*] \cdot J_x[x^*] &= \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* & \sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \\ \sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* & \sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \end{bmatrix} \\
\left(J_x^T[x^*] \cdot J_x[x^*] \right)^{-1} &= \text{Det}^{-1} \left(J_x^T[x^*] \cdot J_x[x^*] \right) \cdot \text{Adj} \left(J_x^T[x^*] \cdot J_x[x^*] \right) \\
&= \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \sin^2 (\theta_l^* - \theta_k^*) \right)^{-1} \cdot \\
&\quad \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* & \sum_{k=1}^N -\cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \\ \sum_{k=1}^N -\cos \theta_k^* \sin \theta_k^* & \sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \end{bmatrix} \\
J_x^+ &= \left(J_x^T[x^*] \cdot J_x[x^*] \right)^{-1} \cdot J_x^T[x^*] \\
&= \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \sin^2 (\theta_l^* - \theta_k^*) \right)^{-1} \cdot \\
&\quad \left[\begin{array}{cc} \left(\begin{array}{c} \sin \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) \\ + \cos \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \end{array} \right) & \left(\begin{array}{c} -\sin \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ -\cos \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \end{array} \right) \\ \vdots & \vdots \\ \left(\begin{array}{c} \sin \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) \\ + \cos \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \end{array} \right) & \left(\begin{array}{c} -\sin \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ -\cos \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \end{array} \right) \end{array} \right]^T
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{U} = & -J_x^+[x^*] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1[u_1^*, y_1^*] & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{u}_1[u_N^*, y_N^*] \end{bmatrix} = - \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \sin^2(\theta_l^* - \theta_k^*) \right)^{-1} \cdot \\
& \left[\begin{array}{cc} \left(\begin{array}{c} \sin^2 \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) \\ + \sin \theta_1^* \cos \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \end{array} \right) & \left(\begin{array}{c} -\sin^2 \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ -\sin \theta_1^* \cos \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} -\cos \theta_1^* \sin \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) \\ -\cos^2 \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \end{array} \right) & \left(\begin{array}{c} \cos \theta_1^* \sin \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ + \cos^2 \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} -\rho_1^* \sin \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) \\ -\rho_1^* \cos \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \end{array} \right) & \left(\begin{array}{c} \rho_1^* \sin \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ + \rho_1^* \cos \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \end{array} \right) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \left(\begin{array}{c} \sin^2 \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) \\ + \sin \theta_N^* \cos \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \end{array} \right) & \left(\begin{array}{c} -\sin^2 \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ -\sin \theta_N^* \cos \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} -\cos \theta_N^* \sin \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) \\ -\cos^2 \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \end{array} \right) & \left(\begin{array}{c} \cos \theta_N^* \sin \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ + \cos^2 \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} -\rho_N^* \sin \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) \\ -\rho_N^* \cos \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \end{array} \right) & \left(\begin{array}{c} \rho_N^* \sin \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ + \rho_N^* \cos \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \end{array} \right) \end{array} \right]^T \quad (\text{C.3})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{U}\mathbf{U}^T = & \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \sin^2(\theta_l^* - \theta_k^*) \right)^{-2} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 & \mathbf{w}_3 \\ \mathbf{w}_3 & \mathbf{w}_2 \end{bmatrix} \\
\mathbf{w}_1 = & \sum_{l=1}^N \left(\begin{array}{c} \left[\sin^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) + \sin \theta_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right]^2 \\ - \left[\cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) + \cos^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right]^2 \\ - \left[\rho_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) + \rho_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right]^2 \end{array} \right) \\
\mathbf{w}_3 = & \sum_{l=1}^N \left(\begin{array}{c} \left[\sin^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) + \sin \theta_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right] \\ \times \left[-\sin^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) - \sin \theta_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \right] \\ - \left[\cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) + \cos^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right] \\ \times \left[\cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) + \cos^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \right] \\ - \left[\rho_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos^2 \theta_k^* \right) + \rho_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \right] \\ \times \left[\rho_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) + \rho_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \right] \end{array} \right) \quad (\text{C.4}) \\
\mathbf{w}_2 = & \sum_{l=1}^N \left(\begin{array}{c} \left[-\sin^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) - \sin \theta_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \right]^2 \\ + \left[\cos \theta_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) + \cos^2 \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \right]^2 \\ + \left[\rho_l^* \sin \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) + \rho_l^* \cos \theta_l^* \left(\sum_{k=1}^N \sin^2 \theta_k^* \right) \right]^2 \end{array} \right)
\end{aligned}$$

C.2 Capteur de distance

Pour nos développements, nous utilisons les équations 6.35, 6.36 et 6.37 des jacobiennes en section 6.2.3.2.

C.2.1 Incertitude des commandes négligeables

$$\begin{aligned}
\mathbf{U}\mathbf{U}^T &= \begin{bmatrix} \rho_1^{*-1}\delta x_1^* & \rho_2^{*-1}\delta x_2^* & \dots & \rho_N^{*-1}\delta x_N^* \\ \rho_1^{*-1}\delta y_1^* & \rho_2^{*-1}\delta y_2^* & \dots & \rho_N^{*-1}\delta y_N^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \rho_1^{*-1}\delta x_1^* & \rho_1^{*-1}\delta y_1^* \\ \rho_2^{*-1}\delta x_2^* & \rho_2^{*-1}\delta y_2^* \\ \vdots & \vdots \\ \rho_N^{*-1}\delta x_N^* & \rho_N^{*-1}\delta y_N^* \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \rho_1^{*-2}\delta x_1^{*2} + \dots + \rho_N^{*-2}\delta x_N^{*2} & \rho_1^{*-2}\delta x_1^* \delta y_1^* + \dots + \rho_N^{*-2}\delta x_N^* \delta y_N^* \\ \rho_1^{*-2}\delta x_1^* \delta y_1^* + \dots + \rho_N^{*-2}\delta x_N^* \delta y_N^* & \rho_1^{*-2}\delta y_1^{*2} + \dots + \rho_N^{*-2}\delta y_N^{*2} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2}\delta x_k^{*2} & \sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2}\delta x_k^* \delta y_k^* \\ \sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2}\delta x_k^* \delta y_k^* & \sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2}\delta y_k^{*2} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{C.5}$$

$$\begin{aligned}
\text{Det}(\mathbf{U}\mathbf{U}^T) &= \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2}\delta x_k^{*2} \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2}\delta y_k^{*2} \right) - \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*-2}\delta x_k^* \delta y_k^* \right)^2 \\
&= \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*-4}\delta x_k^{*2}\delta y_k^{*2} + \left(\sum_{(l=1)(l \neq k)}^N \rho_k^{*-2}\rho_l^{*-2}\delta x_k^{*2}\delta y_l^{*2} \right) \right) \\
&\quad - \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*-4}\delta x_k^{*2}\delta y_k^{*2} + \left(\sum_{(l=1)(l \neq k)}^N \rho_k^{*-2}\rho_l^{*-2}\delta x_k^*\delta x_l^*\delta y_k^*\delta y_l^* \right) \right) \\
&= \sum_{k=1}^N \sum_{(l=1)(l \neq k)}^N \rho_k^{*-2}\rho_l^{*-2} \left(\delta x_k^{*2}\delta x_l^{*2} - \delta x_k^*\delta x_l^*\delta y_k^*\delta y_l^* \right) \\
&= \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \rho_k^{*-2}\rho_l^{*-2} \left(\delta x_k^{*2}\delta y_l^{*2} - 2 \cdot \delta x_k^*\delta x_l^*\delta y_k^*\delta y_l^* + \delta x_l^{*2}\delta y_k^{*2} \right) \\
&= \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \left(\rho_k^{*-1}\rho_l^{*-1} (\delta x_k^*\delta y_l^* - \delta x_l^*\delta y_k^*) \right)^2 \\
&= \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \left(\rho_k^{*-1}\rho_l^{*-1}\rho_k^*\rho_l^* (\cos\theta_k^* \sin\theta_l^* - \sin\theta_k^* \cos\theta_l^*) \right)^2 \\
&= \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \sin^2(\theta_l^* - \theta_k^*)
\end{aligned} \tag{C.6}$$

C.2.2 Modèle parfait

$$\begin{aligned}
J_x^T[x^*] \cdot J_x[x^*] &= \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* & \sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \\ \sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* & \sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \sin^2 \theta_k^* \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N \delta x_k^{*2} & \sum_{k=1}^N \delta x_k^* \delta y_k^* \\ \sum_{k=1}^N \delta x_k^* \delta y_k^* & \sum_{k=1}^N \delta y_k^{*2} \end{bmatrix} \\
\left(J_x^T[x^*] \cdot J_x[x^*] \right)^{-1} &= \text{Det}^{-1} \left(J_x^T[x^*] \cdot J_x[x^*] \right) \cdot \text{Adj} \left(J_x^T[x^*] \cdot J_x[x^*] \right) \\
&= \text{Det}^{-1} \left(J_x^T[x^*] \cdot J_x[x^*] \right) \\
&\quad \cdot \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \sin^2 \theta_k^* & \sum_{k=1}^N -\rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \\ \sum_{k=1}^N -\rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* & \sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \end{bmatrix} \\
&= \text{Det}^{-1} \left(J_x^T[x^*] \cdot J_x[x^*] \right) \cdot \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N \delta y_k^{*2} & \sum_{k=1}^N -\delta x_k^* \delta y_k^* \\ \sum_{k=1}^N -\delta x_k^* \delta y_k^* & \sum_{k=1}^N \delta x_k^{*2} \end{bmatrix} \\
\text{Det} \left(J_x^T[x^*] \cdot J_x[x^*] \right) &= \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^{*2} \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^N \delta y_k^{*2} \right) - \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^* \delta y_k^* \right)^2 \\
&= \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^{*2} \delta y_k^{*2} + \left(\sum_{(l=1)(l \neq k)}^N \delta x_k^* \delta y_l^{*2} \right) \right) \\
&\quad - \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^{*2} \delta y_k^{*2} + \left(\sum_{(l=1)(l \neq k)}^N \delta x_k^* \delta y_l^* \delta x_l^* \delta y_l^* \right) \right) \\
&= \sum_{k=1}^N \sum_{(l=1)(l \neq k)}^N \delta x_k^{*2} \delta y_l^{*2} - \delta x_k^* \delta y_k^* \delta x_l^* \delta y_l^* \\
&= \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N \delta x_k^{*2} \delta y_l^{*2} - 2 \cdot \delta x_k^* \delta y_k^* \delta x_l^* \delta y_l^* + \delta x_l^{*2} \delta y_k^{*2} \\
&= \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N (\delta x_k^* \delta y_l^* - \delta x_l^* \delta y_k^*)^2 \\
&= \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N (\rho_k^* \rho_l^* \sin(\theta_l^* - \theta_k^*))^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_x^+[x^*] &= \left(J_x^T[x^*] \cdot J_x[x^*] \right)^{-1} \cdot J_x^T[x^*] \\
&= \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N (\rho_k^* \rho_l^* \sin(\theta_l^* - \theta_k^*))^2 \right)^{-1} \cdot \\
&\quad \left[\begin{array}{cc} \left(\begin{array}{c} \rho_1^* \cos \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \sin^2 \theta_k^* \right) \\ -\rho_1^* \sin \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ \vdots \\ \rho_N^* \cos \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \right) \\ -\rho_N^* \sin \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \end{array} \right) & \left(\begin{array}{c} -\rho_1^* \cos \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ +\rho_1^* \sin \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \right) \\ \vdots \\ -\rho_N^* \cos \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ +\rho_N^* \sin \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \right) \end{array} \right) \\ \vdots & \vdots \end{array} \right]^T \\
&= \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N (\delta x_k^* \delta y_l^* - \delta x_l^* \delta y_k^*)^2 \right)^{-1} \cdot \\
&\quad \left[\begin{array}{cc} \left(\begin{array}{c} \delta x_1^* \left(\sum_{k=1}^N \delta y_k^{*2} \right) \\ -\delta y_1^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^* \delta y_k^* \right) \\ \vdots \\ \delta x_N^* \left(\sum_{k=1}^N \delta y_k^{*2} \right) \\ -\delta y_N^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^* \delta y_k^* \right) \end{array} \right) & \left(\begin{array}{c} -\delta x_1^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^* \delta y_k^* \right) \\ +\delta y_1^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^{*2} \right) \\ \vdots \\ -\delta x_N^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^* \delta y_k^* \right) \\ +\delta y_N^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^{*2} \right) \end{array} \right) \\ \vdots & \vdots \end{array} \right]^T
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{U}\mathbf{U}^T &= \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N (\rho_k^* \rho_l^* \sin(\theta_l^* - \theta_k^*))^2 \right)^{-1}. \\
&\left[\begin{array}{cc}
\begin{pmatrix} \rho_1^{*2} \cos^2 \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \sin^2 \theta_k^* \right) \\ -\rho_1^{*2} \cos \theta_1^* \sin \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ \rho_1^{*2} \cos \theta_1^* \sin \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \sin^2 \theta_k^* \right) \\ -\rho_1^{*2} \sin^2 \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ \rho_1^* \rho_1^* \cos \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \sin^2 \theta_k^* \right) \\ -\rho_1^* \rho_1^* \sin \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ \vdots \\ \rho_N^{*2} \cos^2 \theta_N \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \sin^2 \theta_k^* \right) \\ -\rho_N^{*2} \cos \theta_N^* \sin \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ \rho_N^{*2} \cos \theta_N^* \sin \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \sin^2 \theta_k^* \right) \\ -\rho_N^{*2} \sin^2 \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ \rho_N^* \rho_N^* \cos \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \sin^2 \theta_k^* \right) \\ -\rho_N^* \rho_N^* \sin \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -\rho_1^{*2} \cos^2 \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ +\rho_1^{*2} \cos \theta_1^* \sin \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \right) \\ -\rho_1^{*2} \cos \theta_1^* \sin \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ +\rho_1^{*2} \sin^2 \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \right) \\ -\rho_1^* \rho_1^* \cos \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k \sin \theta_k \right) \\ +\rho_1^* \rho_1^* \sin \theta_1^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \right) \\ \vdots \\ -\rho_N^{*2} \cos^2 \theta_N \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ +\rho_N^{*2} \cos \theta_N^* \sin \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \right) \\ -\rho_N^{*2} \cos \theta_N^* \sin \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ +\rho_N^{*2} \sin^2 \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \right) \\ -\rho_N^* \rho_N^* \cos \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos \theta_k^* \sin \theta_k^* \right) \\ +\rho_N^* \rho_N^* \sin \theta_N^* \left(\sum_{k=1}^N \rho_k^{*2} \cos^2 \theta_k^* \right) \end{pmatrix} \\
\end{array} \right]^T \\
&= \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=k+1}^N (\delta x_k^* \delta y_l^* - \delta x_l^* \delta y_k^*)^2 \right)^{-1}. \\
&\left[\begin{array}{cc}
\begin{pmatrix} \delta x_1^{*2} \left(\sum_{k=1}^N \delta y_k^{*2} \right) \\ -\delta x_1^* \delta y_1^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^* \delta x_k^* \right) \\ \delta x_1^* \delta y_1^* \left(\sum_{k=1}^N \delta y_k^{*2} \right) \\ -\delta y_1^{*2} \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^* \delta x_k^* \right) \\ \rho_1^* \delta x_1^* \left(\sum_{k=1}^N \delta y_k^{*2} \right) \\ -\rho_1^* \delta y_1^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^* \delta x_k^* \right) \\ \vdots \\ \delta x_N^{*2} \left(\sum_{k=1}^N \delta y_k^{*2} \right) \\ -\delta x_N^* \delta y_N^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^* \delta x_k^* \right) \\ \delta x_N^* \delta y_N^* \left(\sum_{k=1}^N \delta y_k^{*2} \right) \\ -\delta y_N^{*2} \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^* \delta x_k^* \right) \\ \rho_N^* \delta x_N^* \left(\sum_{k=1}^N \delta y_k^{*2} \right) \\ -\rho_N^* \delta y_N^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_k^* \delta x_k^* \right) \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -\delta x_1^{*2} \left(\sum_{k=1}^N \delta x_1^* \delta y_1^* \right) \\ +\delta x_1^* \delta y_1^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_1^{*2} \right) \\ -\delta x_1^* \delta y_1^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_1^* \delta y_1^* \right) \\ +\delta y_1^{*2} \left(\sum_{k=1}^N \delta x_1^{*2} \right) \\ -\rho_1^* \delta x_1^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_1^* \delta y_1^* \right) \\ +\rho_1^* \delta y_1^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_1^{*2} \right) \\ \vdots \\ -\delta x_N^{*2} \left(\sum_{k=1}^N \delta x_1^* \delta y_1^* \right) \\ +\delta x_N^* \delta y_N^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_1^{*2} \right) \\ -\delta x_N^* \delta y_N^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_1^* \delta y_1^* \right) \\ +\delta y_N^{*2} \left(\sum_{k=1}^N \delta x_1^{*2} \right) \\ -\rho_N^* \delta x_N^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_1^* \delta y_1^* \right) \\ +\rho_N^* \delta y_N^* \left(\sum_{k=1}^N \delta x_1^{*2} \right) \end{pmatrix} \\
\end{array} \right]^T \tag{C.7}
\end{aligned}$$

Bibliographie

- [Akb⁺13] V. Akbarzadeh, C. Gagne, M. Parizeau, M. Argany et M.A. Mostafavi. Probabilistic Sensing Model for Sensor Placement Optimization Based on Line-of-Sight Coverage. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(2) :293-303, février 2013. ISSN : 0018-9456. DOI : [10.1109/TIM.2012.2214952](https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2214952).
- [Aug09] Juan Carlos Augusto. Past, present and future of ambient intelligence and smart environments. In *International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, Pages 3-15. Springer, 2009. URL : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-11819-7_1 (visité le 17/07/2017).
- [Azg⁺15] M. V. Azghandi, I. Nikolaidis et E. Stroulia. Sensor placement for indoor multi-occupant tracking. In *2015 6th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA)*, Pages 1-8, juillet 2015. DOI : [10.1109/IISA.2015.7388030](https://doi.org/10.1109/IISA.2015.7388030).
- [Azk⁺15] Gorka Azkune, Aitor Almeida, Diego López-de-Ipiña et Liming Chen. Extending knowledge-driven activity models through data-driven learning techniques. *Expert Systems with Applications*, 42(6) :3115-3128, avril 2015. ISSN : 0957-4174. DOI : [10.1016/j.eswa.2014.11.063](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.063). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417414007623> (visité le 19/07/2017).
- [Ber⁺08] M Berenguer, M Giordani, F Giraud-By et N Noury. Automatic detection of activities of daily living from detecting and classifying electrical events on the residential power line. In *e-health Networking, Applications and Services, 2008. HealthCom 2008. 10th International Conference on*, Pages 29-32. IEEE, 2008.
- [Bet⁺14] Houari Bettahar, Yacine Morsly et Mohand Said Djouadi. Optimal camera placement based resolution requirements for surveillance applications. In *2014 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, tome 01, Pages 252-258, septembre 2014.
- [Bis⁺10] Adrian N. Bishop, Barış Fidan, Brian D. O. Anderson, Kutluyıl Doğançay et Pubudu N. Pathirana. Optimality analysis of sensor-target localization geometries. *Automatica*, 46(3) :479-492, mars 2010. ISSN : 0005-1098. DOI : [10.1016/j.automatica.2009.12.003](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2009.12.003).
- [Bla⁺13] Angela Blanco-Fernández, Ana Colubi et Marta García-Bárzana. A set arithmetic-based linear regression model for modelling interval-valued responses through real-valued variables. *Information Sciences*, 247(Supplement C) :109-122, octobre 2013. ISSN : 0020-0255. DOI : [10.1016/j.ins.2013.06.044](https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.06.044). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025513004817> (visité le 27/10/2017).
- [Bla⁺16] Nathalie Blanpain et Guillemette Buisson. Projections de population à l'horizon 2070. Deux fois plus de personnes de 75 ans ou plus qu'en 2013, novembre 2016. URL : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2496228> (visité le 10/07/2017).

- [Bog07] Vladimir I. Bogachev. *Measure Theory*, tome 1. Springer Science & Business Media, 2007. URL : <http://www.springer.com/us/book/9783540345138> (visité le 22/08/2017).
- [Cai⁺05] Kelly E. Caine, Wendy A. Rogers et Arthur D. Fisk. Privacy Perceptions of an Aware Home with Visual Sensing Devices. en. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 49(21) :1856-1858, septembre 2005. ISSN : 1541-9312, DOI : [10.1177/154193120504902108](https://doi.org/10.1177/154193120504902108). URL : <http://pro.sagepub.com/content/49/21/1856> (visité le 02/05/2016).
- [Car⁺14] Loïc Caroux, Charles Consel, Lucile Dupuy et Hélène Sauzéon. Verification of daily activities of older adults: a simple, non-intrusive, low-cost approach. en. In Pages 43-50. ACM Press, 2014. ISBN : 978-1-4503-2720-6. DOI : [10.1145/2661334.2661360](https://doi.org/10.1145/2661334.2661360). URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2661334.2661360> (visité le 19/03/2015).
- [Car⁺16] Adrien Carteron, Charles Consel et Nic Volanschi. Improving the Reliability of Pervasive Computing Applications By Continuous Checking of Sensor Readings. en. In juillet 2016. URL : <https://hal.inria.fr/hal-01319059/document> (visité le 30/11/2016).
- [Cha⁺08] Marie Chan, Daniel Estève, Christophe Escriba et Eric Campo. A review of smart homes—Present state and future challenges. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 91(1) :55-81, juillet 2008. ISSN : 0169-2607. DOI : [10.1016/j.cmpb.2008.02.001](https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2008.02.001). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169260708000436> (visité le 17/02/2016).
- [Cha⁺09] Marie Chan, Eric Campo, Daniel Estève et Jean-Yves Fourniols. Smart homes — Current features and future perspectives. *Maturitas*, 64(2) :90-97, octobre 2009. ISSN : 0378-5122. DOI : [10.1016/j.maturitas.2009.07.014](https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2009.07.014). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378512209002606> (visité le 08/12/2015).
- [Cha02] F Chapireau. La nouvelle classification de l’OMS : Classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé. *Annales Médico-psychologiques, revue psychiatrique*, 160(3) :242-246, mars 2002. ISSN : 0003-4487. DOI : [10.1016/S0003-4487\(02\)00166-X](https://doi.org/10.1016/S0003-4487(02)00166-X). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000344870200166X> (visité le 15/06/2017).
- [Che⁺12] L. Chen, J. Hoey, C. D. Nugent, D. J. Cook et Z. Yu. Sensor-Based Activity Recognition. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 42(6) :790-808, novembre 2012. ISSN : 1094-6977. DOI : [10.1109/TSMCC.2012.2198883](https://doi.org/10.1109/TSMCC.2012.2198883).
- [Che⁺13] Badong Chen, Yu Zhu, Jinchun Hu et Jose C. Principe. *System Parameter Identification: Information Criteria and Algorithms*. en. Newnes, juillet 2013. ISBN : 978-0-12-404595-8.
- [Chi⁺11] B. Chikhaoui, S. Wang et H. Pigot. A Frequent Pattern Mining Approach for ADLs Recognition in Smart Environments. In *2011 IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, Pages 248-255, mars 2011. DOI : [10.1109/AINA.2011.13](https://doi.org/10.1109/AINA.2011.13).
- [Chi⁺17] Y. T. Chiang, C. H. Lu et J. Y. J. Hsu. A Feature-Based Knowledge Transfer Framework for Cross-Environment Activity Recognition Toward Smart Home Applications. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 47(3) :310-322, juin 2017. ISSN : 2168-2291. DOI : [10.1109/THMS.2016.2641679](https://doi.org/10.1109/THMS.2016.2641679).

- [Chr⁺14] Dimitrios Chrysostomou, Georgios Ch. Sirakoulis et Antonios Gasteratos. A bio-inspired multi-camera system for dynamic crowd analysis. *Pattern Recognition Letters*. Pattern Recognition and Crowd Analysis, 44 :141-151, juillet 2014. ISSN : 0167-8655. DOI : [10.1016/j.patrec.2013.11.020](https://doi.org/10.1016/j.patrec.2013.11.020).
- [Coo⁺15] Diane J Cook et Narayanan C Krishnan. *Activity learning: discovering, recognizing, and predicting human behavior from sensor data*. John Wiley & Sons, 2015.
- [Dan⁺13] M. Danancher, J. J. Lesage, L. Litz et G. Faraut. Online Location Tracking of a Single Inhabitant Based on a State Estimator. In *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Pages 391-396, octobre 2013. DOI : [10.1109/SMC.2013.73](https://doi.org/10.1109/SMC.2013.73).
- [Dan⁺16] M. Danancher, J. J. Lesage et L. Litz. Model-Based Location Tracking of an a priori Unknown Number of Inhabitants in Smart Homes. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(2) :1090-1101, avril 2016. ISSN : 1545-5955. DOI : [10.1109/TASE.2015.2477558](https://doi.org/10.1109/TASE.2015.2477558).
- [Dav⁺07] Pierre David, Vincent Idasiak et Frédéric Kratz. A Sensor Placement Approach for the Monitoring of Indoor Scenes. en. In Gerd Kortuem, Joe Finney, Rodger Lea et Vasughi Sundramoorthy, éditeurs, *Smart Sensing and Context*, numéro 4793 in Lecture Notes in Computer Science, Pages 110-125. Springer Berlin Heidelberg, janvier 2007. ISBN : 978-3-540-75695-8 978-3-540-75696-5.
- [De⁺12] Liyanage C. De Silva, Chamin Morikawa et Iskandar M. Petra. State of the art of smart homes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Advanced issues in Artificial Intelligence and Pattern Recognition for Intelligent Surveillance System in Smart Home Environment, 25(7) :1313-1321, octobre 2012. ISSN : 0952-1976. DOI : [10.1016/j.engappai.2012.05.002](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.05.002). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095219761200098X> (visité le 17/02/2016).
- [De⁺14] S De Miguel-Bilbao, J García, F López, P García-Sagredo, M Pascual, B Montero, A Cruz Jentoft et CH Salvador. Home monitoring of elderly for early detection of changes in activity and behavior patterns. In *XIII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2013*, Pages 1205-1208. Springer, 2014.
- [Deb⁺02] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal et T. Meyarivan. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2) :182-197, avril 2002. ISSN : 1089-778X. DOI : [10.1109/4235.996017](https://doi.org/10.1109/4235.996017).
- [Deb⁺14] K. Deb et H. Jain. An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 18(4) :577-601, août 2014. ISSN : 1089-778X. DOI : [10.1109/TEVC.2013.2281535](https://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2281535).
- [Deb01] Kalyanmoy Deb. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, tome 16. John Wiley & Sons, 2001. URL : https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=OSTn4GSy2uQC&oi=fnd&pg=PR15&dq=Deb+Multi-Objective+Optimization+Using+Evolutionary+Algorithms&ots=tFfrpAHkc7&sig=_IkRCdgFrEz9WXpomzERGgrenU (visité le 24/08/2017).
- [Deb11] Kalyanmoy Deb. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms: An introduction. *KanGAL Report*, (2011003), 2011.
- [Dem⁺06] George Demiris, Marjorie Skubic, Marilyn Rantz, James Keller, Myra Aud, Brian Hensel et Zhihai He. Smart home sensors for the elderly: a model for participatory

- formative evaluation. *human-computer interaction*, 6 :7, 2006. URL : <https://nit.felk.cvut.cz/~dark/ProjektVTymu-RizeniProstredi/Clanky/145.pdf> (visité le 02/05/2016).
- [Dem09] G. Demiris. Privacy and social implications of distinct sensing approaches to implementing smart homes for older adults. In *2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Pages 4311-4314, septembre 2009. DOI : [10.1109/IEMBS.2009.5333800](https://doi.org/10.1109/IEMBS.2009.5333800).
- [Din⁺11] Dan Ding, Rory A. Cooper, Paul F. Pasquina et Lavinia Fici-Pasquina. Sensor technology for smart homes. *Maturitas*, 69(2) :131-136, juin 2011. ISSN : 0378-5122. DOI : [10.1016/j.maturitas.2011.03.016](https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2011.03.016). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378512211000983> (visité le 08/12/2015).
- [dMig⁺13] S de Miguel-Bilbao, J García, F López, P García-Sagredo, M Pascual, B Montero, A Cruz Jentoft et CH Salvador. Home monitoring of elderly for early detection of changes in activity and behavior patterns. In *XIII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2013*, Pages 1205-1208. Springer, 2013.
- [Doğ⁺08] Kutluyıl Doğançay et Hatem Hmam. Optimal angular sensor separation for AOA localization. *Signal Processing*, 88(5) :1248-1260, mai 2008. ISSN : 0165-1684. DOI : [10.1016/j.sigpro.2007.11.013](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2007.11.013). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168407003891> (visité le 19/04/2017).
- [Eki⁺06] Eylem Ekici, Yaoyao Gu et Doruk Bozdog. Mobility-based communication in wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 44(7) :56-62, 2006. URL : http://ece.osu.edu/~ekici/papers/mbc_commag.pdf (visité le 15/07/2017).
- [Emm⁺13] S. P. Emmons et F. Kamangar. Evaluating the optimal placement of binary sensors. *International Journal of Information Sciences & Techniques*, 3(1) :1, 2013.
- [Eur15] Eurostat. *People in the EU : who are we and how do we live? : 2015 edition*. en. Statistical books. Publications Office of the European Union, Luxembourg, novembre 2015. ISBN : 978-92-79-50329-0. URL : <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a03ca7b9-91ac-11e5-983e-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF> (visité le 23/01/2018). doi: 10.2785/803528.
- [Fan⁺14] M. P. Fanti, A. M. Mangini, W. Ukovic, J. J. Lesage et K. Viard. A Petri net model of an integrated system for the Health Care At Home management. In *2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Pages 582-587, août 2014. DOI : [10.1109/CoASE.2014.6899385](https://doi.org/10.1109/CoASE.2014.6899385).
- [Fan⁺16] M. P. Fanti, M. Roccotelli, J. J. Lesage et G. Faraut. Motion detector placement optimization in smart homes for inhabitant location tracking. In *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Pages 1-6, septembre 2016. DOI : [10.1109/ETFA.2016.7733558](https://doi.org/10.1109/ETFA.2016.7733558).
- [Fan⁺17] Maria Pia Fanti, Michele Roccotelli, Gregory Faraut et Jean-Jacques Lesage. Smart Placement of Motion Sensors in a Home Environment. In *IEEE SMC 2017 - IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Pages 894-899, Banff, Canada, octobre 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01655388> (visité le 22/01/2018).
- [Faw06] Tom Fawcett. An introduction to ROC analysis. *Pattern recognition letters*, 27(8) :861-874, 2006.
- [Fed⁺13] Valerii V. Fedorov et Sergei L. Leonov. *Optimal Design for Nonlinear Response Models*. en. CRC Press, juillet 2013. ISBN : 978-1-4398-2151-0.

- [Fie⁺11] Robert A Fieo, Elizabeth J Austin, John M Starr et Ian J Deary. Calibrating adl-iadl scales to improve measurement accuracy and to extend the disability construct into the preclinical range: a systematic review. *BMC geriatrics*, 11(1) :42, 2011.
- [Fis⁺13a] Anne G. Fisher et Kristin Bray Jones. *Assessment of Motor and Process Skills Vol. 1 8th Edition (2014)*. en. Three Star Press, Incorporated, décembre 2013. ISBN : 978-0-9835123-1-8.
- [Fis⁺13b] Anne G. Fisher et Kristin Bray Jones. *Assessment of Motor and Process Skills Vol. 2 8th Edition (2014)*. en. Three Star Press, Incorporated, décembre 2013. ISBN : 978-0-9835123-2-5.
- [Fit⁺93] John F. Fitzgerald, David M. Smith, Douglas K. Martin, Jay A. Freedman et Fredric D. Wolinsky. Replication of the Multidimensionality of Activities of Daily Living. *Journal of Gerontology*, 48(1) :S28-S32, janvier 1993. ISSN : 0022-1422. DOI : [10.1093/geronj/48.1.S28](https://academic.oup.com/geronj/article-abstract/48/1/S28/557582/Replication-of-the-Multidimensionality-of). URL : <https://academic.oup.com/geronj/article-abstract/48/1/S28/557582/Replication-of-the-Multidimensionality-of> (visité le 11/07/2017).
- [Fle⁺10] A. Fleury, M. Vacher et N. Noury. SVM-Based Multimodal Classification of Activities of Daily Living in Health Smart Homes: Sensors, Algorithms, and First Experimental Results. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 14(2) :274-283, mars 2010. ISSN : 1089-7771. DOI : [10.1109/TITB.2009.2037317](https://doi.org/10.1109/TITB.2009.2037317).
- [Fri13] J. Fricke. Les activités de la vie quotidienne. *JH Stone, M. Blouin, International Encyclopedia of Rehabilitation*. Available online: <http://cirrie.buffalo.edu/encyclopedia/fr/article/37>, 2013.
- [Fro⁺09] Jon E. Froehlich, Eric Larson, Tim Campbell, Conor Haggerty, James Fogarty et Shwetak N. Patel. HydroSense: Infrastructure-mediated Single-point Sensing of Whole-home Water Activity. In *Proceedings of the 11th International Conference on Ubiquitous Computing, UbiComp '09*, Pages 235-244, New York, NY, USA. ACM, 2009. ISBN : 978-1-60558-431-7. DOI : [10.1145/1620545.1620581](https://doi.org/10.1145/1620545.1620581).
- [Gay13] Thibault Gayral. *Étalonnage d'un instrument d'observation spatial actif*. fr. Thèse de doctorat, Université Nice Sophia Antipolis, novembre 2013. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00950898/document> (visité le 06/03/2015).
- [Gen09] Tony Gentry. Smart homes for people with neurological disability: State of the art. *NeuroRehabilitation*, 25(3) :209-217, 2009. URL : <http://content.iospress.com/articles/neurorehabilitation/nre00517> (visité le 03/05/2016).
- [Gok⁺13] Hulya Gokalp et Malcolm Clarke. Monitoring activities of daily living of the elderly and the potential for its use in telecare and telehealth: a review. *TELEMEDICINE and e-HEALTH*, 19(12) :910-923, 2013.
- [Gon⁺09] Jose-Joel Gonzalez-Barbosa, Teresa García-Ramírez, Joaquín Salas, Juan-Bautista Hurtado-Ramos et José-de-Jesús Rico-Jiménez. Optimal Camera Placement for Total Coverage. In *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'09*, Pages 3672-3676, Piscataway, NJ, USA. IEEE Press, 2009. ISBN : 978-1-4244-2788-8. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1703775.1704040> (visité le 16/01/2015).
- [Gru⁺] Robin Gruna, Kalyanmoy Deb et al. Evolutionary Multiobjective Optimization. URL : <http://demonstrations.wolfram.com/EvolutionaryMultiobjectiveOptimization/> (visité le 11/10/2016).

- [Gup⁺10] Sidhant Gupta, Matthew S. Reynolds et Shwetak N. Patel. ElectriSense: Single-point Sensing Using EMI for Electrical Event Detection and Classification in the Home. In *Proceedings of the 12th ACM International Conference on Ubiquitous Computing, UbiComp '10*, Pages 139-148, New York, NY, USA. ACM, 2010. ISBN : 978-1-60558-843-8. DOI : [10.1145/1864349.1864375](https://doi.org/10.1145/1864349.1864375).
- [Guy13] Rémy Guyonneau. *Méthodes ensemblistes pour la localisation en robotique mobile*. fr. Thèse de doctorat, Université d'Angers, novembre 2013. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00961501/document> (visité le 06/06/2018).
- [Haz16] T. J. Hazen. Microsoft and Liebherr Collaborating on New Generation of Smart Refrigerators, Blog, février 2016. URL : <https://blogs.technet.microsoft.com/machinelearning/2016/09/02/microsoft-and-liebherr-collaborating-on-new-generation-of-smart-refrigerators/> (visité le 02/08/2017).
- [Hee⁺17] Julia van Heek, Simon Himmel et Martina Zieffle. Privacy, Data Security, and the Acceptance of AAL-Systems – A User-Specific Perspective. en. In *Human Aspects of IT for the Aged Population. Aging, Design and User Experience*, Lecture Notes in Computer Science, Pages 38-56. Springer, Cham, juillet 2017. ISBN : 978-3-319-58529-1 978-3-319-58530-7. DOI : [10.1007/978-3-319-58530-7_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58530-7_4). URL : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-58530-7_4 (visité le 24/01/2018).
- [Hol⁺08] John Hollerbach, Wisama Khalil et Maxime Gautier. Model Identification. en. In Bruno Siciliano et Oussama Khatib, éditeurs, *Springer Handbook of Robotics*, Pages 321-344. Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN : 978-3-540-23957-4 978-3-540-30301-5. (Visité le 13/05/2015).
- [Hol92] John H. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. en. MIT Press, 1992. ISBN : 978-0-262-58111-0.
- [Hon⁺16] J. H. Hong, J. Ramos et A. K. Dey. Toward Personalized Activity Recognition Systems With a Semipopulation Approach. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 46(1) :101-112, février 2016. ISSN : 2168-2291. DOI : [10.1109/THMS.2015.2489688](https://doi.org/10.1109/THMS.2015.2489688).
- [Hoo⁺14] Barbara Hooper et Wendy Wood. The philosophy of occupational therapy: a framework for practice. In Helen S Willard et Barbara A. Boyt Schell, éditeurs, *Willard & Spackman's occupational therapy*. Pages 35-46. Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 12th édition, 2014. ISBN : 978-1-4511-1080-7 1-4511-1080-4 978-1-4511-8907-0 1-4511-8907-9.
- [Hri⁺05] George Hripcsak et Adam S. Rothschild. Agreement, the F-Measure, and Reliability in Information Retrieval. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 12(3) :296-298, mai 2005. ISSN : 1067-5027. DOI : [10.1197/jamia.M1733](https://doi.org/10.1197/jamia.M1733).
- [Jai⁺14] H. Jain et K. Deb. An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point Based Nondominated Sorting Approach, Part II: Handling Constraints and Extending to an Adaptive Approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 18(4) :602-622, août 2014. ISSN : 1089-778X. DOI : [10.1109/TEVC.2013.2281534](https://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2281534).
- [Jeu12] François-Xavier Jeuland. *La maison communicante: Réussir son installation domotique et multimédia*. fr. Editions Eyrolles, mars 2012. ISBN : 978-2-212-13276-2.
- [Jou⁺16] A. Joubair, A. S. Tahan et I. A. Bonev. Performances of observability indices for industrial robot calibration. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on*

- Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Pages 2477-2484, octobre 2016. DOI : [10.1109/IROS.2016.7759386](https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759386).
- [Kad⁺10] Rachid Kadouche, Hélène Pigot, Bessam Abdulrazaka et Sylvain Giroux. Support Vector Machines for Inhabitant Identification in Smart Houses. en. In *Ubiquitous Intelligence and Computing*, Pages 83-95. Springer Berlin Heidelberg, octobre 2010. DOI: [10.1007/978-3-642-16355-5_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-16355-5_9).
- [Kat⁺63] Sidney Katz, Amasa B. Ford, Roland W. Moskowitz, Beverly A. Jackson et Marjorie W. Jaffe. Studies of illness in the aged: the index of ADL: a standardized measure of biological and psychosocial function. *Jama*, 185(12) :914-919, 1963. URL : <http://jama.jamanetwork.com/article.aspx?articleid=666768> (visité le 11/07/2017).
- [Kay⁺11] Jeffrey A Kaye, Shoshana A Maxwell, Nora Mattek, Tamara L Hayes, Hiroko Dodge, Misha Pavel, Holly B Jimison, Katherine Wild, Linda Boise et Tracy A Zitzelberger. Intelligent systems for assessing aging changes: home-based, unobtrusive, and continuous assessment of aging. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 66(suppl 1) :i180-i190, 2011.
- [Kel03] Alonzo Kelly. Precision dilution in triangulation based mobile robot position estimation. In *Intelligent Autonomous Systems*, tome 8, Pages 1046-1053, 2003. URL : <http://www.frc.ri.cmu.edu/~alonzo/pubs/papers/ias8.pdf> (visité le 27/01/2015).
- [Ken11] James Kennedy. Particle Swarm Optimization. en. In *Encyclopedia of Machine Learning*, Pages 760-766. Springer, Boston, MA, 2011. URL : https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-0-387-30164-8_630 (visité le 12/01/2018). DOI: [10.1007/978-0-387-30164-8_630](https://doi.org/10.1007/978-0-387-30164-8_630).
- [Kim⁺08] Carole L. Kimberlin et Almut G. Winetrstein. Validity and reliability of measurement instruments used in research. *American Journal of Health-System Pharmacy*, 65(23), 2008. URL : <http://www.lecy.info/s/Reliability-and-Validity-of-Measures.pdf> (visité le 22/08/2017).
- [Kim⁺11] Eunju Kim et Sumi Helal. Modeling Human Activity Semantics for Improved Recognition Performance. en. In *Ubiquitous Intelligence and Computing*, Lecture Notes in Computer Science, Pages 514-528. Springer, Berlin, Heidelberg, septembre 2011. ISBN : 978-3-642-23640-2 978-3-642-23641-9. DOI : [10.1007/978-3-642-23641-9_41](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23641-9_41). URL : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-23641-9_41 (visité le 11/07/2017).
- [Kni17] Will Knight. There's a big problem with AI: even its creators can't explain how it works, avril 2017. URL : <https://www.technologyreview.com/s/604087/the-dark-secret-at-the-heart-of-ai/> (visité le 11/09/2017).
- [Knu97] Donald E. Knuth. *The Art of Computer Programming, Volume 2 (3rd Ed.): Semi-numerical Algorithms*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1997. ISBN : 0-201-89684-2.
- [Kon⁺06] Abdullah Konak, David W. Coit et Alice E. Smith. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering & System Safety*. Special Issue - Genetic Algorithms and Reliability Special Issue - Genetic Algorithms and Reliability, 91(9) :992-1007, septembre 2006. ISSN : 0951-8320. DOI : [10.1016/j.res.2005.11.018](https://doi.org/10.1016/j.res.2005.11.018).
- [Kou⁺10] Marc T. Kouakou, Shinya Yamamoto, Keiichi Yasumoto et M. Ito. Cost-efficient deployment for full-coverage and connectivity in indoor 3d WSNs. *Proc. IPSJ Dicom*, 2010, 2010. URL : http://ubi-lab.naist.jp/www_old/papers/DICOMO2010-marc.pdf (visité le 11/12/2014).

- [Kou⁺12] M.T. Kouakou, K. Yasumoto, S. Yamamoto et M. Ito. Cost-efficient sensor deployment in indoor space with obstacles. In *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2012 IEEE International Symposium on a*, Pages 1-9, juin 2012. DOI : [10.1109/WoWMoM.2012.6263688](https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2012.6263688).
- [Kwo02] Yue Kuen Kwok. *Applied Complex Variables for Scientists and Engineers*. en. Cambridge University Press, février 2002. ISBN : 978-0-521-00462-6.
- [Li⁺14] F. Li, J. Luo, W. Wang et Y. He. Autonomous Deployment for Load Balancing k-Surface Coverage in Sensor Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, PP(99) :1-1, 2014. ISSN : 1536-1276. DOI : [10.1109/TWC.2014.2341585](https://doi.org/10.1109/TWC.2014.2341585).
- [Lom⁺09] A. Lombardi, M. Ferri, G. Rescio, M. Grassi et P. Malcovati. Wearable wireless accelerometer with embedded fall-detection logic for multi-sensor ambient assisted living applications. In *2009 IEEE Sensors*, Pages 1967-1970, octobre 2009. DOI : [10.1109/ICSENS.2009.5398327](https://doi.org/10.1109/ICSENS.2009.5398327).
- [Mag⁺13] T. Magherini, A. Fantechi, C. D. Nugent et E. Vicario. Using Temporal Logic and Model Checking in Automated Recognition of Human Activities for Ambient-Assisted Living. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 43(6) :509-521, novembre 2013. ISSN : 2168-2291. DOI : [10.1109/TSMC.2013.2283661](https://doi.org/10.1109/TSMC.2013.2283661).
- [Mar⁺06] Sonia Martínez et Francesco Bullo. Optimal sensor placement and motion coordination for target tracking. *Automatica*, 42(4) :661-668, avril 2006. ISSN : 0005-1098. DOI : [10.1016/j.automatica.2005.12.018](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2005.12.018). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000510980600015X> (visité le 09/12/2014).
- [Mas⁺16] Aurélien Masseur, David Daney et Yves Papegay. Robust Design of Parameter Identification. In *ARK 2016 - Advances in Robotics Kinematics*, Grasse, France, juin 2016.
- [Mey13] Sylvie Meyer. *De l'activité à la participation*. Ergothérapies. De Boeck-Solal, Paris, 2013. ISBN : 978-2-35327-185-6. URL : <http://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb43868049s> (visité le 15/06/2017). ill. 24 cm. Textes en français et anglais. Bibliogr. et webliogr. p. 253-264.
- [Min] Ministère des Affaires Sociales et de la Santé. Loi n° 2015-1776 relative à l'adaptation de la société au vieillissement, décembre. URL : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichLoiPreparation.do?idDocument=JORFDOLE000029039475&type=general&typeLoi=proj&legislature=14> (visité le 10/07/2017).
- [Min⁺07] Ministère du logement et de la ville, Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables et Ministère du travail, des relations sociales et de la solidarité. Circulaire interministérielle n° DGUHC 2007-53 du 30 novembre 2007 relative à l'accessibilité des établissements recevant du public, des installations ouvertes au public et des bâtiments d'habitation, novembre 2007. URL : <http://www.cohesion-territoires.gouv.fr/documents-utiles-pour-l-accessibilite-des-batiments-356> (visité le 08/01/2017).
- [Min16] Ministère des Affaires Sociales de la Santé et des Droits des Femmes. La loi relative à l'adaptation de la société au vieillissement - Dossier de Presse, Press Kit, janvier 2016. URL : http://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/dossier_de_presse_loi_asv_janv2016.pdf (visité le 10/07/2017).
- [oOcc17] World Federation of Occupational Therapists Member Organisations. Definition of occupational therapy, juin 2017. URL : <http://www.wfot.org/AboutUs/AboutOccupationalTherapy/DefinitionofOccupationalTherapy.aspx> (visité le 25/07/2017).

- [Par⁺94] Steve Park, Anne G Fisher et Craig A Velozo. Using the assessment of motor and process skills to compare occupational performance between clinic and home settings. *American Journal of Occupational Therapy*, 48(8) :697-709, 1994.
- [Pen⁺02] Chao-Ying Joanne Peng, Kuk Lida Lee et Gary M. Ingersoll. An Introduction to Logistic Regression Analysis and Reporting. *The Journal of Educational Research*, 96(1) :3-14, septembre 2002. ISSN : 0022-0671. DOI : [10.1080/00220670209598786](https://doi.org/10.1080/00220670209598786). URL : <http://dx.doi.org/10.1080/00220670209598786> (visité le 24/10/2017).
- [Pes⁺06] A. Peskine, P. Couturier et M. Verny. Évaluation en vie quotidienne chez les sujets âgés déments. fr. In *Évaluation des troubles neuropsychologiques en vie quotidienne*, Pages 117-122. Springer, Paris, 2006. ISBN : 978-2-287-34364-3 978-2-287-34365-0. URL : https://link.springer.com/chapter/10.1007/2-287-34365-2_12 (visité le 11/07/2017). DOI: 10.1007/2-287-34365-2_12.
- [Phi⁺04] M. Philipose, K. P. Fishkin, M. Perkwitz, D. J. Patterson, D. Fox, H. Kautz et D. Hahnel. Inferring activities from interactions with objects. *IEEE Pervasive Computing*, 3(4) :50-57, octobre 2004. ISSN : 1536-1268. DOI : [10.1109/MPRV.2004.7](https://doi.org/10.1109/MPRV.2004.7).
- [Pin⁺13] S. Pino-Povedano et F. J. González-Serrano. On the Use of Modified Cramér-Rao Bound in Sensor Deployment. *IEEE Sensors Journal*, 13(11) :4163-4171, novembre 2013. ISSN : 1530-437X. DOI : [10.1109/JSEN.2013.2264933](https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2264933).
- [Poi16] Mailys Pointreau. *Élaboration d'un modèle d'activité en vue de l'optimisation du placement de capteurs dans un milieu connecté*. Mémoire de master, Collège Sciences et Technologies - Université de Bordeaux, juillet 2016. Sciences cognitives et Ergonomie - Spécialité Sciences Cognitives.
- [Por⁺13] François Portet, Michel Vacher, Caroline Golanski, Camille Roux et Brigitte Meillon. Design and evaluation of a smart home voice interface for the elderly: acceptability and objection aspects. en. *Personal and Ubiquitous Computing*, 17(1) :127-144, janvier 2013. ISSN : 1617-4909, 1617-4917. DOI : [10.1007/s00779-011-0470-5](https://doi.org/10.1007/s00779-011-0470-5). URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/s00779-011-0470-5> (visité le 17/07/2017).
- [Pow11] David Martin Powers. Evaluation: from Precision, Recall and F-measure to ROC, Informedness, Markedness and Correlation. en, décembre 2011. ISSN : 2229-3981. URL : <http://dspace.flinders.edu.au/xmlui/handle/2328/27165> (visité le 09/02/2017).
- [Pra⁺06] Pascale Pradat-Diehl et Anne Peskine. *Évaluation des troubles neuropsychologiques en vie quotidienne*. fr. Springer Science & Business Media, août 2006. ISBN : 978-2-287-34365-0.
- [Ras⁺13] P. Rashidi et A. Mihailidis. A Survey on Ambient-Assisted Living Tools for Older Adults. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 17(3) :579-590, mai 2013. ISSN : 2168-2194. DOI : [10.1109/JBHI.2012.2234129](https://doi.org/10.1109/JBHI.2012.2234129).
- [Rol⁺08] Susanne Smith Roley, Cynthia J Barrows, L Susan Brownrigg OTR, Deanna Iris Sava, L Vibeke Talley OTR, BS Kristi Voelkerding, L COTA, Emily Smith MOT, MS Pamela Toto, MHSA Deborah Lieberman et al. Occupational therapy practice framework: domain & process 2nd edition. *The American journal of occupational therapy*, 62(6) :625, 2008.
- [Rol⁺14] Susanne Smith Roley, Cynthia J. Barrows, L. Susan Brownrigg OTR, Deanna Iris Sava, L. Vibeke Talley OTR, B. S. Kristi Voelkerding, L. COTA, Emily Smith MOT, M. S. Pamela Toto, O. T. R. Sarah King MOT et al. Occupational therapy practice framework: Domain & process 2nd edition. *The American journal of occupational therapy*, 62(6) :625, 2014. URL : <http://search.proquest.com/openview/>

- [dc24b3867596407d64e9f1f2d2f75bc0/1?pq-origsite=gscholar&cbl=47935](#) (visité le 11/07/2017).
- [Sad11] Fariba Sadri. Ambient Intelligence: A Survey. *ACM Comput. Surv.*, 43(4) :36:1-36:66, octobre 2011. ISSN : 0360-0300. DOI : [10.1145/1978802.1978815](#). URL : [http://doi.acm.org/10.1145/1978802.1978815](#) (visité le 10/07/2017).
- [Sai⁺15] J. Saives, C. Pianon et G. Faraut. Activity Discovery and Detection of Behavioral Deviations of an Inhabitant From Binary Sensors. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 12(4) :1211-1224, octobre 2015. ISSN : 1545-5955. DOI : [10.1109/TASE.2015.2471842](#).
- [San13] Julien Alexandre Dit Sandretto. *Étalonnage des robots à câbles : identification et qualification*. fr. Thèse de doctorat, Université Nice Sophia Antipolis, septembre 2013. URL : [https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00933816/document](#) (visité le 03/11/2017).
- [Sas07] Yutaka Sasaki. The truth of the F-measure. *Teach Tutor mater*, 1(5), 2007. URL : [http://www.cs.odu.edu/~mukka/cs795sum09dm/Lecturenotes/Day3/F-measure-YS-26Oct07.pdf](#).
- [Sca⁺06] Cliodhna Ní Scanail, Sheila Carew, Pierre Barralon, Norbert Noury, Declan Lyons et Gerard M Lyons. A review of approaches to mobility telemonitoring of the elderly in their living environment. *Annals of Biomedical Engineering*, 34(4) :547-563, 2006.
- [Sic⁺16] Bruno Siciliano et Oussama Khatib. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2016. URL : [//www.springer.com/us/book/9783319325507](#).
- [Sku⁺09] Marjorie Skubic, Gregory Alexander, Mihail Popescu, Marilyn Rantz et James Keller. A smart home application to eldercare: Current status and lessons learned. *Technology and Health Care*, 17(3) :183-201, janvier 2009. ISSN : 0928-7329. DOI : [10.3233/THC-2009-0551](#). URL : [http://content.iospress.com/articles/technology-and-health-care/thc00551](#) (visité le 15/04/2016).
- [Sok⁺09] Marina Sokolova et Guy Lapalme. A systematic analysis of performance measures for classification tasks. *Information Processing & Management*, 45(4) :427-437, juillet 2009. ISSN : 0306-4573. DOI : [10.1016/j.ipm.2009.03.002](#). URL : [http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306457309000259](#) (visité le 23/02/2018).
- [Sol17] Innovative OT Solutions. Assessment of Motor and Process Skills. 2017. URL : [https://www.innovativeotsolutions.com/tools/amps](#) (visité le 21/07/2017).
- [Spe14] Sandro Sperandei. Understanding logistic regression analysis. *Biochemia Medica*, 24(1) :12-18, février 2014. ISSN : 1330-0962. DOI : [10.11613/BM.2014.003](#). URL : [https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3936971/](#) (visité le 24/10/2017).
- [Sta⁺05] J. A. Stankovic, Q. Cao, T. Doan, L. Fang, Z. He, R. Kiran, S. Lin, S. Son, R. Stoleru et A. Wood. Wireless sensor networks for in-home healthcare: Potential and challenges. In *High confidence medical device software and systems (HCMDSS) workshop*, Pages 2-3, 2005. URL : [https://cheetah.cs.virginia.edu/~son/publications/HCMDSS05.pdf](#) (visité le 04/05/2016).
- [Sta79] W. Stadler. A survey of multicriteria optimization or the vector maximum problem, part I: 1776–1960. en. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 29(1) :1-52, septembre 1979. ISSN : 0022-3239, 1573-2878. DOI : [10.1007/BF00932634](#). URL : [https://link.springer.com/article/10.1007/BF00932634](#) (visité le 24/08/2017).
- [Sun⁺08] Yu Sun et J.M. Hollerbach. Observability index selection for robot calibration. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008*, Pages 831-836, mai 2008. DOI : [10.1109/ROBOT.2008.4543308](#).

- [Tao11] Terence Tao. *An introduction to measure theory*, tome 126. American Mathematical Soc., 2011. URL : [https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=HoGDAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Tao,+Terence+\(2011\).+An+introduction+to+measure+theory.&ots=iNEdZq1TTI&sig=wefQVDZE35DC8B9FEva4PV6aXTQ](https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=HoGDAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Tao,+Terence+(2011).+An+introduction+to+measure+theory.&ots=iNEdZq1TTI&sig=wefQVDZE35DC8B9FEva4PV6aXTQ) (visité le 22/08/2017).
- [Tei⁺10] T Teixeira, G Dublon et A Savvides. A survey of human-sensing: Methods for detecting presence, count, location, track and Identity. Rapport technique, Technical report, ENALAB, Yale University, 2010.
- [Tor84] D. J. Torrieri. Statistical Theory of Passive Location Systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-20(2) :183-198, mars 1984. ISSN : 0018-9251. DOI : [10.1109/TAES.1984.310439](https://doi.org/10.1109/TAES.1984.310439).
- [Unr04] Anita M. Unruh. Reflections on: “So... What Do You Do?” Occupation and the Construction of Identity. en. *Canadian Journal of Occupational Therapy*, 71(5) :290-295, décembre 2004. ISSN : 0008-4174. DOI : [10.1177/000841740407100508](https://doi.org/10.1177/000841740407100508). URL : <http://dx.doi.org/10.1177/000841740407100508> (visité le 25/07/2017).
- [Urr00] Jorge Urrutia. Chapter 22 - Art Gallery and Illumination Problems. In *Handbook of Computational Geometry*, Pages 973-1027. North-Holland, Amsterdam, 2000. ISBN : 978-0-444-82537-7. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444825377500231> (visité le 29/01/2018). DOI: [10.1016/B978-044482537-7/50023-1](https://doi.org/10.1016/B978-044482537-7/50023-1).
- [Van16] Hanneke Van Bruggen. Lecture notes in occupational therapy. Online: <http://enothe.eu/annual-meeting/joint-congress-16/>, juin 2016. URL : http://enothe.eu/Wordpress%5C%20Documents/Galway/Conf%3%A9rence%5C%20ENOTHE2016_05_03%5C%20french%5C%20version.pdf (visité le 26/07/2017).
- [Via⁺16] K Viard, MP Fanti, G Faraut et J-J Lesage. An Event-Based Approach for Discovering Activities of Daily Living by Hidden Markov Models. In *15th IEEE Int. Conf. on Ubiquitous Computing and Communications, (IUCC 2016)*, pp.85-92, Granada, Spain, décembre 2016.
- [Vir⁺02] G. Virone, N. Noury et J. Demongeot. A system for automatic measurement of circadian activity deviations in telemedicine. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 49(12) :1463-1469, décembre 2002. ISSN : 0018-9294. DOI : [10.1109/TBME.2002.805452](https://doi.org/10.1109/TBME.2002.805452).
- [Vla⁺15] I. Vlasenko, I. Nikolaidis et E. Stroulia. The Smart-Condo: Optimizing Sensor Placement for Indoor Localization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 45(3) :436-453, mars 2015. ISSN : 2168-2216. DOI : [10.1109/TSMC.2014.2356437](https://doi.org/10.1109/TSMC.2014.2356437).
- [Wan⁺12] Liang Wang, Tao Gu, Xianping Tao et Jian Lu. A hierarchical approach to real-time activity recognition in body sensor networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 8(1) :115-130, 2012.
- [Wol15] Wolfram Research, Inc. Mathematica, version 10.2, 2015. URL : <http://www.wolfram.com/mathematica/>.
- [Zho⁺11] Aimin Zhou, Bo-Yang Qu, Hui Li, Shi-Zheng Zhao, Ponnuthurai Nagaratnam Suganthan et Qingfu Zhang. Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(1) :32-49, mars 2011. ISSN : 2210-6502. DOI : [10.1016/j.swevo.2011.03.001](https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.03.001). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210650211000058> (visité le 24/08/2017).

- [Zhu⁺12] Chuan Zhu, Chunlin Zheng, Lei Shu et Guangjie Han. A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*. Simulation and Testbeds, 35(2) :619-632, mars 2012. ISSN : 1084-8045. DOI : [10.1016/j.jnca.2011.11.016](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2011.11.016). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804511002323> (visité le 13/07/2017).
- [Zhu⁺14] Chunsheng Zhu, Lei Shu, Takahiro Hara, Lei Wang, Shojiro Nishio et Laurence T. Yang. A survey on communication and data management issues in mobile sensor networks. en. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 14(1) :19-36, janvier 2014. ISSN : 1530-8677. DOI : [10.1002/wcm.1219](https://doi.org/10.1002/wcm.1219). URL : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wcm.1219/abstract> (visité le 13/07/2017).

Acronymes français

ANFE association nationale française des ergothérapeutes

Insee institut national de la statistique et des études économiques

IRM imagerie par résonance magnétique

MO multi-objectifs

PMO Pareto multi-objectifs

PMR personnes à mobilité réduite

Acronymes anglais

AAL ambient assisted living
AALS ambient assisted living system
ADL activity of daily living
AGP art gallery problem
AMPS assessment of motor and process skills
AoA angle of arrival
AOTA american occupational therapy association
AR activity recognition

BLUE best linear unbiased estimator

CAR circadian activity rythm
CGR coverage general region
CI confusion information
CIR confusion information region
CR coverage region
CRLB cramér-rao lower bound
CSR coverage sub-region

DDA data-driven approach
DR displacement region

EFA extended finite automaton
ER existence region

GA genetic algorithm
GDOP geometrical dilution of precision

HMM hidden markov model

IADL instrumental activity of daily living
IAL interval analysis localization
ICT information and communication technologies
ILP integer linear programming
IR interest region

KDA knowledge-driven approach

LIDAR light detection and ranging

LSE least square estimator

MLE maximum likelihood estimator

MOEA multi-objective evolutionary algorithm

MR measure region

MSR measure sub-region

MVUE minimum-variance unbiased estimator

MWSN mobile wireless sensor network

NLSE non-linear least square estimator

NSGA-II non-sorted genetic algorithm ii

ODOE optimal design of experiments

OTPF occupational therapy practice framework

PCA principal component analysis

PMA pattern mining approach

PN petri net

PSO particle swarm optimization

RFID radio frequency identification

RoI region of interest

SLAM simultaneous localization and mapping

SN sensor network

SP sensor placement

SVD singular value decomposition

SVM support vector machine

TL temporal logic

ToA time of arrival

TPN time petri net

WFOT world federation of occupational therapists

WHO world health organisation

WR work region

WSN wireless sensor network

Liste des termes anglais

Au sein de ce document, tous les termes scientifiques usuellement utilisés en anglais ont été traduits en français par souci d'homogénéité. Ci-suit la correspondance anglaise de certaines abréviations et termes utilisés.

- AAD** assistance à l'autonomie à domicile, *angl.* ambient assisted living (AAL)
- ACP** analyse en composantes principales, *angl.* principal component analysis (PCA)
- AEM** approche d'extraction de motifs, *angl.* pattern mining approach (PMA)
- AFE** automate fini étendu, *angl.* extended finite automaton (EFA)
- AG** algorithme génétique, *angl.* genetic algorithm (GA)
- AIVQ** activité instrumentale de vie quotidienne, *angl.* instrumental activity of daily living (IADL)
- AVQ** activité de vie quotidienne, *angl.* activity of daily living (ADL)
- DDA** approche axée données, *angl.* data-driven approach
- FN** faux négatif, *angl.* false negative
- FP** faux positif, *angl.* false positive
- IAL** localisation à l'aide de l'analyse par intervalles, *angl.* interval analysis localization
- IC** information de confusion, *angl.* confusion information (CI)
- KDA** approche axée connaissances, *angl.* knowledge-driven approach
- LIDAR** détection et estimation de la distance par la lumière, *angl.* light detection and ranging
- LT** logique temporelle, *angl.* temporal logic (TL)
- MMC** modèle de markov caché, *angl.* hidden markov model (HMM)
- MVS** machine à vecteurs de support, ou séparateur à vaste marge (SVM), *angl.* support vector machine (SVM)
- MWSN** réseau de capteurs sans-fils mobiles, *angl.* mobile wireless sensor network
- ODOE** planification optimale des expériences, *angl.* optimal design of experiments (ODOE)
- OEP** algorithme génétique, *angl.* genetic algorithm (GA)
- OMS** organisation mondiale de la santé, *angl.* world health organisation (WHO)

- PC** placement de capteurs, *angl.* sensor placement (SP)
- PGA** problème de la galerie d'art, *angl.* art gallery problem (AGP)
- PLNE** programmation linéaire en nombre entiers, *angl.* integer linear programming (ILP)
- PN** réseau de Petri, *angl.* petri net
- PSO** optimisation par essais particulaires, *angl.* particle swarm optimization
- RA** reconnaissance d'activité, *angl.* activity recognition (AR)
- RC** région de couverture, *angl.* coverage region (CR)
- RCA** rythme circadien des activités, *angl.* circadian activity rythm (CAR)
- RD** région de déplacement, *angl.* displacement region (DR)
- RE** région d'existence, *angl.* existence region (ER)
- RFID** identification par radiofréquence, *angl.* radio frequency identification
- RGC** région générale de couverture, *angl.* coverage general region (CGR)
- RI** région d'intérêt, *angl.* interest region (IR) ou region of interest (RoI)
- RIC** région d'information de confusion, *angl.* confusion information region (CIR)
- RM** région de mesure, *angl.* measure region (MR)
- RT** région de travail, *angl.* work region (WR)
- SAAD** système d'assistance à l'autonomie à domicile, *angl.* ambient assisted living system (AALS)
- SN** réseau de capteurs, *angl.* sensor network
- SRC** sous-région de couverture, *angl.* coverage sub-region (CSR)
- SRM** sous-région de mesure, *angl.* measure sub-region (MSR)
- SVD** décomposition en valeurs singulières, *angl.* singular value decomposition
- TIC** technologies de l'information et de la communication, *angl.* information and communication technologies (ICT)
- TOR** tout-ou-rien, *angl.* on-off controller
- TPN** réseau de Petri temporel, *angl.* time petri net
- VN** vrai négatif, *angl.* true negative (TN)
- VP** vrai positif, *angl.* true positive (TP)
- WSN** réseau de capteurs sans-fils, *angl.* wireless sensor network

Glossaire des régions

Au sein de ce document, de nombreuses régions ont été définies par soucis de formalisme. À dessein de clarté, ci-suit un rappel des notions usuellement utilisées.

Région de couverture

est l'union des régions contenant tous les éléments observables par un capteur

Région de déplacement

est la région des positions ponctuelles potentielles de l'obstacle amovible

Région d'existence

est la région résultante d'une somme de Minkowsky réalisée sur la région de déplacement avec l'enveloppe de l'obstacle amovible

Région générale de couverture

est l'union de toutes les régions de couverture

Région d'information de confusion

est l'union des régions contenant tous les éléments associés à une information de confusion particulière

Région d'intérêt

est l'union des régions contenant tous les éléments pertinents pour la réalisation de l'action

Région de mesure

est la région d'incertitude d'une mesure possible d'un capteur

Sous-région de couverture

est une région minimale issue du partitionnement des régions de couverture au niveau des couvertures inter-capteurs

Sous-région de mesure

est une région minimale issue du partitionnement des régions de couverture au niveau des mesures inter-capteurs

Région

est l'union d'un ensemble connexe ouvert et de son ensemble frontière

Région d'interactions

est une région dont les éléments sont des utilisations, dénotant l'interaction avec un objet

Région de lieux

est une région dont les éléments sont des positions, dénotant le lieu dans l'environnement